



تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل

داود شاهقلیان قهفرخی¹، غلامحسین رحیمی^{2*}، احمد فنادی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 141115-111، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/3/9

پذیرش: 96/7/1

کلیدواژگان:

ارتعاشات آزاد
پوسته ساندویچی
هسته لوزی شکل
رشته پیچی
روش تاگوچی

چکیده

پوسته‌های مشبک کامپوزیتی به دلیل خواص منحصربفردشان یکی از سازه‌های پرکاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می‌باشد. هدف تحقیق حاضر، تحلیل تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل می‌باشد. برای ساخت این پوسته‌ها، از قالب سیلیکونی، روش رشته‌پیچی و لایه چینی دستی استفاده شد. پوسته تقویت شده مشبک و پوسته ساده ساخته شده و سپس با چسباندن این دو بخش بهم، پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل ایجاد می‌شود. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش آنالیز مودال قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی ارتعاشی استخراج شده است. از مقایسه نتایج تجربی و عددی به دست آمده از نرم افزار آباکوس، مشاهده شد که انطباق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد. با استفاده از روش تاگوچی یک مطالعه پارامتری روی اثر تغییرات 6 پارامتر، شامل تعداد جفت ریب، ضخامت ریب، تعداد سلول واحد، ضخامت پوسته، چیدمان لایه‌ها و شرایط مرزی بر رفتار ارتعاشی پوسته ساندویچی با هسته لوزی شکل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد، فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی استوانه‌ای بیشترین حساسیت را نسبت به شرایط مرزی و ضخامت پوسته داشته و کمترین حساسیت را نسبت به ضخامت ریب و چیدمان لایه‌ها دارد. همچنین به جهت بررسی کارایی پوسته ساندویچی، فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل با پوسته ساده معادل در شرایط مرزی مختلف مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل در حالت شرط مرزی آزاد، 176% و در حالت شرط مرزی گیردار، 34% نسبت به پوسته ساده معادل بیشتر است.

Experimental and numerical free vibration analysis of composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores

Davoud Shahgholian-Ghahfarokhi, Gholam-Hossein Rahimi*, Ahmad Ghanadi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

Keywords

Free vibration
Sandwich shell
Lozenge core
Filament winding
Taguchi method

Abstract

Due to unique properties, lattice composite shells are used extensively in aviation, marine and automotive industry. The aim of this research is experimental and numerical free vibration analysis of composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores. For the fabrication of this shells, silicone mold, filament winding, and hand lay-up method were used. Stiffened shells and simple shells are fabricated, separately. Then, composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores were created by attaching the two parts together. The modal test is done on the shells and natural frequencies have been extracted. The comparison of experimental results and, numerical results obtained from Abaqus showed that there is a good agreement between them. By using Taguchi method, a parametric study was performed on the vibrational behavior of sandwich shells with lozenge cores via six parameters that such as stiffeners' pair number, stiffener thickness, unit cell number, skin thickness, layers sequence and boundary condition. The results show that the natural frequency has a most sensitive to the boundary condition, skin thickness and least sensitive to stiffener thickness, layers sequence. To evaluate the efficiency of a sandwich shell, the natural frequency of sandwich shell are compared with simple shell in the different boundary condition. The results show that the natural frequency of sandwich shell with lozenge core is 176% and 34% higher than an equivalent simple shell at free and clamp boundary condition, respectively.

1-مقدمه

کامپوزیتی استوانه‌ای از این دست سازه‌ها هستند. در سال‌های اخیر با توجه به نیاز روزافزون طراحی سازه‌هایی با استحکام و سفتی بالا و وزن پایین، تغییراتی در طراحی پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای ایجاد شده است و

در کاربردهای مختلف مهندسی مانند هوافضا، خودروسازی و زیردریایی، به سازه‌هایی با استحکام و سفتی بالا به همراه وزن پایین نیاز است. پوسته‌های

Please cite this article using:

Shahgholian-Ghahfarokhi, D. Rahimi, G. H. and Ghanadi, A., "Experimental and numerical free vibration analysis of composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 469-478, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

خلیلی و رحمانی [9] به بررسی تحلیلی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای ساندویچی با هسته انعطاف‌پذیر پرداختند و نشان دادند با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری برای هسته، می‌توان جایابی نسبی بین دو پوسته لبه‌ای را بدست آورد. آن‌ها همچنین یک مطالعه پارامتری روی اثر طول، شعاع و زاویه قطاع پوسته روی فرکانس طبیعی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند افزایش طول و شعاع پوسته فرکانس طبیعی را کاهش می‌دهد و اثر طول در این کاهش برجسته است. همچنین با افزایش زاویه قطاع تا زاویه 30 درجه، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد و بعد از آن به یک مقدار ثابت می‌رسد. کومار [10] به بررسی رفتار ارتعاشی پوسته‌های ساندویچی و چندلایه کامپوزیتی با استفاده از روش المان محدود پرداخت و اثر تغییرات شعاع پوسته بر فرکانس طبیعی را بررسی کرد. وی نشان داد اثر پذیری فرکانس طبیعی از افزایش شعاع در پوسته استوانه‌ای نازک بیشتر است و تا نسبت شعاعی مشخصی با افزایش شعاع فرکانس کم می‌شود اما در پوسته با ضخامت زیاد، افزایش شعاع اثر زیادی روی فرکانس طبیعی ندارد. فان و همکاران [7]، [11]، [12] به بررسی عددی و تجربی رفتار کمانشی و ارتعاشی پوسته ساندویچی استوانه‌ای مشبک پرداختند. آن‌ها با ساخت پوسته تقویت شده مشبک با استفاده از قالب فلزی و روش رشته پیچی پرداخته و با چسباندن پوسته چندلایه داخلی به پوسته تقویت شده، پوسته ساندویچی با هسته مشبک را ساختند. آن‌ها همچنین به مقایسه فرکانس اصلی این سازه ساندویچی با سازه تقویت شده هم‌وزن پرداختند و نشان دادند در بازه کاربردهای مهندسی، پوسته ساندویچی فرکانس اصلی بسیار بهتری دارد و می‌توان سازه‌های هوایی را به صورت سبک‌تر ساخت و فرکانس مورد نیاز را تأمین کرد. ایکسینگ [13] به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد و مشخصه‌های میرایی پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته خرابی هرمی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش المان محدود و مدل ریلی-ریتر فرکانس‌های طبیعی سازه را استخراج نمودند. لی و همکاران [14] پوسته ساندویچی با هسته مشبک موجدار را به روش پرس داغ ساخته و پوسته‌های داخلی و خارجی را به روش رشته پیچی ساختند. همچنین به بررسی تجربی رفتار کمانشی و ارتعاشی پرداختند و نشان دادند فرکانس طبیعی و بار بحرانی سازه ساندویچی نسبت به سازه تقویت شده افزایش می‌یابد و تقویت‌کننده‌های حلقوی در کنترل فرکانس اصلی سازه نقش اساسی ایفا می‌کند. همچنین جیانگ و همکاران [15] بررسی مشابهی را روی پوسته ساندویچی با شبکه عمودی انجام دادند. آن‌ها هسته مشبک را به روش اینترلاکینگ³ و پوسته‌های داخلی و خارجی را به روش رشته پیچی ساختند.

در این تحقیق به منظور دستیابی به فرکانس‌های طبیعی ارتعاشی که پارامتر اصلی در طراحی سازه بر مبنای سفتی می‌باشد، به بررسی تجربی و عددی ارتعاشات آزاد پوسته‌های ساندویچی استوانه‌ای با شبکه لوزی شکل، پرداخته خواهد شد. نمونه‌های پوسته تقویت شده با استفاده از قالب سیلیکونی و روش رشته پیچی ساخته می‌شود. با چسباندن پوسته چندلایه کامپوزیتی در داخل پوسته تقویت شده، پوسته ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده و تحت آنالیز و آزمایش مودال قرار می‌گیرد.

به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر تغییر برخی از پارامترهای هندسی سازه شامل شرایط مرزی مختلف، تعداد جفت ریب، تعداد سلول واحد، ضخامت ریب، ضخامت پوسته و زاویه الیاف در پوسته بر ارتعاشات پوسته ساندویچی استوانه‌ای مشبک بررسی خواهد شد. همچنین به جهت

ساخت پوسته‌های تقویت شده مشبک و پوسته‌های ساندویچی کامپوزیتی استوانه‌ای با هسته مشبک از جمله این تغییرات می‌باشد. ساختارهای مشبک از اتصال مجموعه‌ای از تقویت‌کننده‌ها به صورت پیوسته ایجاد می‌شود. در شکل 1 نمونه‌ای از پوسته تقویت شده مشبک و پوسته ساندویچی با هسته مشبک که از چسباندن یک پوسته چندلایه داخل پوسته تقویت شده مشبک ایجاد می‌شود، نشان داده شده است. رای طراحی سازه‌های مختلف تحلیل‌هایی نظیر تحلیل استاتیکی، دینامیکی، کمانشی، شکست و ارتعاشی انجام می‌شود. آنالیز ارتعاشات یکی از مهم‌ترین تحلیل‌های خرابی این سازه‌های جدار نازک می‌باشند. همچنین طراحی برخی از سازه‌ها بر مبنای آنالیز ارتعاشات آزاد بوده و سفتی سازه باید ابتدا شرط پایین‌ترین فرکانس را ارضا کند. تحقیقات مختلفی روی ارتعاشات آزاد سازه‌های کامپوزیتی مشبک انجام شده است. موستافا [1] و ژائو [2] به بررسی تحلیلی ارتعاشات آزاد پوسته‌های تقویت شده با تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی پرداختند. موستافا ابتدا ترم‌های انرژی مربوط به پوسته و تقویت‌کننده‌ها را به صورت جداگانه محاسبه نموده و این ترم‌ها را به منظور دستیابی به انرژی کل سازه با هم جمع کرد. در نهایت با استفاده از روش ریتر فرکانس‌های طبیعی را بدست آورد. لی [3]، [4] به بررسی تحلیلی رفتار ارتعاشی پوسته تقویت شده چرخان با تقویت‌کننده‌های متعام پرداخت و اثر نسبت ارتفاع به عرض تقویت‌کننده‌ها، نسبت ضخامت به شعاع پوسته، نسبت ارتفاع به شعاع پوسته و شرایط مرزی مختلف را روی فرکانس طبیعی بررسی نمود و نشان داد اثر سرعت دوران برای نسبت‌های طول به قطر و قطر به ضخامت بزرگ، بیشتر از نسبت‌های طول به قطر و قطر به ضخامت کوچک است. وی همچنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی فرکانس طبیعی این پوسته‌ها بدست آورد. کیم [5] به ساخت پوسته تقویت شده با روش رشته پیچی پرداخت و از قالب سیلیکونی برای ساخت تقویت‌کننده استفاده کرد. هیبرچت [6] با استفاده از روش هیبرید تولینگ¹ مساله کوبش و بهم فشردگی تقویت‌کننده را حل کرد. با توجه به محدودیت ضخامت تقویت‌کننده در این روش، وی برای سازه با ضخامت‌های بزرگ از روش اکسپنشن بلوک² استفاده کرد. به این صورت که بلوک‌هایی روی صفحه پایه نصب شده و بین این بلوک‌ها مسیر ایجاد تقویت‌کننده تشکیل می‌شود. این بلوک‌ها در فواصل خاصی نسبت به هم قرار می‌گیرند و الگوهای مختلف مشبک با ضخامت‌های مختلف ایجاد می‌شود. بوراگهیان [8] از فوم پلی‌اورتان به عنوان قالب ساخت تقویت‌کننده استفاده کرد. فوم پلی‌اورتان قابلیت ماشین‌کاری بسیار خوبی دارد و به عنوان راهکار فرم‌دهی ساده شده بسیار مناسب می‌باشد. برای این منظور ورق‌های فوم که خواص مکانیکی را در دمای بالا حفظ می‌کنند، روی یک شفت فولادی، انباشته شده و می‌چسبند، سپس از کاترهای دوار برای بریدن شیارهای جانبی و مارپیچی در ماده فوم استفاده می‌شود.

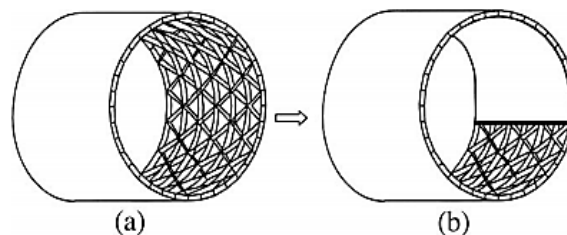


Fig. 1 (a)stiffened shell (b)sandwich shell with lattice core [7]

شکل 1 (a) پوسته‌ای تقویت شده (b) پوسته‌ی ساندویچی با هسته مشبک [7]

³Inter locking

¹ Hybrid tooling

² Expansion block

3- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

روش‌های مختلفی برای ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی وجود دارد. در گذشته برای ساخت تقویت‌کننده‌های مارپیچ از روش لایه‌چینی دستی استفاده می‌شد و تقویت‌کننده‌ها در اتوکلاو¹ مورد پخت قرار می‌گرفت، تا سازه شکل بگیرد. این روش قابلیت اتومات شدن را نداشته و هزینه ساخت را بالا می‌برد. در روش رشته‌پیچی، الیاف به‌طور پیوسته به رزین آغشته شده و به دور مندریل پیچیده می‌شود تا شکل سازه ایجاد شود. اتومات بودن فرآیند و به حداقل رسیدن نیاز به اتوکلاو، هزینه ساخت را پایین آورده و همچنین می‌توان الیاف را در جهت بار اعمالی پیچید تا نمونه‌ای با استحکام بالا ایجاد شود. در این تحقیق نیز برای ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی از روش رشته‌پیچی استفاده شده است. در روش رشته‌پیچی، قالب استفاده شده نقش مهمی در کیفیت ساخت سازه دارد. قالب‌ها می‌توانند به صوت فلزی، فومی، گچی، سیلیکونی و تفلونی ساخته شوند. قالب‌های فلزی از دقت بسیار بالایی برخوردارند، اما هزینه ساخت بالایی نیز دارند. بنابراین برای فعالیت‌های صنعتی مناسب می‌باشند. قالب‌های فومی و گچی نیز یکبار مصرف بوده و با جدا کردن نمونه از قالب، دچار تخریب می‌شوند. قالب تفلونی نیز برای ساخت سازه مشبک بدون پوسته مناسب می‌باشد. در این تحقیق از قالب سیلیکونی برای ساخت سازه مشبک استفاده شده است. همچنین از دستگاه پیچش الیاف برای ساخت تقویت‌کننده‌ها استفاده شده است. دستگاه پیچش الیاف دارای یک حرکت خطی و دورانی بوده که موجب قرار گرفتن الیاف داخل شیارهای قالب می‌شود و رزین نیز به‌صورت دستی به داخل شیار تزریق می‌شود. پس از سوار کردن قالب سیلیکونی روی لوله تفلونی، با استفاده از دستگاه پیچش الیاف، عملیات پیچش الیاف به‌منظور ایجاد شبکه تقویت‌کننده‌ها مطابق شکل 3 آغاز می‌شود و تا پر شدن شیارهای قالب ادامه می‌یابد. سپس مطابق شکل 4 به‌صورت دستی چند لایه پارچه دور قالب پیچیده شده و نمونه تقویت شده ایجاد می‌شود.

به جهت پخش شدن کامل رزین داخل نمونه و کامل شدن عملیات پخت، نمونه به مدت 24 ساعت مطابق شکل 5 روی دستگاه در حال دوران قرار می‌گیرد. با استفاده از قالب سیلیکونی و روش دستی، پوسته ساده نیز با پارچه ساخته شده و با چسباندن آن به پوسته تقویت شده، نمونه پوسته ساندویچی با هسته مشبک مطابق شکل 6 ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است از الیاف شیشه برای ساخت تقویت‌کننده استفاده شده و پارچه مورد استفاده، الیاف شیشه بافت شده 0 و 90 درجه می‌باشد. همچنین برای ساخت همه بخش‌های نمونه از رزین اپوکسی ML-506، با سخت‌کننده HA-11 و کسر حجمی 15% استفاده شده است. در جدول 1 ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده، آمده است.

4- آزمون تجربی

پس از ساخت نمونه‌ها به منظور استخراج فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی به روش تجربی، آزمایش آنالیز مودال روی نمونه‌ها صورت گرفت.

مراحل مختلف آزمایش مودال شامل آماده سازی سازه برای تست، تحریک سازه، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و پردازش داده‌ها می‌باشد [16]. به منظور آماده سازی سازه، 63 نقطه به صورت منظم، شامل 7 نقطه محیطی و 9 نقطه طولی بر روی سازه مشخص شده و مطابق شکل 7 سازه به کمک نوارهای نازک با سفتی پایین، معلق نگه داشته می‌شود تا شرایط تکیه گاهی

بررسی کارایی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل، به مقایسه فرکانس طبیعی این پوسته با پوسته ساده هم وزن پرداخته خواهد شد.

2-هندسه مسئله

سازه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه در این پژوهش شامل دو پوسته استوانه‌ای می‌باشد که در دو طرف آرایش سلولی از تقویت‌کننده‌ها قرار می‌گیرد و یک پوسته ساندویچی کامپوزیتی استوانه‌ای را ایجاد می‌کند. شکل 2 شماتیکی از پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل نشان داده شده است. مطابق شکل 2 پارامترهای هندسی سازه شامل t ضخامت پوسته داخلی و خارجی، t_s ضخامت تقویت‌کننده، w عرض تقویت‌کننده، r_i شعاع پوسته داخلی و r_o شعاع پوسته خارجی می‌باشد. سطح بالایی پوسته داخلی و سطح پایینی پوسته خارجی به‌عنوان سطوح مرجع پوسته‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین یک سیستم مختصات استوانه‌ای برای پوسته‌های داخلی و خارجی در مرکز پوسته ساندویچی قرار گرفته است. طول نمونه‌ها 300 میلی‌متر، قطر خارجی 16 میلی‌متر و عرض تقویت‌کننده‌ها 6 میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق اثر تغییرات 6 پارامتر در 5 سطح مختلف روی فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی بررسی شده است. این پارامترها شامل تعداد جفت تقویت‌کننده، تعداد سلول واحد، ضخامت تقویت‌کننده، ضخامت پوسته‌های داخلی و خارجی، شرایط مرزی و زاویه الیاف در پوسته‌های داخلی و خارجی با چپش متقارن می‌باشد. زاویه الیاف نسبت به راستای طولی پوسته تعریف شده است. برای بررسی اثر تغییرات این پارامترها نیاز به تعداد 5⁶ آزمایش می‌باشد. با توجه به تعداد بالای آزمایشات و هزینه بالای انجام همه آزمایشات، با استفاده از آرایه L25 مدل تاگوچی تعداد آزمایش‌ها به 25 عدد کاهش داده شده است.

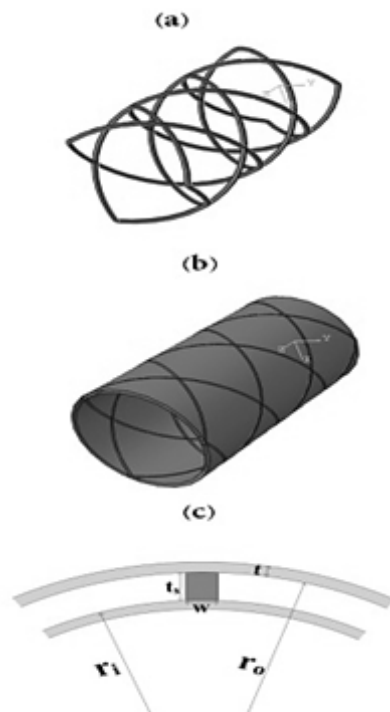


Fig. 2 (a) Lattice core (b) Sandwich shell with lozenge core (c) Geometry

شکل 2 شبکه تقویت‌کننده‌ها - پوسته ساندویچی با هسته لوزی شکل - مشخصات هندسی

¹ Autoclave

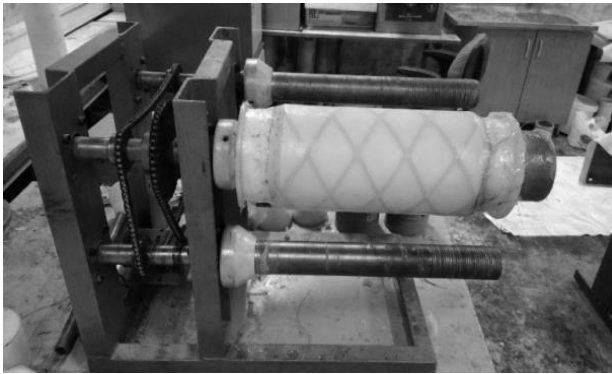


Fig. 5 Resin curing process

شکل 5 عملیات پخت رزین



Fig. 6 Composite sandwich shell with lozenge core

شکل 6 نمونه کامل پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل

جدول 1 ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده

Table 1 Geometric dimensions of specimens

شماره نمونه	تعداد جفت ریب	تعداد سلول واحد	ضخامت ریب (mm)	عرض ریب (mm)	ضخامت پوسته داخلی (mm)	ضخامت پوسته خارجی (mm)
1	3	2	6	6	0.8	1.2
2	3	2	6	6	0.8	1.3
3	3	3	5	5	0.8	1.5
4	3	3	5	5	0.8	1.3
5	4	4	4	4	1.3	1.5
6	4	4	4	4	1.1	1.6



Fig. 7 Modal test

شکل 7 نمای کلی از آزمایش مودال

آزاد-آزاد فراهم شود [17]. برای تحریک سازه‌ها در آزمایش مودال، وسایل مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که چکش و لرزشگرهای الکترودینامیکی¹ رایج‌ترین آن‌ها می‌باشند. باید به این نکته توجه داشت که در حین تست، جرم، سفتی و میرایی سازه تغییر نکند. در مورد سازه‌های سبک در صورت استفاده از لرزشگر، جرم سازه تغییر کرده و نتایج نامناسبی را به همراه خواهد داشت [18]. بنابراین در بررسی حاضر از چکش به عنوان وسیله تحریک استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری پاسخ‌ها در آنالیز مودال از ترانسیدوسر² استفاده می‌شود. اطلاعاتی که توسط وسایل اندازه‌گیری پاسخ و تحریک بدست می‌آیند، بوسیله دستگاه آنالایزر، ثبت و مورد پردازش قرار می‌گیرند. شکل 8 نمودار شتاب و نیروی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط نرم افزار اورجین³ تحلیل شده و مطابق شکل 9 نمودار FRF⁴ آن استخراج می‌گردد. فرکانسی که در آن مقدار تابع FRF با جهش مواجه شود، فرکانس طبیعی سازه می‌باشد.

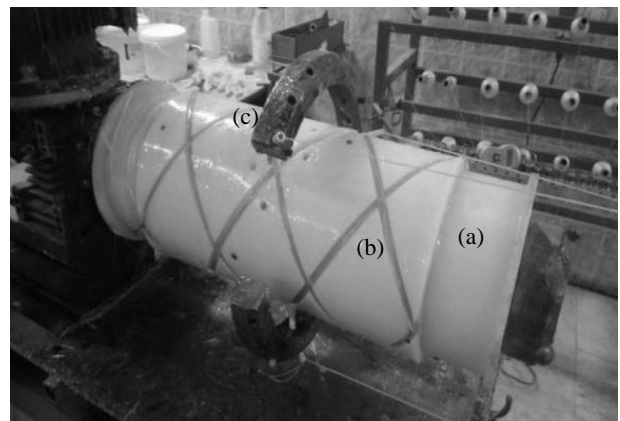


Fig. 3 Filament winding process (a) polyethylene mandrel (b) silicone mold (c) filament winding

شکل 3 عملیات پیچش الیاف تقویت‌کننده (a) لوله تفلونی (b) قالب سیلیکونی (c) پیچش الیاف

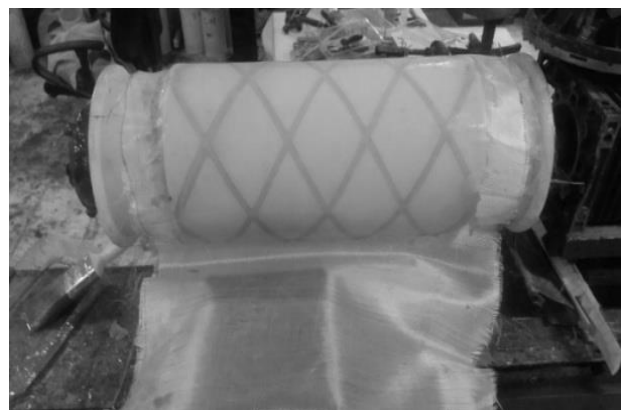


Fig. 4 Winding of outer shell process

شکل 4 عملیات پیچش پوسته خارجی

¹ Electro-dynamical shaker
² Transducer
³ Origin
⁴ Frequency response function

ساندویچی با هسته مشبک ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه در مدل واقعی از چسب با مدول الاستیسیته بالا استفاده می‌شود، می‌توان اینگونه فرض کرد که اجزای مختلف سازه (پوسته‌ها و هسته مشبک) در اتصال کامل نسبت به هم قرار داشته و هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سطوح وجود ندارد. بنابراین برای اتصال بین پوسته‌ها و هسته از قید تای³ استفاده شده است.

2-5- خواص مواد

خواص مکانیکی مواد به کمک آزمایش و روابط میکرو مکانیک بدست آمده است. با توجه به مشکل بودن برخی از آزمایشات خواص مکانیکی، و همچنین امکانات آزمایشگاهی موجود، مدول یانگ رزین و الیاف شیشه مورد استفاده برای تقویت‌کننده از تست کشش بدست آمده است. همچنین مدول یانگ در راستای الیاف پوسته کامپوزیتی مورد استفاده در ساخت پوسته داخلی و خارجی نمونه ساندویچی به کمک تست کشش، بدست آمده است. کسر حجمی پوسته داخلی و خارجی و کسر حجمی تقویت‌کننده نیز با سوزاندن بخشی از نمونه‌ها در کوره بدست آمده است. بقیه خواص مکانیکی به کمک روابط میکرومکانیک و مراجع مختلف بدست آمده است. در جدول 2 خواص مکانیکی پوسته و تقویت‌کننده آمده است.

3-5- المان بندی

برای مش‌بندی اجزای مختلف سازه از المان‌های آجری شکل استفاده شده است. برای پوسته‌های داخلی و خارجی سازه المان پوسته مرسوم⁴ استفاده شده است. به‌طور کلی برای اجزایی از سازه که بعد ضخامت از دو بعد دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر باشد، از المان پوسته استفاده می‌شود. المان‌های پوسته به دو نوع المان پوسته مرسوم و المان پوسته محیط پیوسته تقسیم می‌شوند. تفاوت اصلی این دو المان، تعداد درجات آزادی آن‌ها می‌باشد که با توجه به نوع مسئله و نوع تحلیل، یکی از این دو المان با دقت بالاتری نتایج را بدست می‌دهد. در آنالیز ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای می‌توان با دقت بسیار خوبی از المان پوسته مرسوم با مرتبه خطی، S4R استفاده کرد.

همچنین برای مش‌بندی تقویت‌کننده‌ها از المان‌های مکعبی کوادراتیک 20 نوده (C3D20R) استفاده شده است. جهت الیاف در ریب ماریچ در راستای ماریچ و عمود بر سطح مقطع تقویت‌کننده می‌باشد نوع تحلیل انتخابی نیز تحلیل فرکانسی خطی در abaqus/implicit می‌باشد.

در شکل 10 برای یک نمونه پوسته ساندویچی، تغییرات فرکانس طبیعی با افزایش تعداد المان بررسی شده است و تعداد المان بهینه بدست آمده است. تعداد المان 11604 به عنوان تعداد بهینه المان انتخاب شده است و ابعاد المان مربوط به تقویت‌کننده و پوسته‌ها در این مدل، برای مدل‌های دیگر استفاده شده است.

4-5- صحت سنجی شبیه سازی

به منظور بررسی صحت و دقت شبیه سازی، نمونه‌های ساخته شده، در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و فرکانس اصلی ارتعاشات آن‌ها استخراج شده است. این نتایج در جدول 3 با نتایج حاصل از آزمون آنالیز مودال مقایسه شده است. مطابق جدول 3 تفاوت نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی عددی بین 9-13% می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین نتایج تجربی و

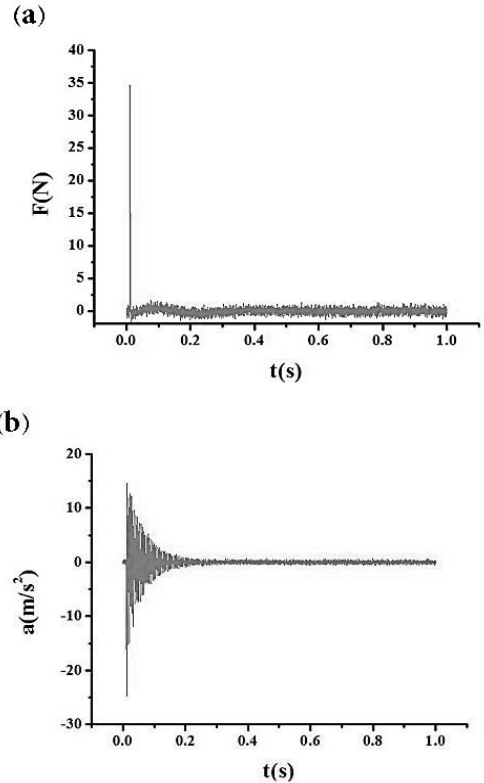


Fig. 8 (a) Force-Time graph (b) Acceleration-Time graph

شکل 8 (a) نمودار نیرو- زمان (b) نمودار شتاب- زمان

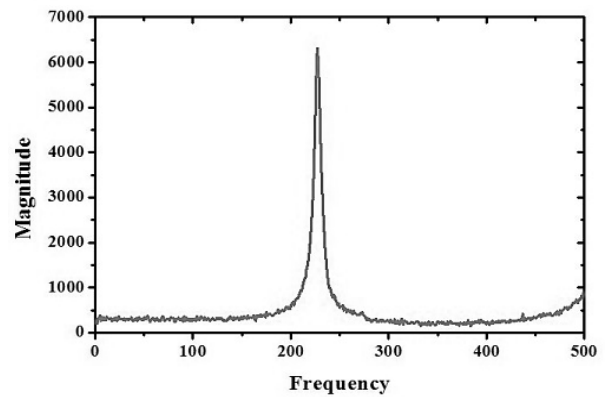


Fig. 9 Frequency response function graph

شکل 9 نمودار FRF استخراج شده از نرم افزار اوريجين

5- شبیه‌سازی المان محدود

به منظور کاهش هزینه و زمان در تحقیقات بر رفتار ارتعاشی پوسته ساندویچی با هسته مشبک، مدل المان محدود، در نرم افزار آباکوس 6-14 ایجاد شده است. که در ادامه مراحل مختلف آن به اختصار توضیح داده خواهد شد.

1-5- مدل سازی

تمامی بخش‌های مختلف هندسه پوسته ساندویچی در محیط پارت¹ نرم‌افزار آباکوس مدل شده و با ترکیب این بخش‌ها در محیط اسمبلی² پوسته

³ Tie
⁴ Conventional shell

¹ Part
² Assembly

جدول 2 خواص مکانیکی پوسته و تقویت کننده

Table 2 Mechanical properties of shell and stiffener

مشخصه	پوسته	تقویت کننده
چگالی (gr/cm)	1.468	1.351
مدول الاستیسته (GPa)	9.64	14.6
	9.64	3.21
	2.33	3.21
مدول برشی (GPa)	0.964	1.21
	1.12	1.46
ضریب پواسون	0.28	0.264
	0.087	0.127

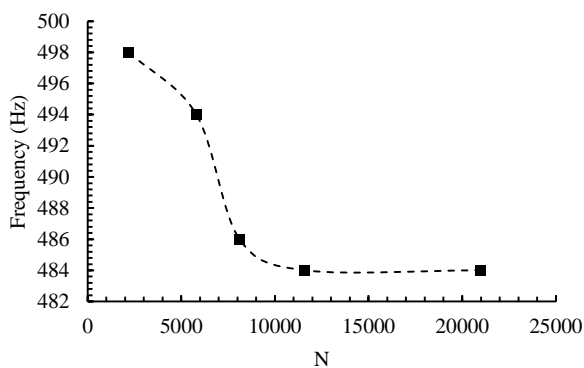


Fig. 10 Mesh convergence study

شکل 10 مطالعه‌ی همگرایی مش

جدول 3 مقایسه نتایج به دست آمده از المان محدود با آزمایش

Table 3 Comparison of the obtained results from FEM with Experiment

شماره نمونه	المان محدود (Hz)	آزمایش (Hz)	خطا (%)
1	194	224	13
2	196	227	13
3	234	266	12
4	231	258	10
5	212	234	9
6	223	248	10

جدول 4 پارامترهای مؤثر و سطوح در نظر گرفته شده پوسته ساندویچی

Table 4 Effective parameters and levels of the sandwich shell

پارامترها	1	2	3	4	5
چیدمان لایه‌ها	0-90	±30	±45	±60	60
ضخامت پوسته (mm)	0.2	0.48	0.8	1.2	2
ضخامت ریب (mm)	3	3.5	4	4.5	5
تعداد سلول واحد	2	4	6	8	10
تعداد جفت ریب	1	2	3	4	5
شرایط مرزی	آزاد-آزاد	آزاد-آزاد	آزاد-آزاد	ساده-ساده	گیردار-گیردار

عددی بوده و صحت شبیه‌سازی را تضمین می‌کند. همچنین مقادیر فرکانس بدست آمده از شبیه‌سازی، در تمام نمونه‌ها کمتر از فرکانس تجربی می‌باشد که نشان دهنده محافظه کار بودن مدل شبیه‌سازی شده است. بنابراین از این مدل شبیه‌سازی شده به منظور کاهش هزینه و زمان، در طراحی و تحقیقات مختلف روی رفتار ارتعاشی پوسته ساندویچی می‌توان بهره جست.

6- روش تاگوچی

مدل تاگوچی [19] یک روش طراحی آزمایش است که در دهه‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [20]. به کمک این روش می‌توان در مطالعات پارامتری با تعداد پارامتر و تعداد سطوح متغیر (منظور از سطح متغیر، یک مقدار مشخص و معین برای آن متغیر می‌باشد) مشخص و البته محدود، تعداد آزمایش‌ها را به صورت قابل توجهی کاهش داد. با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز، سطوح بهینه متغیر بدست می‌آید. همچنین با استفاده از آنالیز واریانس، پارامترهای مؤثر شناسایی و درصد اثرگذاری آن‌ها تعیین می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از روش تاگوچی به بررسی اثر تغییر 5 یا 6 پارامتر در 5 سطح بر فرکانس طبیعی سازه پرداخته شده است. برای این منظور از آرایه متعامد L25 استفاده شده است. در جدول 4 پارامترهای متغیر و سطوح مربوط به هر پارامتر برای پوسته ساندویچی نمایش داده شده است. ضخامت پوسته داخلی و خارجی یکسان در نظر گرفته شده است. شرط مرزی آزاد نیز به صورت $U_3=UR_3=0$ تعریف شده است.

در روش تاگوچی تغییرات، با عاملی به نام سیگنال به نویز (S/N) معرفی می‌شود و شرایطی که ماکزیمم مقدار سیگنال به نویز را بدهد، شرایط بهینه خواهد بود. معادله سیگنال به نویز به معیار مشخصه کیفیت بستگی دارد. با توجه به اینکه هر چه فرکانس طبیعی بزرگتر باشد، بهتر است و مطلوب ماکزیمم کردن تابع هدف است، از معادله سیگنال به نویز مربوط به معیار مشخصه کیفیت بزرگتر، بهتر، استفاده شده است [21]. این معادله در رابطه (1) آمده است.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1)، n تعداد تکرار آزمایشات است که در بررسی حاضر، 1 در نظر گرفته شده است. Y_i نیز مقادیر خروجی که همان فرکانس‌های طبیعی می‌باشند.

با استفاده از آنالیز واریانس می‌توان میزان اثرگذاری پارامترها را بررسی کرد. به کمک نرم افزار مینیتب، طبق روابط (2) تا (4) محاسبات مربوط به آنالیز واریانس انجام شده است. با توجه به روابط، مقادیر نسبت واریانس بدست آمده و پارامتر با نسبت واریانس بزرگتر اثرگذاری بیشتری دارد [22].

$$SS_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{N_{Ai}} \quad (2)$$

$$MS_i = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (3)$$

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_{error}} \quad (4)$$

در روابط (2) تا (4)، A_i مجموع مقادیر سیگنال به نویز برای فاکتور A در سطح i ، N_{Ai} تعداد مقادیر سیگنال به نویز فاکتور A در سطح i ، DF_i درجه آزادی پارامترها، SS مجموع مربعات تنظیم یافته، MS میانگین مربعات تنظیم یافته و F پارامتر نسبت واریانس می‌باشد.

7- نتایج و بحث

1-7- نتایج مدل تاگوچی

با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز در نرم افزار مینیتی تب 16، نمودار میانگین مقادیر سیگنال به نویز نسبت به سطوح پارامتر بدست می‌آید. از این نمودار سه مطلب قابل دستیابی می‌باشد:

- سطوحی که بیشترین مقدار سیگنال به نویز را دارند سطوح بهینه می‌باشد. به طوری که آزمایشی که در آن تمام پارامترها، سطح بهینه خود را داشته باشند، مطلوب‌ترین خروجی را نسبت به هر ترکیب پارامتر دیگری می‌دهد.
- نحوه اثرگذاری پارامترها را می‌توان با توجه به مثبت و منفی بودن شیب خطوط نمودار تعیین کرد. به طوری که اگر شیب خطوط در سرتاسر نمودار مثبت باشد، یعنی با افزایش مقدار پارامتر، خروجی به مقدار بهینه خود نزدیک می‌شود. اگر شیب خطوط در سرتاسر نمودار منفی باشد، یعنی با افزایش مقدار پارامتر، خروجی از مقدار بهینه خود دور می‌شود. اگر در بخشی از نمودار علامت شیب خطوط عوض شود، از نمودار فقط سطح بهینه استخراج شده و نمی‌توان یک برداشت کلی از نمودار کرد. چرا که در روش تاگوچی مزیت نسبی پارامترها نسبت به هم سنجیده می‌شود و اثر پارامترها به صورت مجزا مطرح نیست. بنابراین برای اظهار نظر قطعی نسبت به نحوه اثرگذاری پارامترهایی که نمودار آن‌ها با تغییر علامت شیب همراه است، نیاز به بررسی اثر تغییرات خروجی نسبت به تغییر پارامتر مورد نظر به صورت مجزا می‌باشد.

- براساس تندی شیب خطوط می‌توان شدت تأثیر هر پارامتر بر خروجی در مقایسه با دیگر پارامترها را بررسی کرد [23]. یعنی هر چه شیب خطوط نمودار برای یک پارامتر تندتر باشد، نشان‌دهنده تأثیر بیشتر این پارامتر بر خروجی می‌باشد که این مطلب در آنالیز واریانس به طور دقیق‌تر بررسی می‌شود.

با استفاده از آنالیز واریانس، ترتیب و درصد اثرگذاری پارامترها بدست می‌آید و در طراحی باید به پارامترهای با درصد اثرگذاری بالا توجه بیشتری شود. نتایج بدست آمده از آنالیز سیگنال به نویز برای پوسته ساندویچی با شبکه لوزی در شکل 11 آمده است. مطابق شکل 11 فقط درباره ضخامت پوسته می‌توان یک نتیجه‌گیری کلی ارائه کرد که با افزایش ضخامت پوسته فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده آن است که افزایش ضخامت پوسته سفتی سازه را بیشتر از وزن افزایش می‌دهد. شرط مرزی گیردار- گیردار سطح بهینه می‌باشد. یعنی با سخت‌تر شدن شرایط مرزی، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد که مطابق انتظار ماست. بهترین ترکیب سطوح که بیشترین فرکانس طبیعی را ایجاد می‌کند، ضخامت پوسته 2 میلی‌متر، 4 سلول واحد در طول پوسته، 4 جفت ریب، ضخامت ریب 5 میلی‌متر و لایه چینی 60 درجه می‌باشد.

شکل 12 نمودار درصد اثرگذاری پارامترها را نشان می‌دهد که از آنالیز واریانس بدست آمده است. با توجه به شکل 12 به ترتیب، پارامترهای شرط مرزی با 36%، ضخامت پوسته با 30% و تعداد سلول واحد با 20% بیشترین اثر و همچنین پارامترهای ضخامت ریب با 3%، چیدمان لایه‌ها با 4% و تعداد جفت ریب با 5% به ترتیب کمترین اثر را روی فرکانس طبیعی دارند. بنابراین شرط مرزی بیشترین اثر و ضخامت ریب کمترین اثر را روی فرکانس طبیعی دارند.

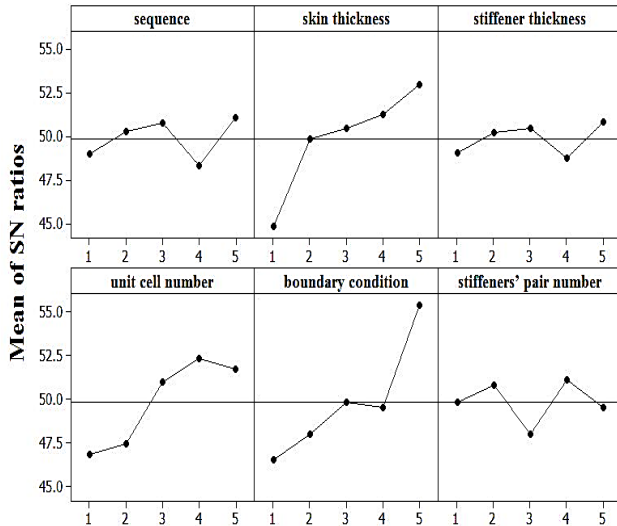


Fig. 11 S/N analysis of the composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores

شکل 11 مقادیر میانگین سیگنال به نویز پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل

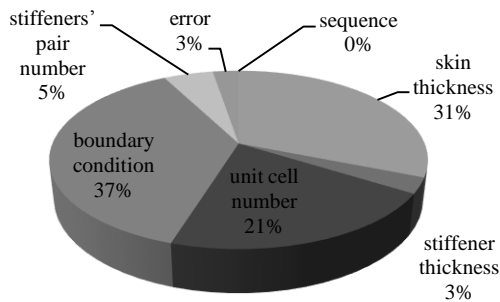


Fig. 12 Distribution of parameters of the composite sandwich cylindrical shells with lozenge cores

شکل 12 توزیع اثرگذاری پارامترهای پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی ساندویچی با هسته لوزی شکل

2-7- بررسی کارآمدی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی

به منظور تحقیق کارآمدی سازه ساندویچی با شبکه لوزی نسبت به پوسته ساده، یک مدل پوسته ساندویچی با مشخصات هندسی مطابق جدول 5 در شرایط مرزی مختلف با پوسته ساده هم وزن مقایسه شده است. مطابق جدول 6 در حالت شرط مرزی آزاد 176%، در حالت شرط مرزی گیردار 34% فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی نسبت به پوسته ساده هم‌وزن بالاتر است. بنابراین در مقایسه پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل و پوسته ساده، پوسته ساندویچی سازه بهینه می‌باشد. در شکل 13 شکل موده‌های ارتعاشی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل در دو حالت شرط مرزی آزاد و گیردار مشاهده می‌شود. مطابق شکل 13 در حالت شرط مرزی آزاد با توجه به اینکه درجات آزادی سازه بیشتر است، سازه تغییر فرم‌های بزرگتری پیدا کرده و اثرگذاری تقویت‌کننده‌ها در پوسته ساندویچی بیشتر می‌شود. لذا درصد افزایش فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی نسبت به پوسته ساده در حالت شرط مرزی آزاد بیشتر از شرط مرزی گیردار است.

شبهه سازی شده می‌باشد. به منظور مطالعه پارامتری و بهینه سازی مقدماتی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل در طراحی بر مبنای سفتی، از روش تاگوچی استفاده شد. 6 پارامتر در 5 سطح مختلف در نظر گرفته شد و با استفاده از آرایه L_{25} ، تعداد 25 شبیه‌سازی با ترکیب پارامترهای مختلف هندسی صورت گرفت. با استفاده از آنالیز سیگنال به نویز سطوح بهینه پارامترها شامل، ضخامت پوسته 2 میلی‌متر، 4 سلول واحد در طول پوسته، 4 جفت ریب، ضخامت ریب 5 میلی‌متر و لایه چینی 60 درجه و شرط مرزی گیردار بدست آمد. همچنین نشان داده شد که با افزایش ضخامت پوسته فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی افزایش می‌یابد. با استفاده از آنالیز واریانس ترتیب اثر گذاری پارامترها بدست آمد. به این صورت که، پارامترهای شرط مرزی با 36%، ضخامت پوسته با 30% و تعداد سلول واحد با 20% بیشترین اثر و همچنین پارامترهای ضخامت ریب با 3%، چیدمان لایه‌ها با 4% و تعداد جفت ریب با 5% به ترتیب کمترین اثر را روی فرکانس طبیعی دارند. به منظور بررسی کارایی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل، به مقایسه فرکانس اصلی این سازه با پوسته ساده هم‌وزن پرداخته شد و نشان داده شد که فرکانس اصلی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل در حالت شرط مرزی آزاد 176% و در حالت شرط مرزی گیردار 34% نسبت به پوسته ساده هم وزن افزایش دارد. و در مقایسه این دو پوسته، پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل، سازه بهینه می‌باشد.

9- مراجع

- [1] Mustafa, B. A. J. and Ali, R., "An Energy Method for Free Vibration Analysis of Stiffened Circular Cylindrical Shells," Composite Structure, Vol. 32, No. 2, pp. 355-363, 1989.
- [2] Zhao, X. Liew, K. M. and Ng, T. Y., "Vibrations of Rotating Cross-Ply Laminated Circular Cylindrical Shells With Stringer And Ring Stiffeners," International Journal of Solid Structure, Vol. 39, No. 2, pp. 529-545, 2002.
- [3] Lee, Y. S. and Kim, Y. W., "Vibration Analysis of Rotating Composite Cylindrical Shells With Orthogonal Stiffeners," Composite Structure, Vol. 69, No. 2, pp. 271-281, 1998.
- [4] Lee, Y. S. and Kim, Y. W., "Effect of Boundary Conditions on Natural Frequencies For Rotating Composite Cylindrical Shells With Orthogonal Stiffeners," Advances in Engineering Software Journal, Vol. 30, No. 9-11, pp. 649-655, 1999.
- [5] Kim, T. D., "Fabrication And Testing of Composite Isogrid Stiffened Cylinder," Composite Structure, Vol. 45, No. 1, pp. 1-6, 1999.
- [6] Huybrechts, S. M. Meink, T. E. Wegner, P. M. and Ganley, J. M., "Manufacturing Theory for Advanced Grid Stiffened Structures," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Journal, Vol. 33, No. 2, pp. 155-161, 2002.
- [7] Fan, H. Fang, D. Chen, L. Dai, Z. and Yang, W., "Manufacturing and Testing of a CFRP Sandwich Cylinder With Kagome Cores," Composite Science and Technology, Vol. 69, No. 15-16, pp. 2695-2700, 2009.
- [8] Buragohain, M. and Velmurugan, R., "Study of Filament Wound Grid-Stiffened Composite Cylindrical Structures," Composite Structure, Vol. 93, No. 2, pp. 1031-1038, 2011.
- [9] Rahmani, O. Khalili, S. M. R. and Malekzadeh, K., "Free Vibration Response of Composite Sandwich Cylindrical Shell With Flexible Core," Composite Structure, Vol. 92, No. 5, pp. 1269-1281, 2010.
- [10] Kumar, A. Chakrabarti, A. and Bhargava, P., "Vibration of Laminated Composites and Sandwich Shells Based on Higher Order Zigzag Theory," Engineering Structure Journal, Vol. 56, pp. 880-888, 2013.
- [11] Chen, L. Fan, H. Sun, F. Zhao, L. and Fang, D., "Improved Manufacturing Method and Mechanical Performances of Carbon Fiber Reinforced Lattice-Core Sandwich Cylinder," Thin-Walled Structure, Vol. 68, No. 1, pp. 75-84, 2013.
- [12] Zhang, H. Sun, F. Fan, H. Chen, H. Chen, L. and Fang, D., "Free Vibration Behaviors of Carbon Fiber Reinforced Lattice-Core

جدول 5 مشخصات هندسی پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل

Table 5 Geometrical parameters of composite sandwich shell and un-stiffened shell

نوع پوسته	تعداد جفت ریب	تعداد سلول واحد	ضخامت ریب	چیدمان	ضخامت پوسته
پوسته‌ی ساندویچی با هسته لوزی شکل	2	2	3	60	0.2
پوسته ساده	-	-	-	60	0.622

جدول 6 مقایسه فرکانس طبیعی پوسته ساندویچی با پوسته ساده معادل

Table 6 Comparison of the natural frequency of sandwich shells with un-stiffened shells

شرط مرزی	پوسته ساندویچی با شبکه لوزی	پوسته ساده معادل	درصد افزایش فرکانس
آزاد	132.4	47.9	176%
گیردار	564.9	421.02	34%

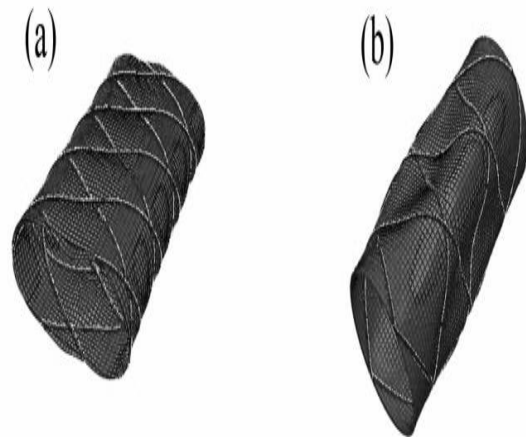


Fig. 13 Comparison of boundary condition (a) Free-Free (b) Clamp-Clamp

شکل 13 مقایسه شرایط مرزی (a) شرط مرزی آزاد-آزاد (b) شرط مرزی گیردار-گیردار

8- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل به صورت تجربی و عددی پرداخته شد. ابتدا به کمک قالب سیلیکونی و دستگاه پیچش الیاف، ساخت شبکه تقویت‌کننده‌ها با روش رشته پیچی صورت گرفت. سپس با پیچش چندلایه پارچه به‌صورت دستی روی شبکه تقویت‌کننده‌ها پوسته تقویت شده ایجاد شد. سپس با استفاده از قالب سیلیکونی و پارچه پیچی دستی، پوسته ساده ساخته شد و با چسباندن آن به پوسته تقویت شده نمونه کامل پوسته ساندویچی با شبکه لوزی شکل ایجاد شد. نمونه‌های ساخته شده تحت آنالیز و آزمایش مودال با تحریک چکش قرار گرفتند و فرکانس اصلی ارتعاشات آن‌ها استخراج شد. به منظور کاهش هزینه و زمان در طراحی و تحقیقات مختلف روی رفتار ارتعاشی پوسته ساندویچی، شبیه‌سازی ارتعاشات آزاد این سازه‌ها در نرم افزار آباکوس انجام گرفت و با نتایج بدست آمده از آزمایش مودال مقایسه شد. بیشترین خطا بین نتایج تجربی و عددی 13% می‌باشد، که نشان‌دهنده صحت و دقت مدل

- Sandwich Cylinder,” *Composite Science and Technology*, Vol. 100, No.1, pp. 26–33, 2014.
- [13] Xiong, J. Ghosh, R. Ma, L. Vaziri, A. Wang, Y. and Wu, L., “Sandwich-Walled Cylindrical Shells With Lightweight Metallic Lattice Truss Cores and Carbon Fiber-Reinforced Composite Face Sheets,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Journal*, Vol. 56, pp. 226–238, 2014.
- [14] Li, W. Sun, F. Wang, P. Fan, H. and Fang, D., “A Novel Carbon Fiber Reinforced Lattice Truss Sandwich Cylinder: Fabrication and Experiments,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Journal*, Vol. 81, pp. 313–322, 2016.
- [15] Jiang, S. Sun, F. Fan, H. and Fang, D., “Fabrication and Testing of Composite Orthogrid Sandwich Cylinder,” *Composite Science and Technology*, Vol 1, No. 1, pp. 1-10, 2017.
- [16] Ewins, D., “*Modal Testing: Theory, Practice, and Application*”. Research Studies Press, 2000.
- [17] He, J. and Fu, Z. F., “*Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann.” Oxford, 2001.
- [18] Peres, M. A. and Bono, R. W. “*Modal Testing and Shaker Excitation: Setup Considerations and Guidelines*,” SAE Technical Paper, 2011.
- [19] Ross, P. J. P. J., *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. 1996.
- [20] Choi, J. Ko, G. and Kang, K., “Taguchi Method-Based Sensitivity Study of Design Parameters Representing Specific Strength of Wire-Woven Bulk Kagome Under Compression,” *Composite Structure.*, Vol. 92, No. 10, pp. 2547–2553, 2010.
- [21] Kolanu, N. R. Prakash, S. S. and Ramji, M., “Experimental Study on Compressive Behavior of {GFRP} Stiffened Panels Using Digital Image Correlation,” *Ocean Engineering*, Vol. 114, No. 1, pp. 290–302, 2016.
- [22] Montgomery, D. C., “*Design and analysis of experiments*”. John Wiley & Sons, 2008.
- [23] Nikravan, A. R. and Kolahan, F., “Ti-6Al-4V Statistical Analysis And Optimization of Process Parameters for Cutting Rate and Surface Roughness in Wire Cut Machining Of Ti-6Al-4V Alloy,” *Engineering Journal*, Vol. 15, No. 9, pp. 141–152, 2015.

