جلد 6، شماره 1، بهار 98، ص‌ص 9- 20

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیت**

http://jstc.iust.ac.ir

تحلیل عددی و تجربی ارتعاشات پوسته استوانه‌ای FML تقویت شده تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد

علی نظری[1]، علی اصغر نادری[2]، کرامت ملک‌زاده فرد[3]*، احمد حاتمی[4]

1- دانشجوی دکتری، هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه امام علی، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه مالک اشتر،مجتمع هوافضا، تهران

4- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 13445768، kmalekzadeh@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/11/8

پذیرش: 96/12/17

کلیدواژگان:

ارتعاشات

چند لایه فلز و کامپوزیت

تحلیل تجربی

فرکانس طبیعی

پوسته تقویت‌شده

چکیده

در یک سازه در عمر کاری خود به ندرت تنها تحت اثر بار استاتیکی قرار می‌گیرد و معمولاً ماهیت بارگذاری بر روی سازه‌ها دینامیکی است. پوسته‌های کامپوزیتی تحت بارهای دینامیکی دچار تغییر شکل‌های بزرگ می‌گردند که این امر منجر به کاهش محسوس استحکام این پوسته‌ها می‌گردد. یکی از راه‌های غلبه بر این ضعف پوسته‌های کامپوزیتی استفاده از پوسته‌های کامپوزیتی فلز و الیاف می‌باشد که به اختصار به آنها FML گفته می‌شود. همچنین بارهای دینامیکی منجر به ایجاد ارتعاشات در سازه‌ها می‌گردند. لذا تعیین خصوصیّات ارتعاشی پوسته‌های FML ، به منظور فهم کاربردهای صنعتی آنها بسیار مهم است. در این مقاله ابتدا به نحوه ساخت پوسته‌های FML تقویت شده اشاره می‌شود سپس سه نمونه پوسته ساخته شده تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد و به روش تجربی مورد تحلیل ارتعاشی قرار گرفته و فرکانس‌های آنها استخراج می‌گردند. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل‌های تجربی با نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار المان محدودی آباکوس مقایسه گردیده تا میزان همپوشانی نتایج عددی و تجربی تعیین گردند. همچنین به منظور تحلیل شرایط مختلف، رفتار ارتعاشی یک پوسته FML با یک پوسته تمام کامپوزیتی از جنس شیشه اپوکسی مقایسه گردیده است. علاوه بر این تاثیر وجود و عدم وجود تقویت‌کننده‌ها بر پاسخ ارتعاشی پوسته‌های FML نیز مورد بررسی قرار گرفته است. وجود تحلیل‌های تجربی برای ارتعاشات پوسته‌های FML تقویت شده که برای اولین بار در این پژوهش ارائه گردیده است یکی از مهمترین نوآوری‌های مقاله حاضر می‌باشد که می‌توان از این نتایج تجربی به عنوان معیاری مناسب جهت تعیین دقت روش‌های عددی و تحلیلی استفاده نمود.

Experimental and numerical analysis of vibration of FML- stiffened circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition

Ali Nazari [1], Aliasghar Naderi [2], Keramat Malekzadefard[*] [3], Ahmad Hatami[4]

1- Department of Aerospace Engineering, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, University of emamali, Tehran, Iran
3- Department of Aerospace Engineering, University of malekashtar, Tehran, Iran
4- Department of Aerospace Engineering, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran
* P.O.B. 13445768. Tehran, Iran, kmalekzadeh@mut.ac.ir

Keywords

Vibration
Fiber metal laminate
Experimental analysis
Nnatural frequency
Stiffened shell

Abstract

Most of composite cylindrical shells always are used under dynamic loads not static loads in working cycle of them and Application of dynamic loads cause to large deformation and strength reduction. One way to reduce this negative characteristic is to make the fiber metal laminated shells that named FML in abbreviation. Also dynamic loads cause to vibration in structure. In the present study, firstly the fabrication of stiffened-FML cylindrical shell is explained. Then the vibration behavior and natural frequencies of three samples of FML-stiffened cylindrical shells are derived under clamp-free boundary condition. Moreover the vibration behaviors of these shells are investigated using abaqus finite element software and the FEM results are compared with experimental results in order to shows in agreement with each other. Also the effects of various parameters are studied in this article. For this purpose the frequency response of stiffened and unstiffened FML shells are compared with together and the vibration behavior of FML-shell are compared with glass/epoxy composite shell. One of the most innovations of this study is the experimental results that can be used as a benchmark for further study.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های چندلایه فلز و الیاف که به اختصار FML نامیده می‌شوند نوعی از مواد کامپوزیت لایه‌ای هستند که شامل لایه‌های فلزی نازک می‌باشند که با لایه‌های نازک پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه، کربن یا کولار به هم چسبانده شده‌اند. از لایه‌چینی به منظور دستیابی به یک ماده مفیدتر استفاده می‌گردد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Nazari, A. Naderi, A.A. Malekzadefard, K. and Hatami, A., "Experimental and numerical analysis of vibration of FML- stiffened circular cylindrical shell under clamp-free boundary condition", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 1, pp. 9-20, 2019.

لایه‌چینی مناسب منجر به افزایش استحکام و سفتی می‌گردد، همچنین مقاومت به خوردگی و سایش را بهبود می‌دهد.

کاهش وزن و تحمل آسیب بهتر FMLها نسبت به کامپوزیت‌های معمولی اولین عواملی هستند که باعث توسعه به کارگیری این مواد در صنایع هوافضایی گردیده‌اند. در سال 1982، اولین FML محصول شرکت ALCOA تحت عنوان آرال در یک سازه پرنده به کار برده شد. سپس در سال 1987، یک اختراع تحت عنوان Glare به نام شرکت AKZO ثبت شد اما به صورت جدی تکنولوژی تولید کامپوزیت‌های FML برای اولین بار در دانشکده هوافضای دانشگاه دلفت در کشور هلند توسعه پیدا کرد. درسال 1988 نوع جدیدی از آرال در دانشگاه دلفت ایجاد گردید که در دماهای بالا که در سازه‌های فضایی و سرعت‌های مافوق صوت روی می‌دهد مقاومت قابل قبولی داشتند. همچنین معمولا بخش مهمی از سازه‌های مختلف از پوسته‌ها تشکیل می‌شوند. پوسته-های مشبک FML از سازه‌های نوین هستند که به دلیل دارا بودن فوایدی مانند استحکام ویژه بالا، سبکی، مقاومت به خوردگی و ... کاربرد روزافزونی در صنایع مختلف به خصوص صنایع هوافضایی از جمله صنایع موشکی، ماهواره-برها و بدنه هواپیماها پیدا نموده‌اند.

یک سازه در عمر کاری خود به ندرت تنها تحت اثر بار استاتیکی قرار می‌گیرد و معمولاً ماهیت بارگذاری بر روی سازه‌ها دینامیکی است. وقتی یک سازه در یکی از فرکانس‌های طبیعی خود به طور تکراری تحریک شود، در این صورت میزان انرژی دریافتی حداقل شده و دامنه به شدت افزایش می‌یابد و پدیده‌ای به نام تشدید رخ می‌دهد که این امر باعث ایجاد حداکثر جابجایی در سازه در حال نوسان می‌گردد که منجر به تخریب ، تغییر شکل پلاستیک، پیدایش رفتار غیرخطی و یا بروز خستگی در سازه خواهد شد. به همین دلایل در همه سازه‌ها از تحریک هر یک از فرکانس‌های طبیعی اجتناب می‌شود. دانش خصوصیّات ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی، هم برای درک عمومی مبانی رفتار این پوسته‌ها و هم به منظور فهم کاربردهای صنعتی آنها بسیار مهم است. در ارتباط با مفهوم کاربرد صنعتی، بایستی فرکانس‌های طبیعی پوسته بمنظور جلوگیری از پدیده تشدید شناخته شوند. اهمیت پیشگویی دقیق خواص ارتعاشی بخاطر صرفه‌جویی در وزن، بطور فزاینده‌ای در طراحی سازه‌های هوافضایی کامپوزیتی رو به رشد است. پوسته‌های FML، قابلیّت خوبی جهت استفاده در سازه موشک‌ها و فضاپیماها دارند. اسکلت سازه‌های هوایی، بدنه هواپیماها، بالک موشک‌ها، لبه حمله هواپیمای ایرباس، درب قسمت حمل بار هواپیمای C-17، بدنه فوقانی و بال تحتانی هواپیمای ایرباس A380، پانل‌های پوسته‌ای، چمدان‌ها و محفظه‌های مقاوم در برابر انفجار و سپرهای محافظ ایستگاه‌های فضایی از نمونه‌های عملی کاربرد پوسته‌های FMLها هستند.

در دهه‌های گذشته تحقیقات زیادی در مورد تحلیل ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای انجام گرفته است که در ادامه به برخی از مقالات قابل توجه در این زمینه اشاره گردیده است. روسن و سینگر [1]، ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده را که تحت بار محوری قرار داشتند مورد بررسی قرار دادند. لام و لوی [2]، تاثیر شرایط مرزی مختلف و جهت‌گیری فیبرهای تقویت‌کننده را بر فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای چند لایه ارتوتروپیک مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند با تعیین جهت‌گیری مناسب فیبرهای تقویت‌کننده تغییرات زیادی در فرکانس‌های طبیعی ایجاد می‌گردد.

جعفری و باقری[3]، به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای ایزوتروپیک با تقویت‌کننده‌های محیطی پرداختند و نتایج حاصل از سه روش عددی، تحلیلی و تجربی را با هم مقایسه نمودند. آنها در حل تحلیلی از روش ریتز، برای حل مساله استفاده نمودند و اثر تقویت‌کننده‌های محیطی را به صورت المان‌های جداگانه وارد معادلات نموده و از نرم‌افزار انسیس برای حل مساله به روش عددی استفاده کردند. پراستی [4]، پاسخ کمانش و ارتعاشات آزاد پانل کامپوزیتی تقویت‌شده با تقویت‌کننده‌های کلاهی شکل را تحت انواع مختلف بارها مورد بررسی قرار داد. او با به دست آوردن توابع انتقال لازم، تقویت‌کننده‌های دارای خمیدگی را نیز مدل نمود و با ارائه فرمولاسیونی توانست شکل‌های مختلف تقویت‌کننده‌ها را در ماتریس سختی مدلسازی نماید و دو نوع تقویت‌کننده T شکل و کلاهی شکل را مورد بررسی قرار دهد. نتایج تحلیل‌های ارتعاشات و کمانش او نشان داد که تقویت‌کننده‌های با مقطع بسته، سختی پیچشی بیشتری ایجاد می‌کنند و کارایی بهتری از تقویت‌کننده‌های با مقطع باز دارند. یاواوکو و همکارانش [5]، کمانش و ارتعاشات ورق‌های چند لایه کامپوزیتی با انواع فاصله‌گذاری فیبرهای تقویتی را با روش المان محدود بررسی نمودند. آنها ثابت کردند که استفاده از فیبرهای بیشتر در محدوده مرکز ورق می‌تواند به طور موثری بار کمانش و فرکانس طبیعی ورق را افزایش دهد.

ترکمانی و همکارانش[6]، به روش عددی و تجربی ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای تقویت شده را مورد بررسی قرار دادند و نتایج به دست آمده را با استفاده از قوانین مربوطه برای پوسته مقیاس شده محاسبه نمودند. آنها در تحقیق خود از روش دانل و اصل کار مجازی استفاده نمودند.

کاویانی و میردامادی [7]، به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته‌های چند لایه کامپوزیتی پرداختند و با ارائه تئوری چهار متغیره توانستند شرایط تنش برشی صفر را بر روی لایه‌ها مدلسازی نمایند. آنها تاثیر پارامترهایی مانند نسبت مدول الاستیسیته، نسبت طول به ضخامت و سایر پارامترهای هندسی را بر رفتار ارتعاشی پوسته‌ها بررسی نمودند.

آکسویلار و همکاران [8]، آنالیز گذرای غیرخطی ورق‌های FML و FGM را تحت بارهای ضربه‌ای به روش‌های FE و تجربی بررسی کردند. آنها رفتار گذرای غیرخطی ورق کامپوزیتی FML را با استفاده از روشهای عددی و تجربی بررسی نموده و در حالت تجربی، سه ورق با ضرایب منظری مختلف را تحت تست ضربه قرار دادند و پاسخهای حاصل شده را با پاسخ‌های روش المان محدود ترکیبی و نرم‌افزار انسیس مقایسه نمودند. خلیلی و همکارانش [9]، با در نظر گرفتن اثرات شکل سطح مقطع، تئوری‌های مرتبه بالای موجود را ارتقاء دادند و به بررسی ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای FML پرداختند.

اخیرا نیز تحلیل‌های جامعی در مورد ارتعاشات پوسته‌های کامپوزیتی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مقاله یگانو و همکاران [10]، اشاره نمود. آنها آنالیز ارتعاشات پوسته‌های ترکیبی استوانه‌ای و مخروطی تقویت شده با رینگ و استرینگر را با استفاده از یک روش تغییر متغیر بهبود-یافته مورد بررسی قرار دادند و تئوری پوسته نازک رایزنر را با تئوری تقویت-کننده‌های المان‌های مجزا ترکیب نموده تا تاثیر تقویت‌کننده‌های رینگی را مورد بررسی قرار دهند.

لانگ شن ژائو و همکاران [11]، با استفاده از تئوری لیروایز فرکانس‌های طبیعی و رفتار ارتعاشی ورق‌های چند لایه کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصله را با نتایج تحلیل تجربی مقایسه نمودند و با ترکیب روش‌های تحلیلی و تجربی به پیش‌بینی رفتار ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های چند لایه پرداختند. ملک‌زاده و همکارانش[12]، به بررسی ارتعاشات آزاد و خمش استاتیکی ورق‌های کامپوزیتی انحنادار پرداختند. آنها معادلات تعادل را با استفاده از اصل همیلتون استخراج نموده و اثرات پارامترهای هندسی را بر رفتار ارتعاشی این ورقها بررسی نمودند.

حسن کورک و همکارانش[13]، فرکانس‌های طبیعی و ضرایب دمپینگ مودال پوسته‌های استوانه‌ای را محاسبه نمودند و با استفاده از روش‌های تحلیلی

منابع مکانیزم دمپینگ سازه را مشخص نمودند. شکوری و همکارانش [14]، به بررسی تجربی و عددی پوسته‌های مخروطی ایزوتروپ متصل به هم پرداختند. آنها به این منظور از اصل همیلتون و تئوری دانل استفاده نمودند و تاثیر زاویه راس مخروط و طول پوسته را بر فرکانس‌های طبیعی و تعداد موج‌های محیطی مورد بررسی قرار دادند. همت‌نژاد و همکارانش[15]، خصوصیات ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده را به روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی بررسی نمودند. نمونه‌های مورد بررسی توسط آنها از جنس فیبرهای شیشه بود. آنها فرمولاسیون مساله را بر اساس تئوری ساندرز ارائه و نتایج تجربی،عددی و تحلیلی را با یکدیگر مقایسه نمودند تا دقت نتایج تئوری را تعیین نمایند. رحیمی و همکارانش[16]، یک روش تحلیلی جهت بررسی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت شرایط مرزی مختلف ارائه نمودند. آنها فرمول‌های تئوری خود را بر پایه تئوری ساندرز ارائه و یک مدل سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و نتایج آنالیزهای تحلیلی و عددی را با یکدیگر مقایسه نمودند. بیساگنی[17]، به بررسی تجربی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت بارهای محوری دینامیکی و استاتیکی پرداخت و کمانش و ارتعاشات این پوسته‌ها را به صورت تجربی بررسی نمود. یانگ و همکارانش[18]، جهت بررسی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای ساندویچی موج‌دار، آنالیز مودال تحت شرایط مرزی دو سر آزاد انجام دادند و جهت پیش-بینی دمپینگ سازه از روش انرژی کرنشی به همراه مدل المان محدود استفاده نمودند. جمشیدی و همکارانش[19]، ارتعاشات آزاد تیر کمانه‌شده را به کمک روش کوادراتور دیفرانسیلی و تحلیل مودال تجربی بررسی نمودند. آنها ابتدا معادلات حاکم بر مسئله ارتعاشات تیر کمانه‌شده در مختصات مماسی را بدست آوردند و به منظور حل دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی استاتیکی معادلات را با روش کوادراتور دیفرانسیلی، گسسته نموده و سپس دستگاه معادلات جبری غیرخطی را با استفاده از روش طول قوس حل نمودند. آنها نتایج تجربی را با آزمایش مودال بر روی تیر کمانه‌شده ساخته شده از پی وی سی به دست آوردند.

احسانی و همکارانش[20]، به مقایسه رفتار کمانشی و ارتعاشی صفحات ساخته شده از سازه‌های مشبک کامپوزیتی پرداختند و به این منظور چهار صفحه با وزن یکسان و هندسه‌ی مشابه را با استفاده از چهار ساختار شناخته شده سازه‌های مشبک طراحی نمودند. سپس با استفاده از روابط سازه‌های مشبک، ماتریس سفتی خمشی که پارامتر تعیین کننده‌ای در رفتار کمانشی و ارتعاشی صفحات متقارن است را بدست آوردند. آنها با استفاده از روش ریلی- ریتز، بارهای کمانشی تک محوری، برشی و همچنین فرکانس‌های ارتعاشات آزاد را محاسبه نمودند و جهت بررسی تأثیر جهت‌گیری تقویت کننده‌ها، در هر صفحه راستای تقویت‌کننده‌ها را تغییر داده و به این ترتیب راستای جهت‌گیری بهینه هر ساختار مشبک را معین نمودند. در نهایت رفتار سازه‌های فوق، با یک صفحه چندلایه‌ی کامپوزیتی هم وزن نیز مقایسه شد. نتایج عددی بدست آمده نشان داد در وزن یکسان، تغییر همزمان نوع شبکه و زاویه‌ی جهت‌گیری، تأثیر بسزائی در سفتی خمشی و در نتیجه رفتار کمانشی و ارتعاشی صفحات مشبک خواهد داشت.

حسیسن کردخیلی و همکارانش [21]، خواص ارتعاشی-میرایی یک ماده‌ی ویسکوالاستیک از یک پوشش جاذب ارتعاشی ناشناخته را استخراج نمودند. آنها با ساخت یک پوشش جاذب ارتعاشی و انجام تست مودال تجربی به صورت یک سر درگیر، خروجی‌های مورد نظر شامل تغییرات ضریب کاهش و مدول برشی ماده‌ی ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس را به دست آوردند. نظری و همکارانش [22]، به تحلیل ارتعاشی پوسته استوانه‌ای FML بهینه شده بر اساس معیار ماکزیمم فرکانس طبیعی تحت شرایط مرزی مختلف پرداختند. آنها به این منظور ترتیب چینش لایه‌های فلز و کامپوزیت نسبت به یکدیگر و همچنین زوایای قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی پوسته استوانه‌ای FML را مرتبا تغییر داده و برای هر حالت فرکانس طبیعی پوسته را استخراج نموده و در نهایت ساختاری از پوسته که منجر به بیشترین فرکانس طبیعی می‌گردید را به عنوان ساختار بهینه پوسته هیبریدی تعیین نمودند و ساختارهای طراحی شده را مورد تحلیل ارتعاشی قرار دادند. سلیمی و همکارانش [23]، به تحلیل ارتعاشات آزاد پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت‌شده با ریب محیطی به روش تحلیلی و المان محدود پرداختند. آنها به این منظور ابتدا معادلات تعادل را بر مبنای تئوری کلاسیک ارائه داده و سپس ماتریس سختی، جرم و معادله فرکانسی سازه را استخراج نمودند و در ادامه با استفاده از روش عددی گالرکین معادلات مربوطه را حل نمودند. آنها تحلیل استوانه تقویت‌شده کامپوزیتی تحت دو حالت شرایط مرزی یک‌سر گیردار و دوسرگیردار انجام داده و نتایج تحلیلی و عددی را با یکدیگر مقایسه نمودند. بیسوال[24]، یک بررسی عددی و تجربی بر روی رفتار ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی چند لایه شیشه/اپوکسی تحت بارهای حرارتی ارائه نمود. او پوسته‌های استوانه‌ای دو انحنائی را بر پایه تئوری برشی مرتبه اول مدل نموده و نشان داد با افزایش دما میزان فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند. ترابی و همکارانش [25]، به بررسی تجربی و تحلیلی ارتعاشات عرضی میله‌های کامپوزیتی با لایه‌چینی متعامد پرداختند. آنها در تحلیل خود تاثیرات ابعاد جدایش، طول جدایش و ضخامت جدایش را بر خصوصیات ارتعاشی میله‌ها بررسی نمودند و تمامی نتایج را برای دو شرایط مرزی گیردار-گیردار و گیردار-آزاد به دست آوردند. هیروانی و همکارانش [26]، به آنالیز عددی و تجربی ارتعاشات آزاد پانلهای انحنادار پرداختند. آنها در این تحقیق تاثیر جدایش بین لایه‌ها را بر روی رفتار ارتعاشی پانل‌های انحنادار کامپوزیتی چند لایه با هندسه مختلف از جمله هندسه استوانه‌ای، مخروطی و بیضوی بررسی نمودند و سازه‌های چند لایه را با در نظر گرفتن جدایش بین لایه‌ها به وسیله دو مدل مختلف تئوری برشی مرتبه بالا مدل نموده و معادلات تعادل را به وسیله اصل همیلتون تعیین و جدایش بین لایه‌ها را نیز با استفاده از روش المان محدود مدلسازی کردند.

مارجانویچ و همکارانش[27]، به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته‌های کامپوزیتی چند لایه بر پایه مدل جابجایی ناپیوسته لیروایز پرداختند. آنها در تحقیق خود یک مدل کامپیوتری جهت آنالیز ارتعاشات ورق‌های کامپوزیتی چند لایه ارائه نمودند که جدایش بین لایه‌ای نیز در آن در نظر گرفته شد. آنها در تحلیل خود از تئوری ردی و برای مدلسازی ناپیوستگی در میدان جابجایی از توابع هویساید استفاده نمودند و تاثیر ابعاد جدایش بر روی فرکانس‌های پایه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. هلوتی [28]، به بررسی تاثیر شکل-های مختلف تقویت‌کننده‌ها، تعداد لایه‌ها و شرایط مرزی مختلف بر روی پاسخ ارتعاشی و شکل مودهای ورق کامپوزیتی چند لایه تقویت شده پرداخت و نتایج حاصله را با نتایج عددی مقایسه نمود.

اسلامی و همکارانش [29]، رفتار خمشی پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و با هدف دستیابی به بیشترین سختی ممکن برای این پوسته‌ها تعداد بهینه تقویت‌کننده‌ها را مشخص نمودند. آنها برای ساخت پوسته‌های کامپوزیتی از رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه استفاده نموده و با به کارگیری روش لایه‌گذاری دستی پوسته‌های کامپوزیتی را ایجاد نمودند. نظام اسلامی و همکارانش [30]، با استفاده از تئوری پوسته‌های نازک ساندرز به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده پرداختند و از روش معادل‌سازی سفتی برای بدست آوردن ضریب‌های

سفتی پوسته استفاده نموده و تاثیر عوامل مختلف از جمله ضخامت پوسته را بر فرکانس‌های طبیعی بررسی نمودند.

شاهقلیان و همکارانش [31-32]، به بررسی عددی و تجربی ارتعاشات آزاد ورق‌های کامپوزیتی مشبک پرداختند و اثرات تقویت‌کننده‌های طولی و عرضی را بر استحکام پوسته‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار داده و نوع سطح مقطع بهینه را برای تقویت‌کننده‌ها مشخص نمودند. آنها برای ساخت نمونه‌ها از روش رشته‌پیچی و لایه‌گذاری دستی استفاده نموده و اثرات تعداد تقویت‌کننده‌ها ،ضخامت تقویت‌کننده‌ها و ضخامت پوسته را بر رفتار ارتعاشی این پوسته‌ها بررسی نمودند.

آربلو و همکارانش [33]، بارهای کمانشی پوسته‌های استوانه‌ای را با استفاده از متد همبستگی ارتعاشات تعیین نمودند. کینا [34]، با استفاده از روش آنالیز هندسی به بررسی رفتار ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای تقویت‌شده پرداخت. او به این منظور از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و تئوری میندلین-رایزنر استفاده نمود.

زارعی و رحیمی [35-36]، به بررسی ارتعاشات آزاد پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای و مخروطی تقویت‌شده تحت شرایط مرزی مختلف پرداختند و معادلات مربوطه را بر مبنای تئوری دانل استخراج نمودند. آنها اثرات تغییرات پارامترهای هندسی و تغییر در زاویه بین تقویت‌کننده‌ها را بر فرکانس‌های طبیعی مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی تحقیقات گذشته، تاکنون آنالیز تجربی بر روی ارتعاشات پوسته‌های FML تقویت‌شده انجام نگرفته است. در نتیجه در تحقیق حاضر، برای اولین بار به صورت تجربی ارتعاشات پوسته‌های FML تقویت‌شده تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور در ابتدا سه پوسته FML تقویت‌شده ساخته شده و سپس با استفاده از آزمایش سوختن خواص مکانیکی این پوسته‌ها استخراج گردیده‌اند و در نهایت با طراحی و ساخت فیکسچرهای مورد نیاز تحلیل‌های تجربی ارتعاشات نمونه‌های ساخته شده انجام گرفته است. همچنین به منظور تعیین کارایی روش‌های عددی برای تحلیل پوسته‌های FML تقویت‌شده، نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس با نتایج تجربی مقایسه گردیده‌اند. در تحلیل-های عددی انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس از خواص مکانیکی به دست آمده از آزمایش سوختن برای پوسته‌های مدل شده استفاده گردیده است. علاوه بر این به منظور تحلیل شرایط مختلف، رفتار ارتعاشی یک پوسته FML تقویت-شده با یک پوسته تمام کامپوزیتی تقویت‌شده مقایسه شده است و در انتها تاثیر وجود و عدم وجود تقویت‌کننده‌ها بر پاسخ ارتعاشی پوسته‌های FML مورد بررسی قرار گرفته است.

2- بررسی پروسه ساخت پوسته‌های FML تقویت‌شده

تاکنون روش‌های متفاوتی جهت ساخت پوسته‌های کامپوزیتی تقویت‌شده ارائه شده است. نحوه شکل‌دهی تقویت‌کننده‌ها در ساخت این نوع سازه‌ها به علت پیچیدگی ساخت شبکه، در صدر پژوهش‌های روز در این زمینه قرار دارد. ایجاد تقویت‌کننده‌ها یکی از مهمترین قسمت‌های تولید یک سازه مشبک است و در این پژوهش جهت پیچش الیاف از دستگاه جایگذاری الیاف استفاده شده است که بسیار شبیه به روش متداول پیچش الیاف با ماشین‌های پیچش معمولی است. این دستگاه متشکل از یک محور چرخان و یک سیستم با حرکت خطی است. در این روش مندرل علاوه بر حرکت پیچشی می‌تواند دارای حرکت خطی نیز باشد. در پیچش الیاف با استفاده از دستگاه جایگذاری، به تعداد مورد نیاز برای تمام شیارهای تقویت‌کننده‌های طولی و محیطی، سیستم تغذیه‌کننده مستقل الیاف می‌توان تعبیه کرد.

جهت ساخت پوسته‌های FML تقویت شده، در مرحله اول ورق‌های آلومینیومی از نوع 2024 با ایجاد خراش در سطح فلز، رول شده و با فرایند جوشکاری استوانه‌ای می‌شوند و بعد از چربی‌زدایی اولیه با حلال استون شستشو داده شده و آماده می‌شوند. خراش ایجاد شده به وسیله‌ی سمباده‌ی نرم در سطح فلز برای افزایش قدرت اتصال بین لایه‌های فلز، رزین و الیاف می‌باشد. سپس تقویت‌کننده‌ها به وسیله‌ی رشته‌پیچی الیاف بر روی یک مندرل ساخته می‌شوند. برای ساخت نمونه‌ها، بعد از سوارکردن قالب شبکه‌ها بر روی پایه مندرل، قالب بر روی دستگاه قرار می‌گیرد و برای یکنواخت شدن قطعه نهایی تنظیمات زیر پیش از آغاز مرحله پیچش انجام می‌گیرد:

- تنظیم دور موتورها با استفاده از اینورترها.
- تنظیم کشش اولیه الیاف‌ها.
- هدایت الیاف‌ها به محل تغذیه‌کننده‌ها و شیارها (نخ‌کشی).

مرحله پیچش الیاف درون شیارهای قالب با کشش 170گرم و سرعت مندرل 10 دور بر دقیقه آغاز می‌گردد و الیاف استرینگر همزمان با پیچش ریب‌های حلقوی به صورت دستی به دستگاه خوراک داده می‌شود و شبکه درون قالب شکل می‌گیرد. در حین پیچش، الیاف شیشه قبل از قرارگیری در شیار به ماده زمینه‌ای آغشته می‌گردد و تا زمانی این فرآیند ادامه می‌یابد که در نقاط تقاطع، سطح الیاف‌ها با سطح مندرل برابر گردد. سپس با تکنیک لایه‌چینی دستی لایه‌های پلیمری و آلومینیومی بر روی شبکه شکل می‌گیرند. برای اینکه بتوان نمونه‌های مشابه ساخت، از شمارنده‌ای که تعداد الیاف را در هر شیار به صورت مداوم می‌شمارد استفاده شده است.

لازم به ذکر است بعد از پخت اولیه ماده زمینه، نمونه‌های شبکه‌ای از داخل قالب خارج می‌گردند. سپس به‌وسیله‌ی دستگاه سنگ پرداخت می‌شوند و به مدت یک هفته در دمای محیط پخت می‌گردند. اندازه نمونه‌ها با توجه به ظرفیت دستگاه انتخاب شده است، بطوریکه تمامی نمونه‌ها دارای طول 30 سانتیمتر هستند. در نهایت سه نمونه پوسته FML متشکل از 2 لایه آلومینیوم و سه لایه‌ی بین لایه‌ای از الیاف بافته شده شیشه و رزین اپوکسی تولید گردیده است. در شکل 1 به صورت شماتیک نحوه قرارگیری تقویت کننده‌ها و لایه‌های فلز و کامپوزیت پوسته‌های FML ساخته شده نشان داده شده است.

جدول 1 ابعاد هندسی پوسته‌های FML ساخته شده

Table 1 geometric dimensions of fabricated FML shells

	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم
وزن نمونه(gr)	465	455	477
طول (mm)	300	300	300
قطر	150	150	150
ضخامت هر لایه آلومینیومی(mm)	0.1	0.1	0.1
ضخامت هر لایه پلیمری(mm)	0.6	0.6	0.6
ضخامت کل پوسته(mm)	2	2	2
تعداد لایه پلیمری	3	3	3
تعداد لایه آلومینیومی	2	2	2
سطح مقطع رینگ‌ها و استرینگرها (mm)	4×4	4×4	4×4
پهنای رینگ‌ها و استرینگرها (mm)	4	4	4

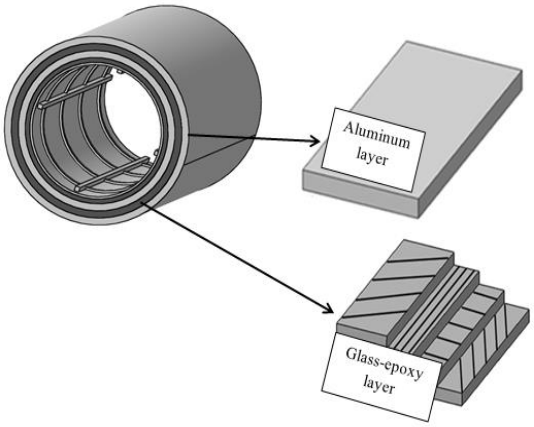

Fig 1 layers orientation schematic of FML-stiffened shell.

شکل 1 شماتیک نحوه قرارگیری لایه‌های فلز و کامپوزیت پوسته‌های استوانه‌ای FML تقویت شده

جزییات ابعادی نمونه‌های تولید شده در جدول 1 آورده شده است.
نمایی از سه نمونه پوسته FML ساخته شده در شکل2 نشان داده شده است .

Fig. 2 Fabricated FML shells

شکل 2 پوسته‌های FML ساخته شده

مزیت ساخت این نوع پوسته‌ها به روش ابداعی مورد ادعا به شرح زیر است:

- دقیق بودن هندسه پوسته‌های مشبک FML : با توجه به استفاده از قالب برای شکل‌دهی تقویت‌کننده‌ها می‌توان بر هندسه و مسیر ریب‌ها و استرینگرها کنترل دقیقی داشت درصورتی‌که در روش رشته‌پیچی بر روی فوم این امکان فراهم نیست.
- پایین بودن هزینه: در روش مورد استفاده در این پژوهش از مواد پلاستیکی و لاستیکی استفاده شده است. همچنین استفاده از قالب، ابزار قابل انعطاف و راحتی جداسازی باعث کاهش هزینه ساخت پوسته‌های مشبک FML گردیده است.
- راحتی نصب و جداسازی قالب شبکه : مزیت این روش بر دیگر روش‌های مشابه بر این است که در این روش قالب لاستیکی یکپارچه و قابل انعطاف است که به راحتی بر روی مندرل سوار و به راحتی از شبکه جدا می‌شود. درصورتی‌که در سایر روشها، برای سوار کردن قالب بایستی تکه‌های شبکه که تقریبا صلب هستند، همانند پازل بر روی مندرل ثانویه پیچ شوند که این عمل زمان‌بر و خسته‌کننده است.
- ایجاد شبکه پیچیده: مزیت دیگر این روش به روش‌های دیگر این است که نیازی برای برش قالب شبکه به وسیله ماشین تراش بر روی مندرل دوار نیست. در اینجا قالب شبکه با استفاده از قالب‌گیری لاستیک بر روی ابزار قابل انعطاف به‌دست می‌آید و ابزار قابل انعطاف از ورق تخت ساخته می‌شود.

در نتیجه پوسته‌های FML ساخته شده به روش مورد اشاره نیازمندی‌های طراحی را برآورده می‌سازند.

3- تعیین خصوصیات مکانیکی پوسته‌های FML ساخته شده

در این پژوهش جهت ساخت پوسته‌های FML از ورق‌های آلومینیومی آلیاژی از نوع 2024 با ضخامت 0.1 میلیمتر و الیاف تک جهته شیشه نوع E و ماده زمینه‌ای اپوکسی ایپون 828، تولیدی شرکت شل، به همراه سخت‌کننده جف‌آمین، تولیدی شرکت هانتسمن، استفاده شده است. شبکه تقویت‌کننده نیز از جنس الیاف شیشه نوع E با سطح مقطع مربعی 4×4 میلی‌متر مربع ساخته شده است. خواص اسمی مواد اولیه در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی مواد اولیه

Table2 mechanical properties of fundamental material

E-glass	Epon828/HY	AL	
72	3.85	72.4	مدول یانگ(Gpa)
35.42	1.31	27.8	مدول برشی(Gpa)
0.2	0.3	0.3	ضریب پواسون
2440	1120	2700	چگالی(Kg/m^3)

برای مقایسه صحیح نتایج آنالیز تجربی نمونه‌های تولیدی با نتایج عددی و یا تحلیلی، بایستی خواص مکانیکی لایه‌های تشکیل‌دهنده این نمونه‌ها را تعیین نمود. به عبارت دیگر برای طراحی و پیشگویی رفتار سازه، دانستن خواص مکانیکی هر لایه از مواد مرکب لازم است. همچنین برای کنترل کیفیت نمونه‌ها و یا چک کردن آنالیز میکرومکانیک نیز می‌توان آزمایش تعیین خواص مکانیکی در مواد مرکب را انجام داد.

خواص مکانیکی در مواد مرکب به مواردی هم‌چون جهت‌گیری الیاف و نحوه کوپل لایه‌ها، بستگی دارد که همین موارد آنالیز تجربی این مواد را نسبت به مواد ایزوتروپ مشکل می‌سازد. با داشتن خصوصیات مکانیکی مواد تشکیل دهنده یک لایه و با استفاده از تئوری کلاسیک لایه‌ها می‌توان خواص یک چند لایه متشکل از لایه‌هایی با جهت‌گیری متفاوت را محاسبه نمود.

در این پژوهش با استفاده از آزمایش سوختن سعی شده است که برآورد درستی از درصد ترکیب الیاف و ماده زمینه‌ای در نمونه‌های تولید شده به دست آورد و از آنجا با استفاده از قانون اختلاط ، خواص مکانیکی هر لایه را محاسبه نمود. یک لایه‌ی تک جهته کامپوزیتی، به صورت یک ماده ارتوتروپیک که صفحات تقارن آن عمود و موازی با راستای الیاف هستند، رفتار می‌کند. محور 1 (راستای طولی) موازی با راستای الیاف، محور 2 عمود بر راستای الیاف (در صفحه تک لایه) و محور 3 عمود بر صفحه تک لایه به عنوان محورهای مختصات، در نظر گرفته می‌شوند. برای یک تک لایه از جنس ماده ارتوتروپیک و همسانگرد عرضی، در صورت نیاز به محاسبه تنش‌های تک لایه بر مبنای کرنش‌ها از معادله (1) استفاده می‌گردد.

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{21} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_{12}\end{bmatrix} \quad (1)$$

در این معادله، Q_{ij} المانهای ماتریس سفتی تک لایه هستند و از ثابت‌های مهندسی تک لایه مطابق با روابط (2) تا (5) به‌دست می‌آیند.

$$Q_{11}=\frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \quad (2)$$

$$Q_{12}=\frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}=Q_{21} \quad (3)$$

$$Q_{22}=\frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \quad (4)$$

$$Q_{66}=G_{12} \quad (5)$$

معادلاتی که برای پیش‌بینی خواص مکانیکی تک لایه (ثابت‌های مهندسی) بر مبنای خواص اجزاء سازنده آن مورد نیاز هستند به صورت معادلات (6) تا (9) به دست می‌آیند.

$$E_1=E_fV_f+E_mV_m \quad (6)$$

$$\upsilon_{12}=V_f\upsilon_f+V_m\upsilon_m \quad (7)$$

$$E_2=\frac{E_fE_m}{V_fE_m+V_mE_f} \quad (8)$$

$$G_{12}=\frac{G_fG_m}{V_fG_m+V_mG_f} \quad (9)$$

در معادلات (6) و (8)، E_f و E_m ، به‌ترتیب مدول یانگ الیاف و ماده زمینه‌ای، E_1 و E_2، به‌ترتیب مدول یانگ در راستای طولی و عمود بر راستای الیاف در صفحه تک لایه می‌باشند و در معادلات (6) تا (9)، V_f و V_m ، به ترتیب درصدهای حجمی الیاف و ماده زمینه‌ای هستند. همچنین در معادله (9)، G_f ، G_m و G_{12} به ترتیب مدول برشی الیاف، ماده زمینه‌ای و تک لایه در صفحه 1-2، و در معادله (7)، υ_f، υ_m و υ_{12}، به ترتیب ضریب پواسون الیاف، ماده زمینه‌ای و تک لایه می‌باشند.

در این پژوهش جهت تعیین درصد الیاف از آزمایش سوختن استفاده گردیده است. برای این منظور درصد جرمی الیاف w_f و درصد جرمی ماده زمینه w_m، از آزمایش سوختن به‌دست می‌آیند و با داشتن چگالی جرمی الیاف و ماده زمینه (ρ_f و ρ_m) می‌توان چگالی جرمی ماده کامپوزیت ρ_c ، را از رابطه (10) به‌دست آورد.

$$\rho_c=\frac{\rho_f\rho_m}{\rho_m w_f+\rho_f w_m} \quad (10)$$

هچنین درصد حجمی الیاف و ماده زمینه با استفاده از روابط (11) و (12) محاسبه می‌گردند.

$$V_f=\frac{w_f\rho_c}{\rho_f} \quad (11)$$

$$V_m=\frac{w_m\rho_c}{\rho_m} \quad (12)$$

بر اساس استاندارد ASTM D3171-99، با آزمایش سوختن درصد حجمی الیاف شیشه در لایه ماده مرکب پلیمری یعنی هر لایه مرکب مابین لایه‌های آلومینیومی به‌دست آمده است. برای این منظور سه تکه از نمونه‌های تولیدی جدا شده و بعد از قطعه قطعه کردن در بوته قرار داده شدند. وزن بوته خالی و بوته پر یاداشت شده و بوته به مدت یک ساعت در دمای 600 درجه سانتیگراد در یک کوره حرارتی قرار داده شد تا تمامی رزین اپوکسی ماده مرکب بسوزد. بعد از سرد شدن کوره، بوته‌ها از کوره برای توزین خارج شدند. تمامی رزین اپوکسی موجود در ماده مرکب سوخته و آنچه در بوته باقی مانده بود الیاف شیشه بود. با داشتن وزن خالی و پر بوته در قبل و بعد از سوختن درصد وزنی الیاف تشکیل‌دهنده ماده مرکب مشخص گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3 نتایج حاصل از آزمایش سوختن نمونه پوسته‌ها

Table3 result of samples burning test

	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	متوسط
جرم نمونه بعد از سوختن (گرم)	1.3	2.64	0.98	1.64
جرم نمونه قبل از سوختن (گرم)	3.04	4.55	1.94	3.18
درصد جرمی الیاف (w_f)	%42.76	%58.02	%50.52	%51.57
درصد جرمی ماتریس (w_m)	%57.24	%41.98	%49.48	%48.43

با تقسیم جرم نمونه بعد از سوختن به جرم نمونه قبل از سوختن درصد وزنی الیاف مشخص می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (10) چگالی ماده مرکب تعیین شده و با استفاده از روابط (11) و (12) درصد حجمی الیاف و ماتریس تعیین می‌گردد. در نهایت با توجه به درصد حجمی الیاف و ماتریس محاسبه شده و استفاده از قاعده‌ی اختلاط، روابط (6) تا (9)، خواص مکانیکی یک تک لایه کامپوزیتی از پوسته مورد بررسی به دست می‌آید. این خواص در جدول 4 لیست شده‌اند.

جدول 4 خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی پوسته استوانه‌ای FML تقویت شده

Table4 mechanical properties of one layer of FML-stiffened cylindrical shell

خصوصیات مکانیکی پوسته	مقادیر
$\rho_m(\frac{kg}{m^3})$	1160
$\rho_f(\frac{kg}{m^3})$	2440
$\rho_c(\frac{kg}{m^3})$	1590
V_f	%33.6
V_m	%66.4
υ_{12}	0.266
$E_1(Gpa)$	26.74
$E_2(Gpa)$	5.65
$G_{12}(Gpa)$	1.93

4- بررسی فرایند آماده سازی و تجهیزات مورد استفاده جهت انجام تست‌های ارتعاشی

تحلیل مودال در واقع مطالعه خواص اجسام، سازه‌ها یا مکانیزم‌ها در اثر ارتعاشات تحمیلی و بررسی پاسخ آنهاست. به طور کلی آزمایش مودال با هدف دست‌یابی هم زمان به سه مورد زیر انجام می‌شود:

- محاسبه سطح ارتعاشات نقاط مختلف سازه یا مکانیزم حین عملیات
- اندازه‌گیری خواص دینامیکی و پیش‌بینی رفتار دینامیکی سیستم و ارتعاشات آن
- بررسی رفتار قطعات تحت نیروهای موجود در عملیات و بررسی صحت طراحی

یکی از مهمترین دستاوردهای آنالیز مودال، فرکانس‌های طبیعی سیستم است. معمولاً برای اجرای آزمایش مودال در سازه‌ها، آنها را با نیروهای مناسب و مشخص تحریک می‌کنند. در این شرایط، پاسخ ارتعاشی سازه، با استفاده از سنسورها اندازه‌گیری می‌شود.

برای انجام یک تست مودال مطلوب، باید در ابتدای امر مقدمات تست را به خوبی فراهم کرد. با طراحی هر چه مناسب‌تر شرایط تست، می‌توان خطاهای احتمالی را کاهش داد. به طور کلی مقدمات پیش از آزمایش شامل موارد زیر است:

- تعیین چگونگی نگهداری سازه تحت آزمایش و نقاط اتصال سازه به تکیه-گاه
- انتخاب مناسب موارد مرتبط با تحریک سازه که شامل نوع تحریک، وسیله تحریک، چگونگی نصب آن و نقاط تحریک می‌شود.
- انتخاب روش و تجهیزات مناسب برای اندازه‌گیری پاسخ، نیروی تحریک و همچنین محل مناسب برای نصب تجهیزات اندازه‌گیری.

به طور کلی، هر چه در ایجاد موارد فوق دقت بیشتری به عمل آید موجب کاهش زمینه‌های بروز خطا در حین آزمایش و داده‌برداری نتایج خواهد شد. لازم به ذکر است که رعایت نکات لازم برای آزمایش، تکرار آزمایش با روش‌های مختلف به دفعات و در نهایت استفاده از یک نرم‌افزار اجزاءمحدود و یا در صورت امکان مدل‌سازی تحلیلی سازه، منجر به استخراج نتایج مطلوب در آزمایش می‌گردد.

در آزمایشات انجام شده در این پژوهش برای دریافت اطلاعات از سنسورهای شتاب‌سنج پیزوالکتریک یک جهته 333B30 برای ثبت اطلاعات نیرو و شتاب استفاده شده است که نویز و امپدانس پایینی دارند. برای استخراج دقیق‌تر نتایج در هر مرحله از آزمون از سه سنسور استفاده می‌شود که در مناطق مختلف پوسته نصب می‌گردند. سنسورهای مورد استفاده در شکل 3 نشان داده شده‌اند.

Fig. 3 sensor that used in modal test

شکل 3 سنسورهای مورد استفاده در آزمایش مودال

همچنین در این آزمایش، از دستگاه داده‌برداری NI PXI-1044، نرم‌افزار تحلیل داده‌های Modal View و کابل‌های Coaxial استفاده شده که نویز کمتری در آنها ایجاد می‌شود. دستگاه داده‌برداری مورد استفاده نیز در شکل 4 نشان داده شده است.

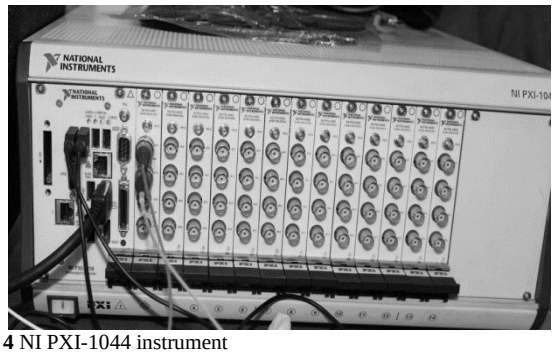

Fig. 4 NI PXI-1044 instrument

شکل 4 دستگاه داده‌برداری NI PXI-1044

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مربوط به تست مودال که تاثیر مستقیم و زیادی در دقت و صحت آزمایش دارد، نحوه نگهداری سازه تحت آزمایش است. در این پژوهش برای ایجاد شرایط مرزی یک سر گیردار، با اتصال یکی از مقاطع پوسته‌های مورد بررسی به یک فیکسچر فلزی تخت، شرایط مرزی مورد نظر ایجاد گردید. به این منظور چهار قطعه آلومینیومی طراحی و ساخته شد تا از حرکت مقطع متصل شده به تکیه‌گاه جلوگیری نموده و شرایط مرزی مورد نظر ایجاد گردد.

برای تحریک سازه نیز در حالت ارتعاشات یک سرگیردار از شیکر استفاده گردیده است. نوع تابع تحریک در حالت یک سرگیردار به صورت جاروب سینوسی در نظر گرفته شده و میزان تابع تحریک نیز برابر با 0.5g تنظیم شده است. در شکل 5 شیکر مورد استفاده نشان داده شده است.

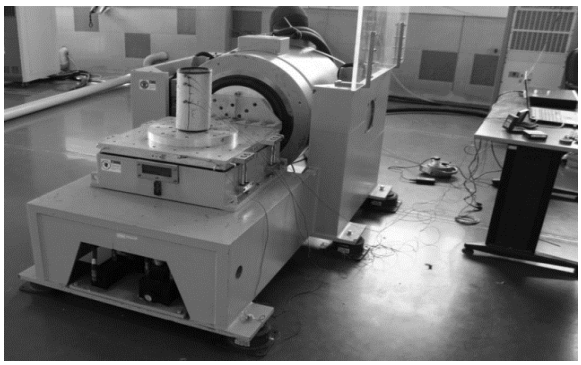

Fig. 5 shaker instrument

شکل 5 دستگاه شیکر مورد استفاده

در شکل 6 نیز نحوه اتصال پوسته به شیکر و ایجاد شرایط مرزی گیردار-آزاد نشان داده شده است.

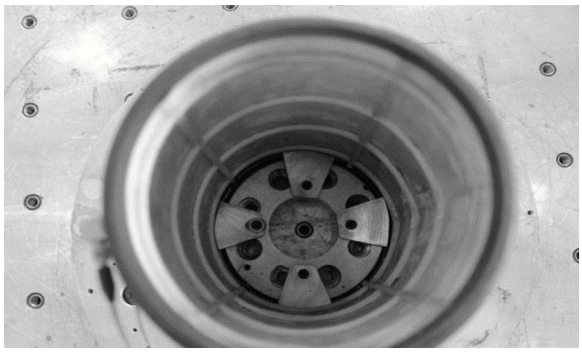

Fig. 6 clamp-free boundary condition

شکل 6 نحوه اتصال گیردار-آزاد پوسته‌های FML مورد بررسی

5- مدلسازی و مش‌بندی پوسته‌های FML در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS

جهت بررسی عددی رفتار ارتعاشی پوسته استوانه‌ای FML تقویت‌شده و مقایسه با نتایج روش تجربی از نرم‌افزار ABAQUS V/6.12 استفاده شده است. برای مدل کردن پوسته تقویت‌شده، ابتدا پوسته استوانه‌ای به صورت Shell مدل گردیده و سپس رینگها و استرینگرها که به صورت Solid مدل گردیده‌اند بر روی Shell مونتاژ می‌گردند. در شکل 7 پوسته FML تقویت شده که در محیط نرم افزار آباکوس مدل گردیده، نشان داده شده است.

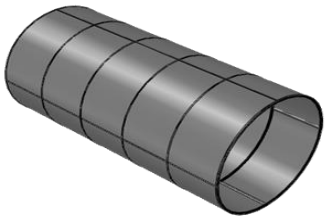

Fig. 7 FML shell with 4 ring and 4 stringer that designed by Abaqus

شکل 7 پوسته استوانه‌ای با **4** رینگ و **4** استرینگر طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس

المان‌های به کار رفته برای مش‌بندی تقویت‌کننده‌ها، C3D8R می‌باشند و برای مش‌بندی پوسته از المان S4R استفاده شده است. در شکل 8 نیز نمایی از پوسته مش‌بندی شده نشان داده شده است.

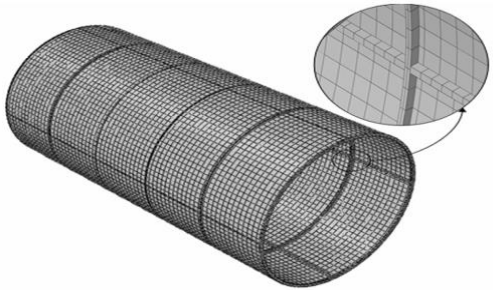

Fig. 8 the meshing view of FML-stiffened shell

شکل 8 نمایی از مش‌بندی پوسته FML تقویت شده

6- نتایج و بحث

6-1- نتایج تجربی ارتعاشات پوسته‌های FML تقویت‌شده تحت شرایط مرزی گیردار –آزاد

در حالت ارتعاشات گیردار-آزاد از سه سنسور برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های FML استفاده شده است. بعد از نصب هر یک از نمونه‌ها بر روی شیکر، سه سنسور بر روی نمونه‌ها متصل شده و یک سنسور نیز بر روی فیکسچر شیکر نصب می‌گردد. جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی و همچنین نشان دادن تکرارپذیری نتایج، هر یک از نمونه‌ها دو بار تحت ارتعاشات عرضی قرار می‌گیرند. به این منظور در هر آزمایش محل نصب سنسورها تغییر کرده و تست‌ها مجددا تکرار می‌شوند. محدوده فرکانسی مورد بررسی از 100 تا 2000 هرتز در نظر گرفته شده است. همچنین پوسته‌های مورد بررسی با نیروی تحریک به صورت جاروب سینوسی و با میزان قدرت 0.5g تحت ارتعاش قرار گرفته‌اند. در شکل 9 نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی شیکر و همچنین نحوه نصب سنسورها بر روی آنها به صورت شماتیک نشان داده شده است. سنسور نصب شده بر روی شیکر یک سنسور کنترلی است که تغییرات شتاب ایجاد شده در نمونه‌های تحت تست را نسبت به شتاب ایجاد شده در شیکر اندازه‌گیری می‌نماید.

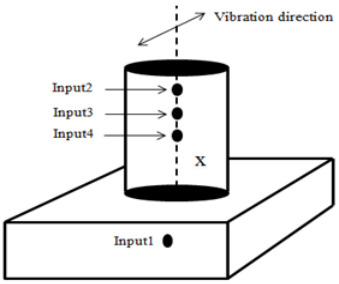

Fig. 9 The method of sensor installation on the shell

شکل 9 نحوه اتصال سنسورها بر روی پوسته‌ها

در جداول 5 تا 7 میزان فرکانس‌های طبیعی تجربی سه نمونه پوسته FML تقویت‌شده تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد آورده شده است. به این منظور میزان شتاب ایجاد شده در نمونه‌ها با استفاده از چهار سنسور، اندازه‌گیری می‌شوند. سنسور اول به عنوان سنسور کنترلی بر روی فیکسچر نصب می گردد و سنسورهای دوم، سوم و چهارم نیز در نقاط مختلف پوسته نصب می گردند تا شتاب ایجاد شده در پوسته را اندازه‌گیری نموده و با مقادیر شتاب ثبت شده توسط سنسور کنترلی مقایسه نمایند. مقادیری که در آنها نسبت شتاب ایجاد شده در پوسته‌های تحت تست، نسبت به شتاب ایجاد شده در فیکسچر شیکر افزایش قابل توجهی یافته و نمودارها دچار پیک می‌شوند نشان‌دهنده فرکانس طبیعی پوسته‌ها می‌باشند.

جدول 5 نتایج تست‌های ارتعاشی نمونه اول

Table5 vibrational test results of first specimen

شماره فرکانس	سنسور دوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور سوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور چهارم	افزایش شتاب نمونه
1	338.84	16.3	327.05	5.8	316.5	4
2	660.6	6.44	656.7	4.06	660	1.6
3	997.7	4.5	993	3.35	990	3.49
4	1161.8	6.4	1157	3.9	1151	5.6
5	1269.81	4.21	1253.9	3.01	1244	10.5
6	1616.9	9	1592	5.96	1590	11.2

جدول 6 نتایج تست‌های ارتعاشی نمونه دوم

Table6 vibrational test results of second specimen

شماره فرکانس	سنسور دوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور سوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور چهارم	افزایش شتاب نمونه
1	352.9	2.29	350.3	2.03	351.7	1.17
2	676.43	3.09	675.3	2.14	640.59	1.78
3	1006	7.08	995.2	6.17	993	4.59
4	1130.2	3.56	1127	2	1123	6.7
5	1266.8	2.37	1237	2.74	1217	4.15
6	1735	2.15	1723	6.35	1715	2.3

جدول 7 نتایج تست‌های ارتعاشی نمونه سوم

Table7 vibrational test results of third specimen

شماره فرکانس	سنسور دوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور سوم	افزایش شتاب نمونه	سنسور چهارم	افزایش شتاب نمونه
1	362.8	8.4	361.04	6.95	360.3	7.28
2	658.87	3.5	652.7	2.1	650	1.9
3	1015.8	7.02	996	6.61	996	2.1
4	1120	7.93	1114	2.2	1113	3.2
5	1273.5	2.5	1270	7.4	1244	6.3
6	1735	2.56	1728.8	1.02	1592	1.6

همچنین به عنوان نمونه در شکل 10 تغییرات شتاب ایجاد شده در پوسته اول در فرکانس‌های طبیعی بر اثر نیروی اعمالی نشان داده شده است.

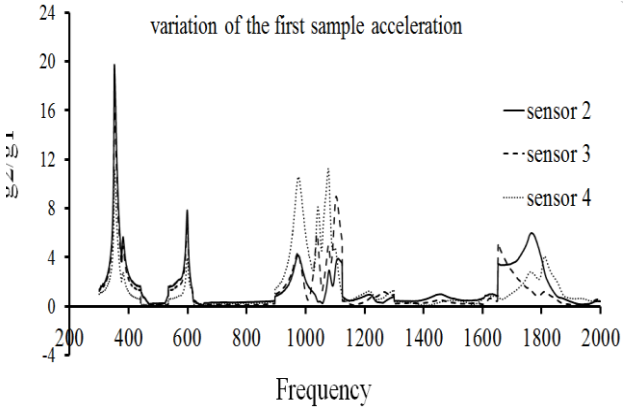

Fig.10 variation of acceleration of the first specimen in natural frequency under clamp-free boundary condition

شکل 10 تغییرات شتاب ایجاد شده در پوسته اول در فرکانس‌های طبیعی تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد

2-6- نتایج عددی ارتعاشات پوسته‌های FML تحت شرایط مرزی گیردار –آزاد

در شکل 11 میزان فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای پوسته FML تقویت شده تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد آورده شده است.

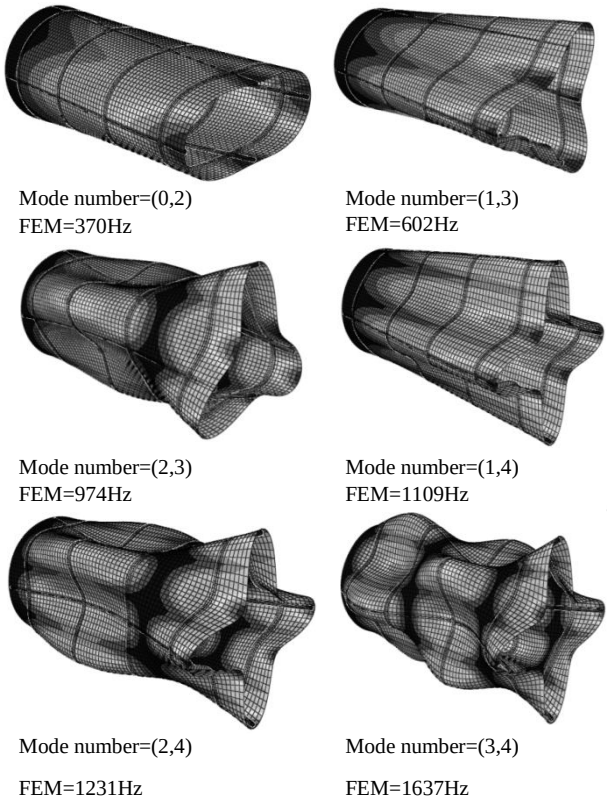

Fig.11 Numerical result of natural frequency and mode shape of FML-stiffened cylindrical shell

شکل 11 نتایج عددی استخراج شده برای فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای پوسته استوانه‌ای FML تقویت شده

3-6- مقایسه فرکانس‌های حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی

در جدول 8 مقایسه‌ای بین شش فرکانس طبیعی اول برای پوسته استوانه‌ای FML تقویت شده که از دو روش تجربی و عددی حاصل گردیده‌اند انجام شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همخوانی مناسبی بین نتایج تجربی و اجزاءمحدود وجود دارد.

جدول 8 مقایسه فرکانس‌های حاصل از تحلیل‌های تجربی و عددی پوسته استوانه‌ای FML تقویت‌شده

Table8 comparison of numerical and experimental frequency of FML-stiffened cylindrical shell

	نتایج عددی	نتایج تجربی نمونه اول	نتایج تجربی نمونه دوم	نتایج تجربی نمونه سوم	شماره مود
فرکانس اول	370	328	352	361	(0,2)
فرکانس دوم	602	660	664	654	(1,3)
فرکانس سوم	974	993	998	1003	(2,3)
فرکانس چهارم	1109	1157	1127	1116	(1,4)
فرکانس پنجم	1231	1256	1241	1262	(2,4)
فرکانس ششم	1637	1600	1724	1685	(3,4)

علت اصلی اختلاف فرکانس‌های حاصل از تست‌های تجربی سه نمونه پوسته ساخته شده، به مسائل ساخت و یکسان نبودن جرم نمونه‌ها مربوط است.

6-4- مقایسه تغییرات فرکانس طبیعی پوسته FML با پوسته تمام کامپوزیتی

در شکل 12 تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب شماره مودهای ارتعاشی برای پوسته FML تقویت شده با 4 رینگ و 4 استرینگر با یک پوسته تمام کامپوزیتی با همین تعداد تقویت‌کننده مقایسه گردیده است.

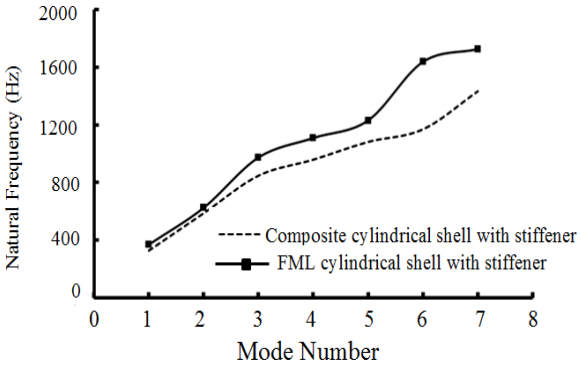

Fig.12 comparison of variation of natural frequencies vs. mode numbers for FML-stiffened cylindrical shell and stiffened composite shell

شکل 12 مقایسه تغییرات فرکانس طبیعی پوسته FML تقویت شده با پوسته تمام کامپوزیتی تقویت شده بر حسب شماره مودهای ارتعاشی

پوسته FML مذکور از سه لایه کامپوزیتی با جنس glass/epoxy و دو لایه آلومینیومی تشکیل شده است. پوسته تمام کامپوزیتی نیز شامل پنج لایه glass/epoxy می‌باشد. سایر خصوصیات هندسی دو پوسته مذکور یکسان می‌باشند. همانطور که در شکل 12 نشان داده شده است برای تمامی مودهای ارتعاشی میزان فرکانس طبیعی پوسته FML تقویت شده بیش از میزان فرکانس طبیعی پوسته تمام کامپوزیتی می‌باشد که این امر نشاندهنده سختی بیشتر پوسته‌های FML نسبت به پوسته‌های تمام کامپوزیتی است. همچنین همانطور که در این شکل نشان داده شده است در مودهای بالاتر اختلاف فرکانس پوسته‌های FML با پوسته تمام کامپوزیتی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. با توجه به ثابت بودن وزن پوسته‌ها این امر نشاندهنده این است که در مودهای بالاتر سختی پوسته‌های FML بسیار بیشتر از پوسته‌های تمام کامپوزیتی می‌باشد. همچنین در جدول 9 مقایسه‌ای بین وزن و سختی پوسته FML تقویت شده با پوسته تمام کامپوزیتی تقویت شده انجام گرفته است.

جدول 9 مقایسه وزن و فرکانس طبیعی اول پوسته FML مشبک با پوسته تمام کامپوزیتی مشبک

Table9 comparison of weight and natural frequencies of FML-stiffened cylindrical shell with stiffened composite shell

	وزن (kg)	سختی(N/m)	فرکانس
پوسته FML	0.543	74336	370
پوسته تمام کامپوزیتی	0.518	55728	328
درصد اختلاف	4%	33%	12%

همانطور که از نتایج ارائه شده در جدول 9 مشخص است میزان سختی پوسته FML مورد بررسی در حدود 33% بیشتر از سختی پوسته تمام کامپوزیتی مشابه می‌باشد در حالیکه وزن پوسته FML تنها در حدود 4% درصد بیشتر از وزن پوسته تمام کامپوزیتی است. این امر نشاندهنده کارایی قابل توجه پوسته‌های FML نسبت به پوسته‌های کامپوزیتی معمولی در برابر بارهای ضربه ای است.

6-5- بررسی تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌های FML با و بدون تقویت‌کننده در ضخامت‌های مختلف

در شکل 13 تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌های FML تقویت‌شده و بدون تقویت‌کننده با افزایش ضخامت نشان داده شده است.

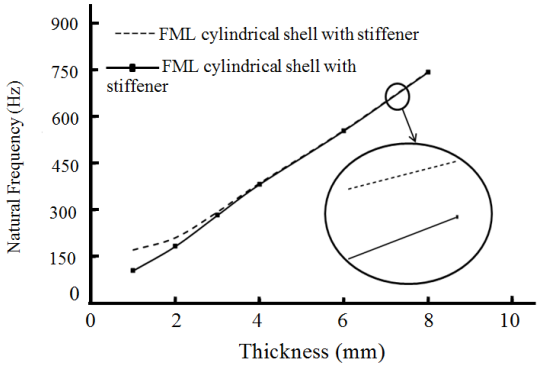

Fig.13 comparison of variation of natural frequencies vs. thickness for stiffened and unstiffened FML shell

شکل 13 مقایسه تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب ضخامت برای پوسته FML تقویت شده و بدون تقویت کننده

همانطور که در شکل 13 نشان داده شده است با افزایش ضخامت پوسته، اختلاف فرکانس طبیعی پوسته‌های تقویت‌شده و تقویت نشده کاهش می‌یابد که این امر نشاندهنده کاهش تاثیر تقویت‌کننده‌ها بر سختی پوسته با افزایش ضخامت آنها می‌باشد. در نتیجه برای پوسته‌های FML ضخیم استفاده از تقویت‌کننده مورد نیاز نمی‌باشد.

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا به نحوه ساخت پوسته‌های FML تقویت‌شده پرداخته شده است. سپس با استفاده از آزمایش سوختن سعی شده، برآورد درستی از درصد ترکیب الیاف و ماده زمینه در نمونه‌های ساخته شده به دست آید و در نهایت با استفاده از قوانین اختلاط خواص مکانیکی هر لایه محاسبه گردیده و برای انجام تحلیل‌های عددی این خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین به منظور تعیین خواص ارتعاشی پوسته‌های ساخته شده آنالیز مودال تحت شرایط مرزی گیردار-آزاد انجام گرفته است. پس از بررسی و جمع‌بندی نتایج عددی و تجربی حاصل از تحلیل پوسته‌های ساخته شده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

- به منظور به حداقل رساندن تاثیرات ناشی از کاستی‌های پروسه‌ی ساخت، سه نمونه پوسته FML تولید گردید تا بتوان برای اطمینان از صحت نتایج، تست مودال را بر روی چند نمونه انجام داد. با توجه به همپوشانی مناسب نتایج تجربی تست‌های مودال پوسته‌های ساخته شده با نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار المان‌محدودی آباکوس، می‌توان نتیجه گرفت روش ساخت معرفی شده در پژوهش حاضر نیازمندیهای طراحی را برآورده می‌سازد.
- دقیق بودن هندسه پوسته‌های FML
- ساخته شده، پایین بودن نسبی هزینه‌ها و راحتی نصب و جداسازی قالب-های شبکه، از مهمترین مزیت‌های پروسه ساخت ارائه شده در این تحقیق می‌باشند.

-یکی دیگر از مهمترین نوآوری‌های مقاله حاضر تعیین تجربی فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های FML تقویت شده تحت شرایط مرزی گیردار- آزاد می-باشد که می‌توان از نتایج حاصل از این تحلیل‌های تجربی به عنوان معیاری مناسب جهت تعیین دقت سایر روش‌های عددی و تحلیلی استفاده نمود.

- با مقایسه تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌های FML با پوسته‌های تمام کامپوزیتی مشخص گردید در تمامی مودهای ارتعاشی میزان فرکانس طبیعی پوسته‌های FML تقویت‌شده بیش از فرکانس طبیعی پوسته‌های تمام کامپوزیتی می‌باشد که این امر نشاندهنده این است که وجود لایه‌های فلزی در پوسته‌های FML منجر به افزایش قابل ملاحظه سختی این پوسته‌ها نسبت به پوسته‌های تمام کامپوزیتی گردیده است در حالیکه وزن پوسته‌های FML افزایش ناچیزی نسبت به پوسته‌های کامپوزیتی دارند.
- میزان سختی پوسته FML تقویت‌شده مورد بررسی در این پژوهش حدود 33% بیشتر از سختی پوسته تمام کامپوزیتی تقویت‌شده مشابه می‌باشد در حالیکه وزن پوسته FML مذکور تنها در حدود 4% درصد بیشتر از پوسته تمام کامپوزیتی است. این امر نشاندهنده کارایی قابل توجه پوسته-های FML نسبت به پوسته‌های کامپوزیتی معمولی در برابر بارهای ضربه-ای است.
- در مودهای بالاتر اختلاف فرکانس پوسته‌های FML تقویت‌شده با پوسته تمام کامپوزیتی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. با توجه به ثابت بودن وزن پوسته‌ها این امر نشاندهنده این است که در مودهای بالاتر سختی پوسته-های FML بسیار بیشتر از پوسته‌های تمام کامپوزیتی می‌باشد و به عبارت دیگر پوسته‌های FML بهتر از پوسته‌های تمام کامپوزیتی سختی خود را حفظ می‌کنند.
- با بررسی تغییرات فرکانس طبیعی پوسته‌های FML تقویت‌شده با پوسته-های FML بدون تقویت‌کننده مشخص گردید با افزایش ضخامت پوسته، اختلاف فرکانس طبیعی پوسته‌های تقویت‌شده و تقویت نشده کاهش می-یابد که این امر نشاندهنده کاهش تاثیر تقویت‌کننده‌ها بر سختی پوسته‌های FML با افزایش ضخامت است. در نتیجه برای پوسته‌های ضخیم استفاده از تقویت کننده مورد نیاز نمی‌باشد.

8- فهرست علائم

υ	ضریب پواسون
E_f	مدول الاستیک فیبرها(Gpa)
E_m	مدول الاستیک ماتریس(Gpa)
E_1	مدول الاستیک لایه کامپوزیتی(Gpa)
V_f	درصد حجمی فیبرها
V_m	درصد حجمی ماتریس
G_f	مدول برشی فیبرها(Gpa)
G_m	مدول برشی ماتریس(Gpa)
MVF	کسر حجمی فلز
ρ_m	چگالی ماتریس$(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3})$
ρ_f	چگالی فیبرها$(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3})$
ρ_c	چگالی لایه کامپوزیتی$(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3})$
$\mathrm{Q_{ij}}$	المانهای ماتریس سفتی تک لایه
AL	آلومینیوم
GE	شیشه-اپوکسی

9- مراجع

[1] Rosen, A., Singer, J., "Vibrations of Axially Loaded Stiffened Cylindrical Shells", Journal of sound and vibration, Vol. 34, pp. 357-378, 1974.

[2] Lam, K.Y., Loy, C.T., "Influence of Boundary Conditions and Fiber Orientation on the Natural Frequencies of Thin Orthotropic Laminated Cylindrical Shells",Journal of Composite Structures, Vol.31, No.1, pp. 21-30,1995.

[3]-Jafari, A.A., Bagheri, M., "Free Vibration of Non-Uniformly Ring Stiffened Cylindrical Shells Using Analytical, Experimental and Numerical Methods", Thin-Walled Structures, Vol. 44, No.1, pp. 82-90, 2006.

[4] Prusty, B.,"Free Vibration and Buckling Response of Hat-Stiffened Composite Panels Under General Loading" ,International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50, Issue 8, pp. 1326–1333,2008.

[5] Yaokuo, S.Y., LeChung, S., "Buckling and Vibration of Composite Laminated Plates with Variable Fiber Spacing" , Journal of Composite Structures , Vol. 90 , No. 2 , pp.196-209,2009.

[6] Torkamani, Sh., Navazi, H.M., Jafari, A.A., Bagheri, M.," Structural Similitude in Free Vibration of Orthogonally Stiffened Cylindrical Shells", Thin-Walled Structures, Vol.47, pp.1316-1330, 2009.

[7] kaviani, F., mirdamadi, H.R.,"Free Vibration Analysis of Laminated Composite Plate by a Novel Four Variable Refined Theory" ,tarbiat modares Journal of tarbiat modares , Vol. 12, , No. 6 , pp. 147–158,2011.

[8] Aksoylar, C., Mehmet, Z., Omurtag, H., "Nonlinear Transient Analysis of FGM and FML Plates under Blast Loads by Experimental and Mixed FE Methods"Composite Structures, Vol. 94, No. 2, pp.731-744, 2012.

[9] Khalili, S.M.R., Davar, A., MalekzadehFard, K.," Free Vibration Analysis of Homogeneous Isotropic Circular Cylindrical Shells Based on a New Three-Dimensional Refined Higher-Order Theory", International journal of Mechanical sciences, Vol.56, pp. 1-25, 2012.

[10] Yegao, Q., Chen,Y., Long,X., Hua,H., Meng,G., "A Modified Variational Approach for Vibration Analysis of Ring-Stiffened Conical–Cylindrical Shell Combinations",European Journal of Mechanics - A/Solids ,Vol 37, PP. 200–215,2013

[11] Zhao, L., Wu, J.," Natural Frequency and Vibration Modal Analysis of Composite Laminated Plate", Advanced Materials Research, Vol. 711, pp. 396-400, 2013.

[12] MalekzadehFard ,K., Hasanabadi,M.R.," Free Vibration and Static Bending Analysis of Curved Sandwich Panel with Magneto-Rheological Fluid Layer in Sheets using Improved High Order Sandwich Panel Theory", journal of science and technology of composites, Vol.1, No.2, pp. 49-62, 2014.

[13] Koruk, H., Dreyer, J., Singh, R.,"Modal Analysis of Thin Cylindrical Shells with Cardboard Liners and Estimation of Loss Factors", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.45, pp.346-359, 2014.

[14] Shakouri, M., Kouchakzadeh, M.A., "Free Vibration Analysis of Joined Conical Shells: Analytical and Experimental Study", Thin-Walled Structures, Vol.85, pp.350-358, 2014.

[15] Hemmatnezhad, M., Rahimi, G.H., Tajik, M., Pellicano, F., "Experimental, Numerical and Analytical Investigation of Free Vibrational Behavior of GFRP-stiffened Composite Cylindrical Shells", composite Structures, Vol.120, pp.509-518, 2015.

[16] Rahimi, G. H., Hemmatnezhad, Ansari, M.R., "Prediction of Vibrational Behavior of Grid-Stiffened Cylindrical Shells", Journal of Advance in acoustics and vibration, VOL.73, pp.10, 2014.

[17] Bisagni, C., "Composite Cylindrical Shells under Static and Dynamic Axial Loading: An Experimental Campaign", Journal of progress Aerospace sciences, Vol. 78, pp.107-115, 2015.

[18] Yang,J., Xiong,J.,Ma,L., NaFeng,L., YangWang,S.,ZhiWu,L.," Modal Response of All-Composite Corrugated Sandwich Cylindrical Shells" ,Composites Science and Technology, Vol. 115, pp. 9-20,2015.

[19] Jamshidi,P., Moghadam,S.,"Numerical and Experimental Analysis of Free Vibration of Post-buckled Beam",amirKabir Jounrnal of Science & Research,Vol. 47, No. 2, pp. 71-82,2015.

[20] Ehsani, A., Rezaeepazhand, J.,"Effect of Grid Configuration on Buckling and Vibration Response of Composite Grade Plate", shahrod Journal of structures mechanic, Vol .5, pp.93-100, 2015.

[21] Hosseini Kordkheili, S.A., Khorasan, R., "Experimental Investigation of Vibrational Damping Properties of a Viscoelastic Material", shahrod Journal of structures mechanic, Vol.6, No.4, pp.161-171, 2016.

[22] Nazari, A., Malekzade Fard, K., Majidian, M.,"Vibration Analysis of FML Cylindrical Shell Optimized According to Maximum Natural Frequency under Various Boundary Conditions", journal of tarbait modares, Vol. 16, No.7, pp.143-152, 2016.

[23] Salimi, H., Noorabadi, M., Eskandari Jam,J.,"Vibration Analysis of Composite Cylindrical Shell Reinforced with Circumferential Rib, tabriz Journal of mechanic, Vol. 46,No.2,pp.167-172,2016.

[24] Biswal, M., Sahu, S.K., Asha, A.V.," Experimental and Numerical Studies on Free Vibration of Laminated Composite Shallow Shells in Hygrothermal Environment", Composite Structures, Composite Structures, Vol. 127, pp. 165–174, 2016.

[25] Torabi, K., Shariati-Nia, M., Heidari-Rarani, M.,"Experimental and Theoretical Investigation on Transverse Vibration of Delaminated Cross-Ply Composite Beams", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.85, pp.115-116, 2016.

[26] Chetan Hirwania, K., Patila, K., Pandaa, K., Mahapatraa, S., Buragohainc, K.," Experimental and Numerical Analysis of Free Vibration of Delaminated Curved Panel", Aerospace Science and Technology,Vol. 54,pp. 353-370,2016.

[27] Marjanovic, M., Vuksanovic, D., "Free Vibrations of Laminated Composite Shells Using the Rotation-Free Plate Elements Based on Reddy's Layerwise Discontinuous Displacement Model, Composite structures, Vol.156.pp. 320-332, 2016.

[28] El-Helloty, A.," Free Vibration Analysis of Stiffened Laminated Composite Plates", International Journal of Computer Applications , Vol 156 – No 1, pp.12-23,2016.

[29] Eslami, R., Shahrabi, A., Khosravi, H., Zamani, M.R.," A Study on the Flexural Response of Grid Composites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes", journal of science and technology of composites, Vol.4, No.1, pp. 101-108, 2017.

[30] Nezam-Eslami, R., Esmailizadeh, A., Khosravi, H., Zamani, M.R.," Analysis of Linear Vibrational Behavior of Anisogrid Lattice Composite Conical Shells Formed by Helical Ribs", journal of tarbiat modares, Vol.17, No.3, pp. 251-262, 2017.

[31] Shahgholian, D., Ghanadi, A., Rahimi, G.," Experimental and Numerical Investigation of the Free Vibration of Composite Sandwich Plate with Lattice Core", journal of tarbiat modares, Vol.17, No.10, pp. 1-8, 2017.

[32] Shahgholian, D., tahani, V., Rahimi, G.," Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Longitudinal and Horizontal Ribs on Flexural Behavior of Grid Stiffened Composite Plate", journal of science and technology of composites, Vol.3, No.4, pp. 333-342, 2017.

[33] Arbelo, M., Kalnins, K., Ozolins, O., Skukis, E., Castro, s., Degenhardt, R.," Experimental and Numerical Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using a Vibration Correlation Technique", Journal of Thin-walled structures, Vol.94, pp.273-279, 2017.

[34] Qina, X.C, Donga, C.Y., Wangb, F., Gonga, Y.P.," Free Vibration Analysis of Isogeometric Curvi Linearly Stiffened Shells", Thin-Walled Structures, Vol. 116, pp. 124–135, 2017.

[35] Zarei, M., Rahimi, G.H.," Free Vibration Analysis of Grid Stiffened Composite Conical Shells", journal of science and technology of composites, Vol.4, No.1, pp. 1-8, 2017.

[36] Zarei, M., Rahimi, G.H.," Free Vibration Analysis of Rotating Grid Stiffened Composite Cylindrical Shells", journal of tarbait modares, Vol.16, No.9, pp. 175-185, 2017.