



Experimental and Numerical Analysis of the Effects of Temperature Reduction on the Natural Frequencies of Cylindrical Shell Using Acoustic Test

Meisam Parhikhteh¹, Mahdi Karimi^{2*}, Reza Ahmadi³, Omid Mohammadpour³

¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

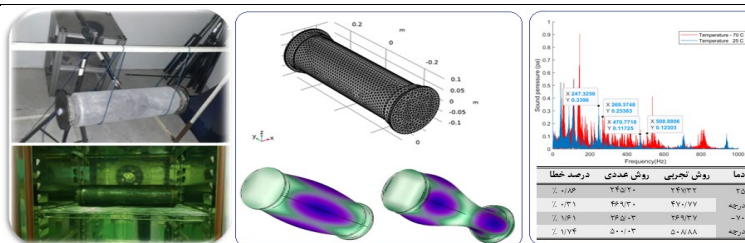
² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Hamedan, Iran

HIGHLIGHTS

- Natural frequencies
- Cylindrical shell
- Shell acoustic analysis
- Temperature reduction

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 15 September 2024

Received in revised form: 18 October 2024

Accepted: 3 November 2024

Available online: 3 November 2024

*Correspondence:

m_karimi@basu.ac.ir

How to cite this article:

M. Parhikhteh, M. Karimi, R. Ahmadi, O. Mohammadpour. Experimental and numerical analysis of the effects of temperature reduction on the natural frequencies of cylindrical shell using acoustic test. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2025; 20(4):87-102.

Keywords:

Cylindrical shell

Acoustic

Natural frequencies

ABSTRACT

Considering the importance of the effect of temperature reduction in many industrial structures, especially aerospace industries, in this article, the experimental and numerical analysis of the effect of cold on the natural frequencies of a cylindrical shell has been discussed. After the construction of a cylindrical steel shell, first it was excited by non-contact method and using the acoustic test room and by sending acoustic waves, and its natural frequencies were measured by frequency analysis of the sound pressure level at environmental temperature. Also, to validate the test method, the results were compared with the results obtained by the modal hammer contact method and the finite element simulation results in COMSOL software and it was shown a good adaptation between them. Next, the shell was transferred to the cold thermal chamber to reach a temperature of less than minus 70 degrees Celsius, and the test was repeated in the acoustic room and the effect of temperature drop on the values of the natural frequencies of the structure were studied by both experimental and numerical methods. The results show that as the temperature decreases, the natural frequencies of the structure increase. It can also be seen from the results of the numerical solution that the sensitivity of each of the natural frequencies of the structure is not the same to temperature changes. For example, the highest sensitivity to temperature is related to the fifth and seventh modes and the lowest sensitivity is related to the eighth and sixth modes.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.





تحلیل تجربی و عددی تأثیر کاهش دما روی فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای با استفاده از تست آکوستیکی

میثم پرهیخته^۱، مهدی کریمی^{۲*}، رضا احمدی^۳، امید محمدپور^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

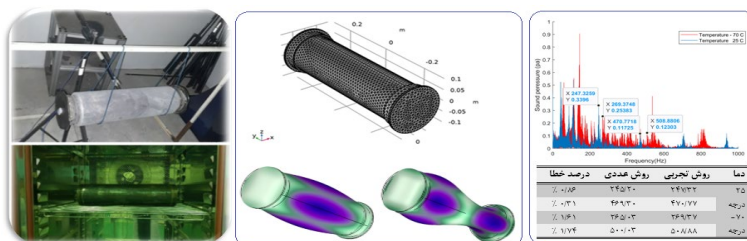
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

برجسته‌ها

- فرکانس‌های طبیعی
- پوسته استوانه‌ای
- آنالیز آکوستیکی پوسته
- کاهش دما

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

*نویسنده مسئول:

m_karimi@basu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

پوسته استوانه‌ای

آکوستیک

فرکانس‌های طبیعی

آنالیز مودال

سطح فشار صوت

چکیده

با توجه به اهمیت تأثیر کاهش دما در سازه‌های گوناگون صنعتی به‌ویژه صنایع هوافضا، در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی اثر سرما روی فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای پرداخته شده است. پس از ساخت یک نمونه پوسته استوانه‌ای فولادی، ابتدا به روش غیر تماسی و با استفاده از اتاق تست آکوستیک و با ارسال امواج آکوستیکی، سازه مذکور تحریک شده و فرکانس‌های طبیعی آن با آنالیز فرکانسی سطح فشار صوتی اندازه‌گیری شده در دمای محیط استخراج شدند. همچنین برای صحت‌گذاری روش تست، مقایسه نتایج حاصله با نتایج به‌دست‌آمده از روش تماسی چکش مودال و نتایج شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار کامسول انجام شد و تطابق مناسبی بین آن‌ها مشاهده گردید. سپس پوسته به محفظه حرارتی سرد منتقل شده تا به دمای کمتر از منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد و مجدداً آزمایش در اتاق آکوستیک تکرار شده و تأثیر افت دما روی مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه به دو روش تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که با کاهش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی سازه، افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج حل عددی مشاهده می‌شود که میزان حساسیت هر یک از فرکانس‌های طبیعی سازه نسبت به تغییرات دما یکسان نمی‌باشد. به‌طور مثال بیشترین حساسیت به دما مربوط به مودهای پنجم و هفتم و کمترین حساسیت مربوط به مودهای هشتم و ششم می‌باشد.



۱- مقدمه

سازه‌های پوسته استوانه‌ای، چه در خلأ و چه در معرض سیالات داخلی و خارجی، سازه‌هایی ساده، اما بسیار با اهمیت می‌باشند که به‌طور وسیع در صنایع مختلف و جنبه‌های متفاوت مهندسی استفاده می‌شوند. این سازه‌ها به علت دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکانیکی، به‌طور گسترده در هواپیماها، شاتل‌های فضایی، موشک‌ها، مخازن تحت فشار، زیردریایی‌ها و غیره به کار گرفته می‌شوند. مطالعه ارتعاشات آکوستیک پوسته‌های استوانه‌ای به دلیل کاربردهای زیاد آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. وابستگی فرکانس طبیعی این پوسته‌ها به جنس، هندسه، شرایط مرزی و تغییرات دما (مانند کاهش دما در ارتفاعات) به اثبات رسیده است [۱].

غالباً سازه‌های مهندسی در طول عمر مفیدشان تحت بارهای مختلف حرارتی و یا رطوبتی قرار دارند. به‌طور مثال محدوده دمای خارجی که سازه‌های هوافضایی در آن مورد استفاده قرار می‌گیرند بین ۱۰۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. البته برای هواپیماها با توجه به محدوده پرواز آن‌ها این محدوده دمایی کوچک‌تر می‌باشد [۲]. لذا اهمیت تعیین فرکانس‌های طبیعی انواع سازه‌های استوانه‌ای در طراحی‌های مهندسی تحت شرایط دمایی مختلف موجب شده است تا این موضوع سال‌ها مورد توجه محققان و پژوهشگران مختلف قرار بگیرد. تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه فرکانس طبیعی آن‌ها از قبیل روش‌های استفاده از پاسخ ارتعاشی به تحریک ورودی مشخص و نامشخص، استفاده از پاسخ آکوستیکی به ورودی تحریک مشخص و نامشخص و غیره بکار گرفته شده است. ضمناً اثر پارامترهای مختلفی از قبیل جنس سازه، ابعاد و شرایط مرزی مختلف نیز به روش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۳].

هرچند تحقیقات اولیه در زمینه ارتعاشات آکوستیک در سازه‌ها، روی ورق‌ها انجام شد ولی پس از اختراع هواپیما و استفاده وسیع از آن در جنگ جهانی دوم، مطالعات روی عملکرد ارتعاشی آکوستیکی پوسته‌های استوانه‌ای که مدلی از بدنه هواپیماها هستند، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرد. از اولین مقالات در این زمینه می‌توان به مقاله فاران [۴]

و جانگر [۵] اشاره نمود. در سال ۱۹۷۳ تحقیقاتی توسط لیسا [۶] در رابطه با تخمین فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای شکل صورت گرفت. بلوینس [۷] نیز روی محاسبه شکل مودهای فرکانسی یک پوسته استوانه‌ای مطالعات جامعی را انجام داد. سودل [۸] فرمولاسیون تحلیلی جهت محاسبه فرکانس‌های طبیعی برای پوسته‌های استوانه‌ای دایره‌ای ارائه داد و برای حالت‌های مختلف تغییر شکل‌های پوسته، نتایج را استخراج نمود. در ادامه در چند دهه اخیر بررسی اثر گرادیان‌های حرارتی روی ارتعاشات سازه‌های مختلف از جمله ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای و دوانحنایی مورد توجه محققین بوده است که البته بیشتر این پژوهش‌ها به روش تحلیلی و عددی صورت پذیرفته‌اند. در سال ۱۹۹۲ هوانگ [۹] و همکارانش، ویژگی‌های ارتعاشی یک ورق کامپوزیتی که تحت اثر گرمایش سریع قرار داشت را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق معادلات حرکت ورق با در نظر گرفتن بارهای حرارتی گذرا و به کمک سری‌های فوریه استخراج شدند. چانگ و شیانگ [۱۰] برای تحلیل رفتار دینامیکی یک پوسته استوانه‌ای چندلایه، یک مدل اجزاء محدود دوبعدی ارائه دادند و تأثیر لایه چینی کامپوزیتی، شعاع انحنا و شرایط مرزی را روی ارتعاشات آن مورد بررسی قرار دادند. پاره‌ی و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۱، معادلات ارتعاشات ورق و پوسته‌های چندلایه کامپوزیتی را در محیطی که در معرض گرادیان‌های حرارتی و رطوبت قرار داشت را با استفاده از فرمولاسیون المان محدود استخراج کردند. حل آن‌ها بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم نیومارک ارائه شد. تحقیقات در رابطه با تأثیر تغییرات ضخامت پوسته‌های استوانه‌ای روی فرکانس‌های طبیعی را می‌توان به مطالعات ردی [۱۲] و سودل [۱۳] نسبت داد. آن‌ها فرکانس‌های طبیعی مختلف را با تغییر دادن نسبت ضخامت پوسته استخراج کردند و معادلات حاکم را بر اساس تئوری کلاسیک به دست آوردند. در سال ۲۰۰۸، ریبیرو و جانسن [۱۴] روی موضوع بررسی رفتار غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری هم‌زمان میدان‌های حرارتی و تحریکات مکانیکی تمرکز نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که یکی از علل عدم ثبات دینامیکی این سازه‌ها، تنش‌های باقیمانده در سازه به دلیل وجود

برخوردار هستند، استفاده نموده است. موسوی و همکارانش [۲۳] به بررسی ارتعاشات پوسته استوانه‌ای دوار ساخته‌شده از مواد مدرج تابعی، تحت فشار محوری و داخلی با تقویت‌کننده حلقوی و محوری و شرایط تکیه‌گاهی دو سر ساده پرداختند. معادلات حرکت پوسته استوانه‌ای بر اساس تئوری پوسته لاو و با استفاده از اصل همیلتون و روش انرژی استخراج‌شده‌اند. در مطالعه دیگری، ایشان و همکارانشان [۲۴] تحلیل دینامیکی-ارتعاشاتی پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از لایه‌های گرافیت اپوکسی به همراه دو لایه پیزوالکتریک را با استفاده از تئوری سندرز برای پوسته‌های نازک را مورد مطالعه قرار دادند. ترینه [۲۵] و همکارانش تأثیر تخلخل و بارگذاری ترمومکانیکال را روی ارتعاشات و پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته دوانحنایی ساندویچی تابعی مدرج مورد مطالعه قرار دادند. تحلیل ارتعاشات غیرخطی ضربه با سرعت پایین روی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تحت فشار داخلی با استفاده از روش‌های تحلیلی و المان محدود توسط مامندی و همکارانش [۲۶] مورد مطالعه قرار گرفت. معادلات حاکم بر حرکت پوسته با استفاده از نظریه غیرخطی پوسته دائل استخراج و با استفاده از روش گالرکین حل‌شده‌اند. احمدی و بیات [۲۷] نیز در سال ۲۰۲۱ پاسخ ارتعاشات اجباری غیرخطی پوسته ساخته‌شده از جنس تابعی مدرج تقویت‌شده را در محیط حرارتی با استفاده از تکنیک مقیاس چندگانه به دست آوردند. زارعی و همکاران [۲۸] تأثیر شرایط مرزی و ضخامت متغیر پوسته بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های مخروطی کامپوزیت تقویت‌شده را مورد مطالعه قرار دادند. الهامی و همکارانش [۲۹] به مطالعه افت انتقال صوت در پوسته‌های استوانه‌ای تابعی مدرج با وصله‌های پیزوالکتریک پرداختند. معادلات حرکت سازه با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول پوسته‌ها، اصل همیلتون و شرایط مرزی سیال/سازه استخراج‌شده‌اند. بویچاک و همکاران [۳۰] به بررسی فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی برای پوسته‌های استوانه‌ای موج‌دار جدار نازک موج‌دار بسته با استفاده از روش اجزاء محدود پرداختند. ابراهیمی [۳۱] ارتعاشات یک پوسته استوانه‌ای ساخته‌شده از مواد تابعی مدرج که برای انتقال جریان سیال استفاده‌شده بود را مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که فرکانس طبیعی با افزایش

گرادین‌های حرارتی و رطوبتی است. در تحقیق دیگری توسط ژائو و لی [۱۵] تحلیل ارتعاشی و ترموالاستیک پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از مواد تابعی مدرج با به‌کارگیری روش ریتز صورت پذیرفت. نادا و پرادیومنا [۱۶] نیز پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته‌های چندلایه تحت اثر گرادین‌های حرارتی و رطوبتی را به روش تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله اثر وجود نقص، رطوبت و نوع نقص در رفتار دینامیکی سازه مورد بررسی قرار گرفت. وان تانگ و داک [۱۷] در سال ۲۰۱۴ یک ورق به شکل منحنی از جنس تابعی مدرج را روی یک پایه الاستیک از نوع پسترناک مدل‌سازی کردند و پاسخ غیرخطی ارتعاشی آن را تحت شرایط بارگذاری مختلف ترمومکانیکی به دست آوردند. در این پژوهش فرض شده است که ویژگی‌های مواد ورق مستقل از دما است و همچنین توزیع دما در جهت ضخامت ورق به صورت یکنواخت می‌باشد. مطالعات ژیانگ‌بانگ و همکارش [۱۸] روی پاسخ‌های ارتعاشی و صوتی ورق‌های ساندویچی و کامپوزیتی که به آن یک نیروی هارمونیک متمرکز در یک محیط با دمای بالا اعمال می‌شود، متمرکز شده است. فرکانس‌های طبیعی سازه همراه با شکل مودها تحت تنش‌های حرارتی و با استفاده از تئوری تغییرشکل برشی به دست آمدند. در پژوهش دیگری، ماهاپاترا و همکارانش [۱۹ و ۲۰]، با استفاده از یک مدل میکرو مکانیکی به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی یک سازه دو انحنایی کامپوزیت لایه‌ای که در معرض بارگذاری حرارتی، رطوبتی و مکانیکی قرار دارد، پرداختند. در این کار سازه با در نظر گرفتن همه عوامل مرتبه بالای غیرخطی به دلیل وجود کرنش‌های غیرخطی هندسی گرین-لاگرانژ و تئوری مرتبه بالای تغییرشکل برشی، مدل‌سازی شده است. برای نخستین بار، ارتعاشات آزاد و کمانش ورق‌های ساندویچی استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر و لایه‌های روغن مغناطیسی با استفاده از تئوری مرتبه بالای بهبودیافته ورق‌های ساندویچی توسط ملک‌زاده و همکارانش [۲۱] مورد تحلیل قرار گرفتند. ژین و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۱۹ به بررسی عملکرد ترموآکوستیکی یک صفحه ایزوتروپیک با تکیه‌گاه ساده که در معرض ترکیبی از تحریک گرمایی و آکوستیکی قرار دارد، به روش تحلیلی پرداختند. ایشان از محیط‌های حرارتی درجه‌بندی‌شده که از اهمیت بالایی به‌ویژه در ساخت هواپیما

انتقال استفاده کردند. آن‌ها مطالعات تجربی خود را بر اساس استانداردهای بین‌المللی ASTM و ANSI انجام دادند. دینگ و همکارانش [۴۰] به بررسی تجربی ویژگی‌های مودال حرارتی برای فونداسیون یک کشتی تحت دمای زیر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند. ست‌آپ آزمایشگاهی ایشان از ترکیب مشترک یک سیستم شبیه‌ساز محیط گرمایش آیرودینامیکی گذرا و یک سیستم تحریک ارتعاشی تشکیل شده است و از روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل توزیع میدان‌های حرارتی استفاده شده است. زیپو و همکارانش [۴۱] به مطالعه تجربی ارتعاشات غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای پلیمری با مقطع دایره‌ای تحت اثر حرارتی پرداختند. این آزمایش‌ها در یک محیط کنترل شده تحت چندین شرایط دما و دامنه تحریک همگن و با هدف مطالعه تأثیر دما روی دینامیک پیچیده پوسته‌ها انجام شدند. پوسته استوانه‌ای مورد آزمایش در جهت محوری با استفاده از یک تحریک لرزه‌ای که توسط یک دستگاه شیکر الکترو دینامیکی اعمال می‌شود، تحریک شده است و تجزیه و تحلیل روی محدوده فرکانس‌های تحریک نزدیک به اولین رزونانس پوسته متمرکز شده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، کارهای تحقیقاتی انجام شده روی تخمین فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای واقع در یک محیط حرارتی یا برودتی، عمدتاً به روش تحلیلی و عددی صورت گرفته است. سابقاً برخی مطالعات تجربی روی رفتار ارتعاشی ورق‌ها، پوسته‌های استوانه‌ای و برخی اجزای هواپیما یا کشتی تحت اثرات محیط حرارتی صورت گرفته است اما نویسندگان این مقاله، از میان تحقیقات انجام شده تاکنون، هیچ پژوهشی که به‌طور هم‌زمان، تأثیر کاهش دما روی رفتار ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای را با هر دو روش آزمایشگاهی تماسی (چکش مودال) و غیرتماسی (تست آکوستیکی) مورد بررسی قرار داده باشد، مشاهده نمودند. لذا نوآوری اصلی این تحقیق، تحلیل عددی و مطالعه تجربی تأثیر کاهش دما بر فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای با استفاده از تست آکوستیک می‌باشد.

در این پژوهش، جهت انجام تست تجربی، ابتدا برای تعیین تجربی فرکانس‌های طبیعی پوسته در دمای محیط، از روش

میزان سرعت سیال کاهش پیدا می‌کند. پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۳ توسط یوان [۳۲] با موضوع بررسی عملکرد ارتعاشی و افت انتقال صوت از صفحات ساندویچی متخلخل تابعی مدرج تحت تأثیر میدان دمایی انجام شده است. معادلات دینامیکی سیستم بر اساس اصل همپلتون و با استفاده از تئوری مرتبه بالاتر تغییرشکل برشی استخراج شده‌اند. شادمانی و همکارانش [۳۳] تأثیر محیط حرارتی را روی مقادیر فرکانس‌های طبیعی غیرخطی پوسته‌های مخروطی ساخته شده از مواد تابعی مدرج دو جهته بررسی کردند. بابایی و جعفری [۳۴] تأثیر محیط‌های حرارتی را روی رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های ترکیبی استوانه‌ای-مخروطی تابعی مدرج تقویت شده با نانولوله‌های کربنی مورد مطالعه قرار دادند. چاکرابورتی و همکاران [۳۵] به بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی بر پایداری و ویژگی‌های ارتعاشی صفحات و ورق‌های قرار گرفته در معرض بارهای حرارتی پرداختند.

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که در رابطه با اثرپذیری فرکانس‌های طبیعی ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای در حضور تغییرات دما، پژوهش‌های بسیار محدودی به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. به‌طور مثال در سال ۱۹۹۶، چن و همکارانش [۳۶] اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی در ورق‌ها را به‌صورت تست آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن ارتباط بین زمان بازآوایش و میزان جذب صوت انجام دادند. فرشیدیانفر و همکارانش [۳۷] به روش تجربی و با استفاده از تحریک صوتی به تحلیل ارتعاشی یک پوسته استوانه‌ای با طول بلند و شرایط مرزی ساده پرداختند. وو و همکارانش [۳۸] به بررسی تجربی ویژگی‌های ارتعاش حرارتی با دمای بالا برای سازه بال کامپوزیتی تجهیزات پرنده مافوق صوت پرداختند. آن‌ها یک ست‌آپ آزمایشگاهی ارتعاشی حرارتی را با ترکیب یک سیستم شبیه‌ساز گرمایشی گذرا با دمای بالا تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و یک دستگاه تست ارتعاش ایجاد نمودند که این سیستم قابلیت این را دارد که تحقیقات تجربی را روی آنالیز مودال حرارتی سازه‌های بال کامپوزیتی وسایل نقلیه پروازی مافوق صوت مقاوم در برابر دمای بالا را انجام دهد. در سال ۲۰۱۸، کوکونیانو و همکارش [۳۹] برای مطالعه رفتار آکوستیکی بدنه هواپیما هنگامی که در معرض یک جریان لایه‌مرزی متلاطم قرار دارد، از روش آزمایشگاهی اتاق

تحریک آکوستیکی سازه در داخل اتاق آکوستیک استفاده شده است. علت استفاده از اتاق آکوستیک برای بررسی تأثیر افت دما روی رفتار ارتعاشی پوسته این است که جهت استفاده از آنالیز مودال برای محاسبه فرکانس طبیعی باید شتاب‌سنج روی جدار پوسته نصب شود که دسترسی به ابزار دقیقی که در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد به درستی عمل نماید، بسیار دشوار می‌باشد. در واقع یکی از مزیت‌های استفاده از اتاق آکوستیک این است که می‌توان بدون نیاز به شتاب‌سنج‌هایی که در دمای پایین قادر به اندازه‌گیری ارتعاشات باشد، آنالیز فرکانسی روی پوسته انجام داد.

جدول (۱): مشخصات مکانیکی پوسته استوانه‌ای

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۲۰۰	GPa
چگالی	۷۸۰۰	kg/m ³
ضریب پواسون	۰/۳	-



شکل (۱): پوسته استوانه‌ای فولادی ساخته شده.

۲-۲-۱- روش انجام تست آکوستیک روی پوسته استوانه‌ای

برای انجام این تست، داخل و خارج پوسته دو عدد میکروفون قرار داده می‌شود و سپس دو طرف پوسته با دو عدد درپوش ساخته شده از جنس خود پوسته بسته شده و پوسته از بیرون توسط بلندگوی داخل اتاق آکوستیک تحت تحریک امواج آکوستیکی قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که مطابق شکل ۲، در آزمایش مودال، به منظور ایجاد شرایط مرزی دو سر آزاد، پوسته به کمک طناب‌هایی معلق نگه‌داشته شده است. یکی دیگر از دلایل آن این است که قرار گرفتن آن روی پایه‌های نگه‌دارنده، مانع از ایجاد ارتعاش در برخی از شکل مودها

آزمایشگاهی غیرتماسی با استفاده از بلندگو جهت تحریک آکوستیکی سازه استفاده شده است. سپس برای صحنه‌گذاری روش تست، مجدداً فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای موردنظر در بازه ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز در دمای محیط، هم با استفاده از روش تماسی آزمایشگاهی چکش مودال برای اعمال ضربه به سازه و هم شبیه‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول محاسبه شده‌اند. تطابق مناسبی بین نتایج تست آزمایشگاهی و نتایج حل عددی مشاهده گردید.

در ادامه جهت بررسی تأثیر کاهش دما، پوسته فولادی ساخته شده به محفظه حرارتی سرد منتقل شده تا به دمای کمتر از منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد و مجدداً آزمایش در اتاق آکوستیک تکرار گردید و فرکانس‌های طبیعی جدید سازه اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین فرکانس‌های طبیعی پوسته به روش عددی و با استفاده از مدل المان محدود توسط نرم‌افزار کامسول نیز در دمای مذکور محاسبه شده و در نهایت اثر کاهش دما روی فرکانس‌های طبیعی سازه توسط هر دو روش تجربی و عددی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- آزمایش‌های تجربی

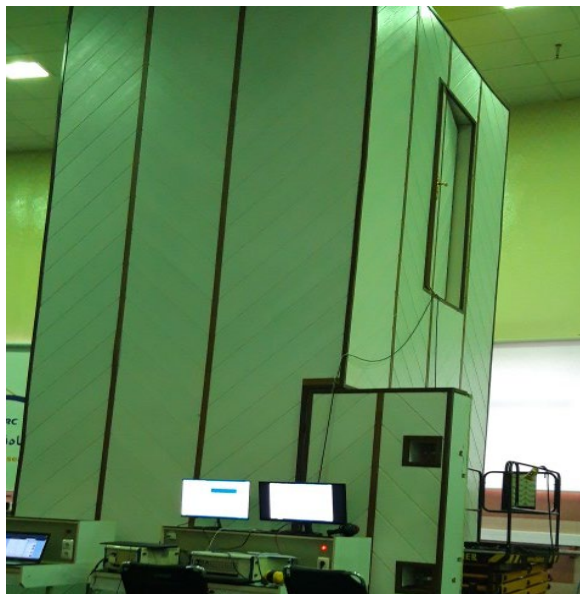
۲-۱- مشخصات هندسی پوسته استوانه‌ای تحت آزمایش

نمونه پوسته استوانه‌ای تحت آزمایش از ماده‌ای با استاندارد آلیاژی ASTM A106 ساخته شده است که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۱ آمده است. ابعاد پوسته بر اساس محدودیت فضای محفظه حرارتی و همچنین اتاق آکوستیک طوری انتخاب شده‌اند که در داخل آن‌ها جای بگیرند. البته قابل ذکر است که هر چه طول پوسته بلندتر باشد، اثرات شرایط مرزی روی نتایج کمتر خواهد بود و بر همین اساس، برای طول پوسته حداکثر مقدار ممکن برابر ۵۵۰ میلی‌متر انتخاب شد. قطر خارجی و ضخامت پوسته نمونه به ترتیب ۱۶۸/۳ میلی‌متر و ۶/۳ میلی‌متر می‌باشند (شکل ۱).

۲-۲- تست آکوستیک روی پوسته استوانه‌ای

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای نمونه از روش غیرتماسی با استفاده از بلندگو جهت

میکروفون مورد استفاده جهت سنجش سطح فشار صوت داخل پوسته از نوع PCB PIEZOTRONICS مدل 378C01 می باشد که قادر است در فرکانس ۴ هرتز، صدای بالاتر از ۲ دسی بل را اندازه گیری نموده و حداکثر حساسیت آن در فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز ۳ دسی بل کمتر از مقدار نامی آن می باشد. قابل ذکر است که به دلیل اینکه جرم میکروفون (۷/۸ گرم) نسبت به جرم نمونه آزمایش (۱۲/۵ کیلوگرم) ناچیز است لذا از اثرات آن در نتایج آزمایش ها صرف نظر شده است.



شکل (۳): تصویری از اتاق آکوستیک.

می شود و این امر سبب می گردد که فرکانس های مربوطه در نمودار طیف فرکانسی قابل شناسایی نباشند.

در نهایت بعد از تست نمونه در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی گراد)، سطح فشار صوت عبوری از بیرون به داخل پوسته داده برداری می شوند. از آنجایی که داده های جمع آوری شده در حوزه زمان می باشند لذا برای اینکه در حوزه فرکانس بررسی شوند، داده ها به نرم افزار متلب منتقل شده و با گرفتن تبدیل فوریه سریع (FFT) از آن ها تحلیل فرکانسی آن ها صورت می گیرد و بدین ترتیب مقادیر فرکانس های طبیعی پوسته را با توجه به قله های به وجود آمده در آنالیز فرکانسی می توان مشاهده نمود.



شکل (۲): تصویری از داخل اتاق تست و نحوه آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش.

۲-۲-۴- نحوه قرارگیری میکروفون در داخل پوسته استوانه ای

مطابق شکل ۴، برای آماده سازی آزمایش، قسمت میانی یکی از درپوش ها جهت عبور سیم میکروفون سوراخ شده است. این میکروفون در داخل پوسته استوانه ای به گونه ای تعبیه شده که امکان تغییر موقعیت آن از بیرون توسط یک دسته وجود داشته باشد. هنگامی که درپوش روی انتهای پوسته قرار می گیرد، میکروفون نیز به داخل پوسته هدایت می گردد. همچنین داده ها با نرخ فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز توسط میکروفون تعبیه شده در داخل پوسته نمونه برداری شده اند.

۲-۲-۵- محفظه حرارتی

۲-۲-۲- مشخصات اتاق آکوستیک

جهت تست نمونه ساخته شده، از اتاق آکوستیک با حجم ۲۷۵ مترمکعب با امکان ایجاد صوت در محدوده فرکانسی ۴-۱۰۰۰۰ هرتز و همچنین با تراز فشار صوتی ۱۴۵ دسی بل (dB) که مناسب برای تست نمونه های با ابعاد ۲×۲×۲ می باشد، استفاده شده است. استفاده از اتاق آکوستیک بدین جهت بوده است که محیط آزمایش کاملاً ایزوله بوده و از ورود هرگونه نویز و صدای اضافی جلوگیری شود. تصویری از این اتاق آکوستیک در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۲-۲-۳- مشخصات میکروفون

برای صحنه‌گذاری نتایج تست آکوستیک، آزمون چکش مودال نیز انجام شده است و فرکانس‌های طبیعی پوسته نمونه در بازه ۰ تا ۱۰۰۰ در دمای محیط اندازه‌گیری شده‌اند. جهت انجام این آزمایش، از یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک GLOBALTEST مدل AP2037-100 و دیتالاگر NI-USB 4431 و برای تحریک فرکانس‌های طبیعی پوسته از یک چکش SINOcera Piezotronics مدل LC-01A استفاده شده است که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. برای اطمینان از تکرارپذیر بودن آزمون و برای به دست آوردن دقیق شکل مودهای مختلف محیطی و طولی، در مجموع بیش از ۲۰ آزمون در نقاط مختلف برای ضربات چکش در جهت شعاعی و نقاط متفاوت نصب شتاب‌سنج در فواصل زمانی مختلف انجام و برای چندین بار تکرار شده است.



شکل (۶): آزمون چکش مودال روی پوسته استوانه‌ای.

۳- حل عددی

برای اعتبارسنجی رویه انجام تست آزمایشگاهی آکوستیک روی پوسته استوانه‌ای و نتایج آن، شبیه‌سازی عددی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار کامسول بر اساس المان محدود انجام شده است. ابتدا مدل سه‌بعدی پوسته استوانه‌ای به همراه صفحات کناری و میله هدایت‌کننده میکروفون به داخل پوسته، طبق مشخصات هندسی مذکور در بخش ۲-۱ در نرم‌افزار سالیدورکز مدل‌سازی و سپس از طریق ماژول Geometry به نرم‌افزار کامسول منتقل می‌شود. مشخصات مکانیکی مواد طبق جدول ۱ بر مدل اعمال شده است. برای شبکه‌بندی اجزای مختلف سازه از المان‌های تتراهدرال استفاده شده است. شرایط مرزی نیز به صورت مدل دو سر آزاد روی پوسته در نظر گرفته شده است. نوع تحلیل انتخابی به صورت فرکانسی خطی می‌باشد و با استفاده از ماژول Solid Mechanics و حلگر Eigenfrequency، فرکانس‌های طبیعی

جهت اعمال دما روی نمونه ساخته شده و برای آنکه توزیع دما به صورت یکنواخت باشد از یک محفظه حرارتی که قابلیت اعمال دما از منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا مثبت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را دارد، استفاده شده است. شکل ۵ نمایی از این محفظه حرارتی و نحوه قرارگیری نمونه پوسته استوانه‌ای در داخل آن را نمایش می‌دهد.

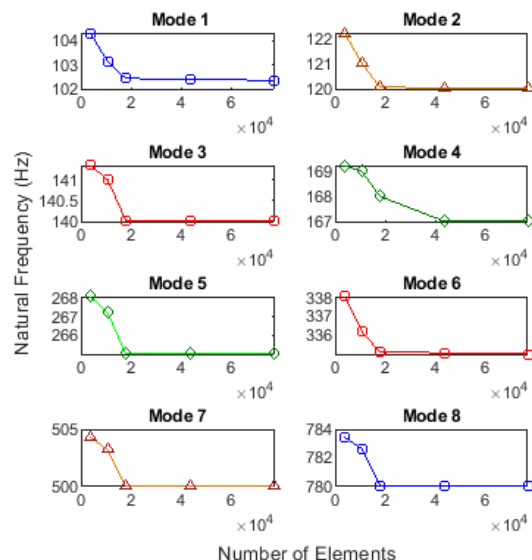


شکل (۴): نحوه قرارگیری میکروفون در داخل پوسته.



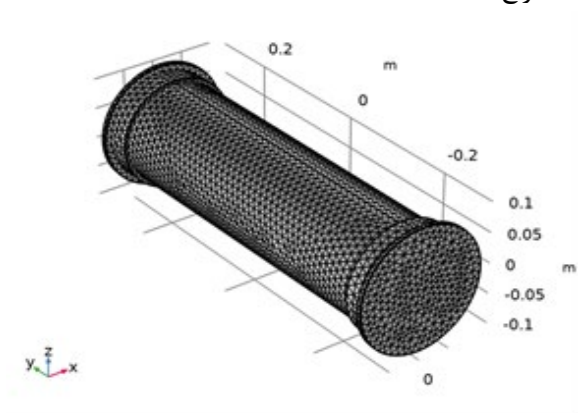
شکل (۵): پوسته استوانه‌ای در داخل محفظه حرارتی.

۳-۲- آزمون چکش مودال روی پوسته استوانه‌ای



شکل (۷): نمودار استقلال نتایج از شبکه‌بندی.

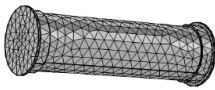
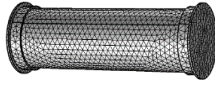
پس از تحلیل حساسیت شبکه المانی، همان‌طور که شکل بالا مشاهده می‌شود به‌کارگیری شبکه ریزتر از ۱۷۸۶۶ المان، تغییر محسوسی در پاسخ‌ها به وجود نیاورده است که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را بیان می‌کند. بر همین اساس از شبکه‌بندی نرمال (اندازه متوسط) به‌عنوان شبکه‌بندی مطلوب استفاده شده است. بر این اساس نمایی از هندسه و شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار کامسول در شکل ۸ نشان داده شده است. در ادامه پس از بررسی استقلال شبکه از حل، فرکانس‌های طبیعی سازه برای زمانی که پوسته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، استخراج شده است.

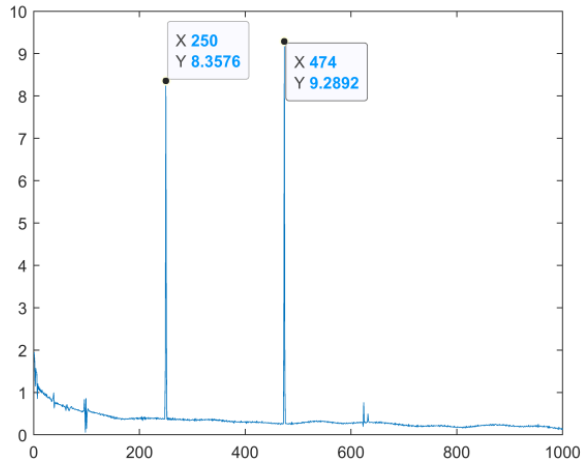


شکل (۸): پوسته شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول.

پوسته استوانه‌ای محاسبه شده‌اند. هرچه تعداد المان‌ها برای شبکه‌بندی بیشتر باشد دقت به حالت تجربی نزدیک‌تر است. با توجه به زیاد شدن المان و به دنبال آن افزایش زمان حل، باید حداقل تعداد المان ممکن که دارای دقت مورد قبولی باشد استفاده شود. برای بررسی حساسیت مدل به مش و دستیابی به تعداد المان بهینه مدل اجزاء محدود، مدل برای پنج اندازه مختلف المان (مطابق جدول ۲)، حل گردیده و مقادیر هشت فرکانس طبیعی اول سیستم در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۰۰۰ هرتز در هر حالت محاسبه شده‌اند. در شکل ۷ نمودار استقلال نتایج از شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود و همگرایی نتایج برای هشت فرکانس اول سازه نشان داده شده است.

جدول (۲): انواع شبکه‌بندی‌های اعمال شده روی مدل

نوع	تعداد المان	تصویر
بسیار درشت	۳۷۲۱	
درشت	۱۰۶۴۹	
معمولی	۱۷۸۶۶	
ریز	۴۳۷۴۰	
بسیار ریز	۷۶۹۲۶	



شکل (۹): نمودار FFT مربوط به روش چکش مودال در دمای محیط.

جدول (۳): فرکانس‌های طبیعی به‌دست‌آمده از آزمون چکش مودال در بازه ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز

شکل مود	فرکانس	واحد
پنجم	۲۵۰	هرتز
هفتم	۴۷۴	هرتز

شکل ۱۰ نیز نمودار FFT را برای روش غیرتماسی تست آکوستیک با استفاده از بلندگوی خارج از پوسته جهت تحریک آکوستیکی سازه در دمای محیط نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود دو قله در نمودار FFT مربوط به روش تست آکوستیک در فرکانس‌های ۲۴۷/۳۲ و ۴۷۰/۷۷ هرتز وجود دارد که بسیار نزدیک به فرکانس‌های طبیعی به‌دست‌آمده از آزمون چکش مودال می‌باشد و این امر گویای تطابق مناسب بین نتایج هر دو تست است.

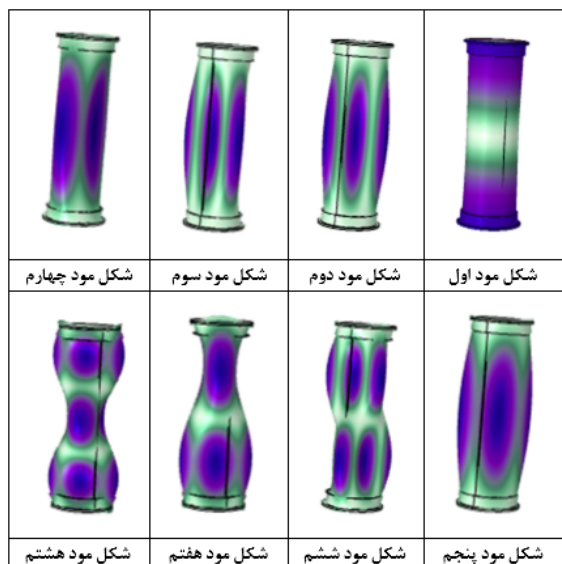
۴- اعتبارسنجی نتایج

برای اطمینان از صحت رویه انجام تست آزمایشگاهی آکوستیک برای استخراج فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای نمونه، ابتدا نتایج به‌دست‌آمده از این تست در دمای محیط با نتایج تجربی آزمون چکش مودال مقایسه شده است. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی با نتایج حل عددی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار کامسول در دمای محیط مقایسه و صحت‌گذاری شده‌اند.

۴-۱- مقایسه نتایج تست آکوستیک و چکش مودال

نمودار FFT به‌دست‌آمده از روش تماسی آزمون چکش مودال پوسته استوانه‌ای در دمای محیط در شکل ۹ قابل‌مشاهده می‌باشد. همچنین فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از این آزمون برای بازه فرکانسی ۰ الی ۱۰۰۰ هرتز در جدول ۳ درج شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به دلیل استفاده از چکش جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی پوسته، تنها دو فرکانس طبیعی حاصل از این تحریک به‌وضوح در نمودار شکل ۹ نمایان شده‌اند که همین دو فرکانس، به‌عنوان فرکانس‌های مرجع جهت مقایسه با نتایج سایر روش‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علت این امر می‌تواند عوامل مختلف از جمله عدم دقیق کنترل دامنه نیرو و محدوده فرکانسی، جنس سر چکش (آلومینیومی)، کیفیت نامطلوب توابع پاسخ فرکانسی در برخی مودها به دلیل عدم تحریک کافی سازه توسط ضربات چکش، ثبت ارتعاشات تنها در یک جهت به دلیل محدودیت حس‌گر و غیره باشد.

نتایج آزمایش‌های تجربی هر دو تست آکوستیک و چکش مودال دارد به طوری که اختلاف نتایج سه روش با یکدیگر کمتر از ۲ درصد می‌باشد.



شکل (۱۱): شکل مودهای اول تا هشتم سازه پوسته استوانه‌ای در صفحه X-Y به روش عددی در دمای محیط.

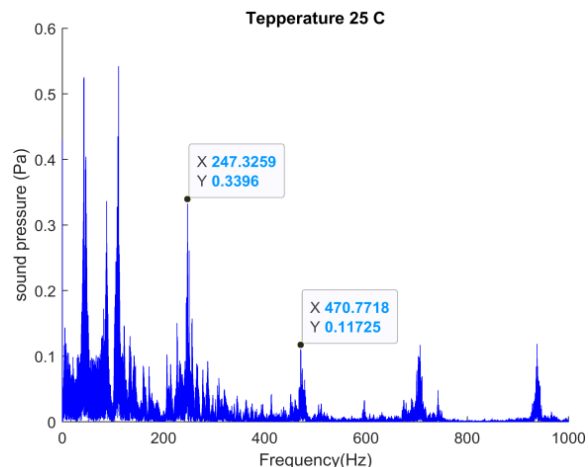
۵- نتایج و بحث

با توجه به اینکه هدف اصلی این مقاله بررسی تجربی تأثیر کاهش دما روی فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای است، لذا در ادامه نتایج حاصل از تست آکوستیک و نیز نتایج حل عددی پوسته استوانه‌ای در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده و با یکدیگر مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۱- نتایج تست آکوستیک پوسته استوانه‌ای در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

بعد از اعمال دمای سرد روی پوسته استوانه‌ای توسط محفظه حرارتی و رسیدن به دمای حدود منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد، پوسته استوانه‌ای سریعاً به داخل اتاق آکوستیک منتقل می‌گردد. پس از اینکه دمای پوسته در هنگام تست، به منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسید، تست آغاز و داده‌برداری انجام می‌شود.

شکل ۱۲ نمودار FFT را برای تست آکوستیک پوسته استوانه‌ای در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد نمایش



شکل (۱۰): نمودار FFT مربوط به روش تست آکوستیک در دمای محیط.

۴-۲- مقایسه نتایج تست آکوستیک و حل عددی

فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از حل عددی حاصل از شبیه‌سازی المان محدود پوسته استوانه‌ای در نرم‌افزار کامسول در دمای محیط در جدول ۴ آورده شده است. همچنین تصاویر شکل مودهای اول تا هشتم سازه پوسته استوانه‌ای در صفحه X-Y در دمای محیط با استفاده از حل عددی در شکل ۱۱ آورده شده است.

جدول (۴): فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از حل عددی در دمای محیط

شکل مود	فرکانس	واحد
اول	۹۸/۰۲	هرتز
دوم	۱۱۵/۰۱	هرتز
سوم	۱۳۴/۶۵	هرتز
چهارم	۱۶۲/۰۰	هرتز
پنجم	۲۴۵/۲۰	هرتز
ششم	۳۲۹/۳۰	هرتز
هفتم	۴۶۹/۰۳	هرتز
هشتم	۷۷۳/۰۲	هرتز

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی نیز دو فرکانس طبیعی ۲۴۵/۲۰ و ۴۶۹/۳ هرتز (این مقادیر در جدول ۴ برجسته شده‌اند) را برای پوسته استوانه‌ای نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حل عددی تطابق رضایت بخشی با

سانتی‌گراد، به ترتیب به فرکانس‌های $۲۶۵/۰۳$ و $۵۰۰/۰۳$ هرتز افزایش یافته‌اند.

جدول (۵): فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از حل عددی برای دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد

شکل مود	فرکانس	واحد
اول	۱۰۲/۴۴	هرتز
دوم	۱۲۰/۰۷	هرتز
سوم	۱۴۰/۰۳	هرتز
چهارم	۱۶۸/۰۰	هرتز
پنجم	۲۶۵/۰۳	هرتز
ششم	۳۳۵/۰۱	هرتز
هفتم	۵۰۰/۰۳	هرتز
هشتم	۷۸۰/۰۰	هرتز

۵-۳- مقایسه نتایج تست آکوستیک و حل عددی

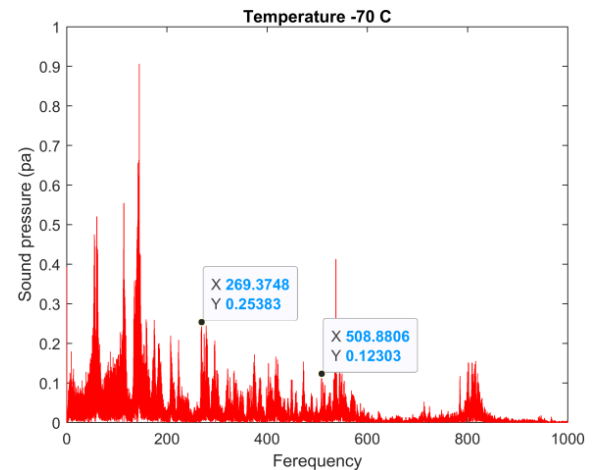
در جدول ۶ مقایسه بین نتایج تجربی تست آکوستیک و حل عددی برای دو فرکانس مرجع به دست آمده از روش چکش مودال آورده شده است. درصد خطا بر مبنای مقادیر به دست آمده از تست آکوستیک محاسبه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که اختلاف بین نتایج این دو روش با یکدیگر کمتر از ۲ درصد بوده است که این امر نشان می‌دهد نتایج هر دو روش حتی در دماهای پایین هم تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

جدول (۶): مقایسه فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از روش تجربی و حل عددی

دما	تجربی	عددی	خطا (%)
۲۵ درجه	۲۴۷/۳۲	۲۴۵/۲۰	۰/۸۶
	۴۷۰/۷۷	۴۶۹/۳۰	۰/۳۱
-۷۰ درجه	۲۶۹/۳۷	۲۶۵/۰۳	۱/۶۱
	۵۰۸/۸۸	۵۰۰/۰۳	۱/۷۴

نمودار FFT مربوط به نتایج تست آکوستیک برای دو حالت دمای ۲۵ و -۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور هم‌زمان در شکل ۱۳ آورده شده است. رنگ آبی بیانگر نتایج برای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رنگ قرمز نشان‌دهنده نتایج برای دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقایسه دو نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد که محل فرکانس‌های طبیعی پوسته با

می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود محل قله‌هایی که قبلاً در دمای محیط به‌عنوان فرکانس طبیعی استخراج شده بودند، در نمودار FFT جدید گرفته شده از داده‌های میکروفون برای دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد، دیگر دارای قله نیستند و مکان آن‌ها به فرکانس‌های بالاتر تغییر کرده است. به‌طور مثال دو قله مشخص شده در نمودار شکل ۱۰ در دمای محیط با کاهش دما به فرکانس‌های $۲۶۹/۳۷$ و $۵۰۸/۸۸$ هرتز تغییر یافته‌اند. در واقع با کاهش دما شاهد افزایش مقادیر فرکانس‌های طبیعی پوسته خواهیم بود.



شکل (۱۲): نمودار FFT مربوط به روش تست آکوستیک در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

۵-۲- نتایج حل عددی پوسته استوانه‌ای در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد توسط نرم‌افزار کامسول

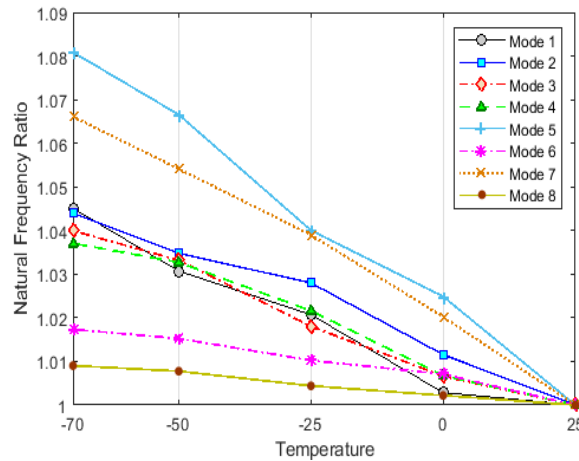
جهت به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی پوسته تحت سرمایش، مجدداً شبیه‌سازی و تحلیل آن برای حالتی که پوسته در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، توسط نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است. فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از این تحلیل اجزاء محدود برای پوسته استوانه‌ای تحت دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۵ آورده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقایسه نتایج جدول ۵ با نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد با کاهش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی افزایش یافته‌اند. به‌طور مثال مقادیر دو فرکانس طبیعی مرجع $۲۴۵/۲۰$ و $۴۶۹/۳۰$ هرتز با کاهش دما تا منفی ۷۰ درجه

جدول (۸): فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای در پنج دمای مختلف با استفاده از حل عددی

فرکانس	اول	دوم	سوم	چهارم
دمای ۲۵	۹۸/۰۲	۱۱۵/۰۱	۱۳۴/۶۵	۱۶۲/۰۰
دمای ۰	۹۸/۳۰	۱۱۶/۳۴	۱۳۵/۵۴	۱۶۳/۱۰
دمای -۲۵	۱۰۰/۰۵	۱۱۸/۲۳	۱۳۷/۰۸	۱۶۵/۵۰
دمای -۵۰	۱۰۱/۰۳	۱۱۹/۰۱	۱۳۹/۱۲	۱۶۷/۳۰
دمای -۷۰	۱۰۲/۴۴	۱۲۰/۰۷	۱۴۰/۰۳	۱۶۸/۰۰

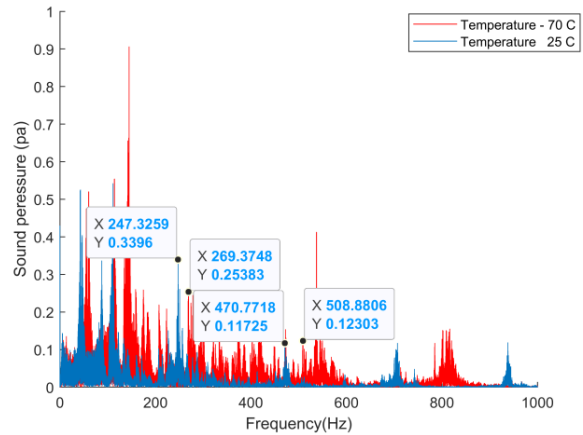
فرکانس	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
دمای ۲۵	۲۴۵/۲۰	۳۲۹/۳۰	۴۶۹/۰۳	۷۷۳/۰۲
دمای ۰	۲۵۱/۳۰	۳۳۱/۶۳	۴۷۸/۵۱	۷۷۴/۷۲
دمای -۲۵	۲۵۵/۰۲	۳۳۲/۶۷	۴۸۷/۳۲	۷۷۶/۴۲
دمای -۵۰	۲۶۱/۵۲	۳۳۴/۳۲	۴۹۴/۴۲	۷۷۹/۰۲
دمای -۷۰	۲۶۵/۰۳	۳۳۵/۰۱	۵۰۰/۰۳	۷۸۰/۰۰



شکل (۱۴): مقایسه نسبت مقادیر هشت فرکانس طبیعی اول سازه در دماهای مختلف.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی سازه افزایش پیدا می‌کنند اما میزان حساسیت هر یک از فرکانس‌های طبیعی سازه نسبت به تغییرات دما متفاوت می‌باشد. با توجه به شیب متفاوت هر یک از منحنی‌های مربوط به مودهای مختلف، مشخص است که حساسیت فرکانس مودهای پنجم و هفتم نسبت به تغییرات دما بیشتر از سایر فرکانس‌ها می‌باشد. همچنین

کاهش دما به منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده و مقداری افزایش را تجربه می‌کنند. قابل ذکر است که مقایسه نتایج حاصل از حل عددی توسط نرم‌افزار کامسول در دو دمای مذکور طبق جداول ۳ و ۴ نیز مؤید همین نتیجه می‌باشد. درصد تغییرات مقادیر فرکانس‌های طبیعی در اثر کاهش دما در جدول ۷ آورده شده است.



شکل (۱۳): مقایسه نمودار FFT برای دمای ۲۵ درجه

سانتی‌گراد و منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول (۷): درصد تغییرات فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای در اثر کاهش دما به روش تست آکوستیک

فرکانس	دمای ۲۵ °C	دمای -۷۰ °C	تغییرات (%)
پنجم	۲۴۷/۳۲	۲۶۹/۳۷	۸/۱۹
هفتم	۴۷۰/۷۷	۵۰۸/۸۹	۷/۵۰

مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه در اثر کاهش دما در پنج دمای ۲۵، ۰، -۲۵، -۵۰ و -۷۰ توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه و در جدول ۸ آورده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اثر سرد شدن سازه، تمامی مقادیر هشت فرکانس طبیعی آن افزایش یافته‌اند. در واقع با کاهش دما، سفتی سازه افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش فرکانس‌های طبیعی سازه می‌گردد.

برای بررسی میزان تأثیر کاهش دما روی فرکانس‌های طبیعی مختلف سازه، نسبت فرکانس‌های طبیعی به دست آمده در پنج دمای مختلف به فرکانس طبیعی به دست آمده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد توسط نرم‌افزار کامسول در شکل ۱۴ رسم شده است.

تست آکوستیک و نیز تحلیل اجزای محدود توسط نرم‌افزار کامسول بررسی نمود.

فرکانس مودهای هشتم و ششم کمترین تغییر را نسبت به کاهش دما از خود نشان داده‌اند.

۷- مراجع

[1] Zarastvand MR, Ghassabi M, Talebitooti R. Acoustic Insulation Characteristics of Shell Structures: A Review. Archives of Computational Methods in Engineering. 2021;28:505-523. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09387-z>.

[2] Chronopoulos D, Ichchou M, Troclet B, Bareille O. Thermal effects on the sound transmission through aerospace composite structures. Aerospace Science and Technology. 2013;30(1):192199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.08.003>.

[3] Rahmatnezhad K, Zarastvand MR, Talebitooti R. Mechanism study and power transmission feature of acoustically stimulated and thermally loaded composite shell structures with double curvature, Composite Structures. 2021;276:114557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114557>.

[4] Faran JJ. Sound Scattering by Solid Cylinders and Sphere. The Journal of the acoustical society of America. 1951;23:405-418. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1906780>.

[5] Junger MC. Sound scattering by thin elastic shells, Journal of the Acoustical Society of America. 1952;24:366-373. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1906905>.

[6] Leissa W. Vibration of Shells US Government Printing Office, Washington, DC, 1973; (NASA SP-288). DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1906905>.

[7] Blevins RD. Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. Van Nostrand Reinhold. New York. 1979. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3153712>.

[8] Soedel W. A new frequency formula for closed circular cylindrical shells for a large variety of boundary conditions. Journal of Sound and Vibration. 1980;70(3): 309-317. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(80\)90301-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(80)90301-6).

[9] Huang NN, Tauchert TR. Thermally induced vibration of doubly curved cross-ply laminated panels. Journal of Sound and Vibration. 1992;154(3):485-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(80\)90301-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(80)90301-6).

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه تجربی و عددی تأثیر کاهش دما روی فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای فولادی مورد بررسی قرار گرفت. برای تخمین تجربی فرکانس‌های طبیعی پوسته از دو روش آزمایشگاهی غیرتماسی با استفاده از بلندگو جهت تحریک آکوستیکی سازه و روش تماسی چکش مودال استفاده شد. همچنین به کمک نرم‌افزار المان محدود کامسول به حل عددی مسئله تجربی و شبیه‌سازی آن پرداخته شد. تطابق مناسب بین نتایج تجربی روش تست آکوستیک در دمای محیط با نتایج تست چکش مودال و نتایج حل عددی نرم‌افزار، اعتبار روش آزمون و صحت نتایج شبیه‌سازی را تضمین می‌کند. در ادامه مجدداً تست آکوستیک روی پوسته استوانه‌ای نمونه و حل المان محدود توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام و فرکانس‌های طبیعی جدید سازه اندازه‌گیری و ثبت گردید. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تست آزمایشگاهی و حل المان محدود مشاهده می‌شود که در دماهای پایین نیز تطابق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد. نتایج حاصله نشان دادند که با کاهش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی سازه، افزایش می‌یابند. در واقع اعمال بار سرمایش علاوه بر افزایش سفتی سیستم، فرکانس‌های طبیعی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. نتایج حل عددی نشان دادند که میزان حساسیت هر یک از فرکانس‌های طبیعی سازه در برابر تغییرات دما متفاوت از یکدیگر می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با دقت قابل قبولی (با خطای کمتر از ۰.۲٪) می‌توان فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای را در دماهای مختلف از طریق حل عددی المان محدود و به کمک نرم‌افزار کامسول محاسبه نمود.

به‌عنوان پژوهش‌های بعدی می‌توان علاوه بر اثرات سرما، تأثیر افزایش دما را در ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از جنس‌های مختلف نظیر کامپوزیت‌ها و یا مواد تابعی مدرج روی ارتعاشات آزاد و نیز خواص آکوستیکی آن‌ها به روش

- Materials. 2015;17(5):511-45. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/1099636215577363>.
- [20] Mahapatra TR, Panda SK, Kar VR. Geometrically nonlinear flexural analysis of hygro-thermo-elastic laminated composite doubly curved shell panel. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2016;12(2):153-71. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s10999-015-9299-9>.
- [21] Malekzadeh Fard K, Gholami M, Pourmoayed A.R. Free Vibration and Buckling Analysis of Cylindrical Sandwich Panel with Flexible Core and Magneto Rheological Fluid Layers. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2016;14(4):1-19. (In Persian). **DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1397.14.4.1.7>.
- [22] Xin FX, Gong JQ, Ren SW, Huang LX, Lu TJ. Thermoacoustic response of a simply supported isotropic rectangular plate in graded thermal environments *Applied Mathematical Modelling*. 2017;44:456-69. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.02.003>.
- [23] Mousavi SA, Kafash Mirza Rahimi M, Mahjoub S. Vibrations of a Rotating Functionally Graded Cylindrical Shell under Pressure with Ring and Stringer Stiffened. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2019;15(4):1-14. (In Persian) **DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1398.15.4.1.4>.
- [24] Mousavi SA, Elhami MR, Kafash Mirza Rahimi M, Kharestany AA. Dynamic and Vibration Analysis of Composite Cylindrical Shell with Piezoelectric Layers. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2019;16(2):15-25. (In Persian). **DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1395.12.1.6.2>.
- [25] Trinh MC, Nguyen DD, Kim SE. Effects of porosity and thermomechanical loading on free vibration and nonlinear dynamic response of functionally graded sandwich shells with double curvature. *Aerospace Mechanics*. 2019;87:119-32. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.02.003>.
- [26] Mamandi A, Salimzadeh M. Nonlinear Vibration analysis of a composite cylindrical shell with internal pressure, subjected to a low velocity impact using analytical and FE methods. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2020;16(3):59-73. (In Persian). **DOI:** <https://dor.isc.ac/dor/dor:%2020.1001.1.26455323.1399.16.3.5.3>.
- [10] Chang JS, Shyong JW. Thermally induced vibration of laminated circular cylindrical shell panels. *Composites Science and Technology*. 1994;51(3):419-27. **DOI:** [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0266-3538(94)90110-4).
- [11] Parhi PK, Bhattacharyya SA, Sinha PK. Hygrothermal effects on the dynamic behavior of multiple delaminated composite plates and shells. *Composites Science and Technology*. 2001;248(2):195-214. **DOI:** [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0266-3538(94)90110-4).
- [12] Reddy JN. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells*. 2nd edn. CRC Press, New York. 2004; **DOI:** <https://doi.org/10.1201/9781498711067>.
- [13] Soedel, Werner. Similitude approximations for vibrating thinshells. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, 49.5B: 1535-1541. **DOI:** <https://doi.org/10.1121/1.1912530>.
- [14] Ribeiro P, Jansen E. Non-linear vibrations of laminated cylindrical shallow shells under thermomechanical loading. *Journal of Sound and Vibration*. 2008;315(3):62640. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.017>.
- [15] Zhao X, Lee YY, Liew KM. Thermoelastic and vibration analysis of functionally graded cylindrical shells. *International Journal of Mechanical Sciences* 2009;51(9-10):694707. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.08.001>.
- [16] Nanda N, Pradyumna S. Nonlinear dynamic response of laminated shells with imperfections in hygrothermal environments. *Composites Science and Technology*. 2011;45(20):210312. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.08.001>.
- [17] Van Tung H, Duc ND. Nonlinear response of shear deformable FGM curved panels resting on elastic foundations and subjected to mechanical and thermal loading condition. *Applied Mathematical Modelling*. 2014;38(1112):284866. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.015>.
- [18] Xiangyang Li, Kaiping Yu, Vibration and acoustic responses of composite and sandwich panels under thermal environment, *Composite Structures*. 2015;131:1040-1049. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.037>.
- [19] Mahapatra TR, Kar VR, Panda SK. Nonlinear free vibration analysis of laminated composite doubly curved shell panel in hygrothermal environment. *Journal of Sandwich Structures &*

<https://doi.org/10.1080/01495739.2023.2271525>.

[35] Chakraborty S, Singh V, Dey T, Kumar R. Influence of carbon nanotubes on stability and vibration characteristics of plates and panels in thermal environment: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024;31(1):147-178. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09976-z>.

[36] Chen YH, Chen KT, Chaing YH. Plate-Damping Measurements in a Single Reverberation Room. *Applied Acoustics*. 1996;47:251-261, **DOI:** [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)00052-B](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)00052-B).

[37] Farshidianfar A, Farshidianfar M. H, Crocker J, Smith O. Vibration analysis of long cylindrical shells using acoustical excitation, *Journal of Sound and Vibration*. 2011;330(14):3381-3399, **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.02.002>.

[38] Wu D, Wang Y, Pu Y, Shang L, Gao Z. Experimental investigation of high temperature thermal-vibration characteristics for composite wing structure of hypersonic flight vehicles. *Journal of Vibroengineering*. 2015;17(2):917927.

[39] Koukounian VN, Mechefske CK. Computational Modelling and Experimental Verification of the Vibroacoustic Behavior of Aircraft Fuselage Sections. *Applied Acoustics*, 2018;132:8-18. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.004>.

[40] Ding Z, Bai H, Wu Y, Zhu Y, Shao Y. Experimental Investigation of Thermal Modal Characteristics for a Ship's Foundation under 300°C. *Shock and Vibration*. 2019;9:1-11. **DOI:** <https://doi.org/10.1155/2019/2714930>.

[41] Zippo A, Barbieri M, Iarriccio G. et al. Nonlinear vibrations of circular cylindrical shells with thermal effects: an experimental study. *Nonlinear Dynamics*. 2020;99:373-391. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s11071-018-04753-1>.

[27] Ahmadi H, Bayat A, Duc ND. Nonlinear forced vibrations analysis of imperfect stiffened FG doubly curved shallow shell in thermal environment using multiple scales method. *Composite Structures*. 2021;256:113090. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113090>.

[28] M. Zarei, G. Rahimi, Effect of boundary condition and variable shell thickness on the vibration behavior of grid-stiffened composite conical shells, . 2022; *Applied Acoustics*. 188: 108546. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108546>.

[29] Elhami M, Azarion H, Vahedi K. Sound transmission loss of a sandwich cylindrical shell with piezoelectric patches and functionally graded materials core. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022;18(1):91-104. (In Persian). **DOR:** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.1.6.4>.

[30] Grigorenko OY, Borisenko MY, Boychuk OV. et al. Numerical Determination of Natural Frequencies and Modes of Closed Corrugated Cylindrical Shells. *International Applied Mechanics*. 2022;58:520-532. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01177-2>.

[31] Ebrahimi Z. Free vibration and stability analysis of a functionally graded cylindrical shell embedded in piezoelectric layers conveying fluid flow. . 2023; 29. *Journal of Vibration and Control* (1112),25152527. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/10775463221081184>.

[32] Yuan W, Liao H, Gao R, et al. Vibration and sound transmission loss characteristics of porous foam functionally graded sandwich panels in thermal environment. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2023;44,897-916. **DOI:** <https://doi.org/10.1007/s10483-023-3004-7>.

[33] Shadmani M, Afsari A, Jahedi R, Kazemzadeh-Parsi M. J. Nonlinear free vibrational behavior of temperature-dependent two-directional functionally graded truncated cone-like shells in thermal environment. *Journal of Vibration and Control*. 2024;10775463241228742. **DOI:** <https://doi.org/10.1177/10775463241228742>.

[34] Babaei M. J, Jafari A. A. Effect of thermal environment on the free vibration of functionally graded carbon nanotubes cylindrical conical shell. *Journal of Thermal Stresses*. 2024;47(1): 35-58. **DOI:**