

Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Cold on Sound Transmission from a Steel Cylindrical Shell

Maisam Parhikhteh¹, Omid Mohammadpour², Reza Ahmadi^{2*} , Mahdi Karimi¹

¹ Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Mechanical Engineering Department, Payame Noor University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: June 29, 2025

Revised: November 10, 2025

Accepted: November 30, 2025

ePublished: December 24, 2025

ABSTRACT

In this research, the effect of cold on the sound transmission rate in a steel cylindrical shell is examined through both experimental and numerical methods. As the temperature decreases, the mechanical properties of the shell, including the elastic modulus, change, which impacts the vibrational behavior and consequently the sound transmission through the shell. To investigate this issue experimentally, the structure was excited using an acoustic testing chamber where acoustic waves were sent, and the sound pressure level passing through the shell was measured at two different temperatures: 25°C and -70°C. In the numerical analysis section, finite element modeling of the cylindrical shell was conducted using COMSOL software, and the acoustic vibrational analysis was performed numerically on the model at the two specified temperatures. The results of the numerical simulation matched very well with the experimental results, indicating that the numerical model is capable of adequately predicting the acoustic vibrational behavior of the shell at different temperatures. Furthermore, the findings of this research demonstrated that temperature significantly influences the sound transmission mechanism in cylindrical shell structures, and as the temperature decreases, the sound pressure level passing through the shell decreases. Therefore, with a thorough understanding of this matter, it is possible to design more optimized solutions for reducing noise and vibrations in such structures under the effects of temperature gradients in thermal environments.

Keywords: Sound Transmission, Cylindrical Shell, Temperature Variations, COMSOL, Acoustic Chamber

How to cite this article

Parhikhteh M, Mohammadpour O, Ahmadi R, Karimi M, Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Cold on Sound Transmission from a Steel Cylindrical Shell. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(01):53-63.

*Corresponding author's email: rahmadi@pnu.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-7284-2221



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



تحلیل تجربی و عددی اثر سرما بر روی انتقال صوت از یک پوسته استوانه‌ای فولادی

میثم پرهیخته^۱، امید محمد پور^{۲*}، رضا احمدی^{۲*}  مهدی کریمی^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تأثیر سرما بر میزان انتقال صوت در یک پوسته استوانه‌ای فولادی به دو روش تجربی و حل عددی پرداخته شده است. با کاهش دما، خواص مکانیکی پوسته از جمله مدول الاستیسیته تغییر می‌یابد که این امر بر رفتار ارتعاشی و در نتیجه میزان انتقال صوت از طریق پوسته تأثیر می‌گذارد. برای بررسی تجربی این مسأله، با استفاده از اتاق تست آکوستیک و با ارسال امواج آکوستیکی، سازه مذکور تحریک شده و میزان فشار صوت عبوری از این پوسته در دو دمای متفاوت ۲۵ و ۷۰- درجه سانتی-گراد اندازه‌گیری شده است. در بخش تحلیل عددی نیز، مدل‌سازی المان محدود پوسته استوانه‌ای در نرم‌افزار کامسول انجام شده و تحلیل ارتعاشی آکوستیکی بصورت عددی بر روی مدل در دو دمای مذکور صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی داشته و نشان داد که مدل عددی قادر به پیش‌بینی مناسب رفتار ارتعاشی صوتی پوسته در دماهای مختلف است. همچنین نتایج این پژوهش نشان دادند که دما به عنوان یک پارامتر مهم بر مکانیزم انتقال صوت در سازه‌های پوسته استوانه‌ای تأثیرگذار بوده و با کاهش دما، سطح فشار صوت عبوری از پوسته کاهش می‌یابد. بر این اساس، با درک دقیق این مکانیزم می‌توان طراحی‌های بهینه‌تری برای کاهش صوت و ارتعاش چنین سازه‌هایی تحت اثر گرادیان دما در محیط‌های حرارتی انجام داد.

کلیدواژه‌ها: انتقال صوت، پوسته استوانه‌ای، تغییرات دما، کامسول، اتاق آکوستیک

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

نحوه ارجاع به این مقاله

پرهیخته میثم، محمد پور امید، احمدی رضا، کریمی مهدی، تحلیل تجربی و عددی اثر سرما بر روی انتقال صوت از یک پوسته استوانه‌ای فولادی، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۳-۵۳:۲۶(۰۱):۱۴۰۴.

* پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rahmadi@pnu.ac.ir

* شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۷۲۸۴-۲۲۲۱-۰۰۰۰-۰۰۰۰



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

امروزه سازه‌های پوسته‌ای استوانه‌ای به دلیل ویژگی‌هایی از جمله ظرفیت تحمل بار و استحکام مکانیکی بالا، توانایی ایجاد فضاهای بسته، شکل پذیری مناسب و غیره بطور گسترده در ساخت سازه‌هایی مانند هواپیماها، موشک‌ها، زیر دریایی‌ها، مخازن تحت فشار و سایر سازه‌های مهندسی بکار گرفته می‌شوند [۱-۲].

از آنجا که اغلب این سازه‌ها در معرض بارهای مختلف حرارتی و یا رطوبتی قرار دارند، با کاهش دما، سفتی و مقاومت سازه تغییر کرده و خواص ارتعاشی و آکوستیکی آنها را دستخوش تغییر می‌کند [۳]. لذا بررسی و تحلیل آکوستیکی چنین سازه‌هایی تحت اثر گرادیان دما در محیط‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ این اهمیت سبب شده است که این موضوع برای سالها در کانون توجه پژوهشگران قرار گیرد. از این رو این موضوع سالها در کانون توجه بوده و بررسی انتقال صوت در سازه‌های منحنی شکل و پوسته‌های استوانه‌ای از اواسط قرن بیستم توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. سرآغاز مطالعات در زمینه پوسته‌های استوانه‌ای به مطالعات آقای اسمیت و جانگر بر روی سازه‌های منحنی شکل برمی‌گردد [۴-۵].

اما در چند دهه اخیر بررسی اثر تغییرات دما و گرادیانهای حرارتی بر روی رفتار ارتعاشی و صوتی سازه‌های مختلف از جمله ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای و دوانحایی مورد توجه پژوهشگران بوده است که در ادامه مطالعات اخیر انجام شده در این زمینه بیان شده‌اند.

جیراج و همکارانش [۶] به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود بر روی ویژگیهای ارتعاشی و پاسخ صوتی یک صفحه مستطیلی همسانگرد در یک محیط حرارتی مطالعه نمودند. ایشان [۷] در ادامه تحقیقاتشان، با در نظر گرفتن خاصیت ذاتی میرایی مواد کامپوزیتی، پژوهش‌های قبلی خود را برای یک صفحه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف در یک محیط حرارتی توسعه دادند. در پژوهشی دیگر، ایشان [۸] مطالعات خود را بر روی تحلیل خواص ارتعاشی- آکوستیکی یک صفحه ساندویچی ویسکوالاستیک چند لایه تحت یک میدان حرارتی معطوف ساختند. در این تحقیق، اثرات پارامترهایی از قبیل ضخامت و نوع هسته ویسکوالاستیک، تعداد لایه‌ها و نوع میدان حرارتی بر روی ارتعاشات آکوستیک این سازه مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۳ پناسامی و همکارش [۹] به مطالعه انتشار امواج سه بعدی از یک پنل استوانه‌ای مغناطیسی ایزوتروپیک که در معرض گرما قرار دارد، پرداختند. کرونیوپولوس و همکارانش [۱۰] اثرات تغییرات دما را بر روی عایق‌های صوتی صفحات کامپوزیتی با توجه به اندازه‌گیری عددی به روش موج المان محدود و تست آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات ژیانگ یانگ و همکارش [۱۱] بر روی پاسخ ارتعاشی و صوتی پنل‌های 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 تغییر شکل برشی به‌دست آمده‌اند. لی و همکارش [۱۲] مطالعات تحلیلی خود را در رابطه با ویژگی‌های ارتعاشی و تابش صوت از یک صفحه مستطیلی چند لایه انجام دادند و اثرات محیط‌های حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. یانگ و همکارانش [۱۳] مشخصات ترموآکوستیکی یک سازه ساخته شده از موارد تابعی مدرج را ارائه داده‌اند. در این پژوهش، معادلات حرکت براساس تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی بدست آمده و مقدار تابش صوتی این سازه با استفاده از انتگرال ریلی محاسبه شده است. نتایج ایشان نشان می‌دهد که تغییرات دما و توزیع مواد، اثر قابل توجهی در ویژگیهای صوتی سازه خواهند داشت. ژین و همکارانش [۱۴] به بررسی عملکرد ترموآکوستیکی یک صفحه ایزوتروپیک با تکیه گاه ساده که در معرض ترکیبی از تحریک‌های گرمایی و آکوستیکی قرار دارد، به روش تحلیلی پرداختند. ایشان از محیط‌های حرارتی درجه بندی شده که از اهمیت بالایی به ویژه در ساخت هواپیما برخوردار هستند، استفاده نموده است.

در سال ۲۰۱۸، لی و همکارش [۱۵] یک راه حل نظری برای در نظر گرفتن اثر گرادیانهای حرارتی بر روی پاسخ‌های دینامیکی و آکوستیکی یک صفحه ساندویچی در تمام شرایط مرزی، ارائه دادند. برای این منظور، آنها از تکنیک برهم‌نهی مودها و روش انتگرال ریلی، استفاده کردند. پژوهشی دیگری توسط ایشان [۱۶] با موضوع کاهش صدا در پنل‌های کامپوزیت لایه‌ای و ساندویچی تحت بارهای حرارتی انجام شده است که بر روی افت انتقال صدا این سازه‌ها متمرکز شده است. شارما و همکارانش [۱۷] برای تجزیه و تحلیل عددی ارتعاشاتی و صوتی یک پنل تخت کامپوزیت لایه‌ای در محیط حرارتی، یک مدل اجزاء محدود را در چارچوب تئوری تغییر شکل برشی ارائه کردند. ایشان در مطالعات دیگری [۱۸-۱۹]، از طریق یک فرمول‌بندی جدید المان‌های محدود و مرزی کوپل شده بر اساس نظریه تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر، رفتار ترموآکوستیکی پانل‌های تخت و منحنی‌الشکل ساندویچی کامپوزیت لایه‌ای که تحت بارگذاری هارمونیک در یک محیط حرارتی بالا قرار دارند را مورد بررسی قرار دادند. ایشان [۲۰-۲۱] در ادامه تحقیقاتشان، به بررسی اثرات همزمان حرارت و رطوبت بر روی رفتار ارتعاشات-آکوستیکی پنل‌ها و پوسته‌های کامپوزیت لایه‌ای و ساندویچی چند لایه پرداختند. ژو و همکارانش [۲۲]، به بررسی اثرات تغییرات دما بر ارتعاشات و ویژگیهای تابش صوتی یک صفحه ساخته شده از جنس مواد تابعی مدرج متخلخل پرداختند. در این پژوهش، روابط براساس تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی و وابستگی ویژگی‌های ماده به دما استخراج شده‌اند. رحمت‌نژاد و همکارانش [۲۳] به روش تحلیلی و با کمک سری‌های فوریه دوگانه، پاسخ صوتی یک پوسته کامپوزیت دوانحایی در یک

در مطالعه دیگری، کومار و همکارانش [۳۳] ویژگی‌های پاسخ ترموآکوستیکی پنل‌های تحت کامپوزیتی ساخته شده از فایبرپوکسی با نانولوله‌های کربنی چند جداره گزارش کردند. پاسخ صوتی سازه تحت تحریک هارمونیک و در یک محیط حرارتی یکنواخت و به دو روش عددی (FEM/BEM) و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۲۴، ویژگی‌های ارتعاشی-آکوستیکی یک پوسته استوانه‌ای تقویت شده در زیر آب توسط تانگ و همکارانش [۳۲] با استفاده از روش‌های تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه‌گیری‌های تجربی در یک اتاق بدون انعکاس و تحت تحریک‌های نویز سفید انجام شده‌اند. لی و همکارانش [۳۴] برای تایید قابلیت کاربرد روش عددی SEA برای تحلیل‌های ارتعاشی و صوتی برای سازه‌های دریایی، با استفاده از یک میدان صوتی پژواک و با اندازه‌گیری توان منبع صوتی، بصورت تجربی به مطالعه مدل ساده شده بدنه یک کشتی پرداختند. محمدی و همکاران [۳۵] به بررسی تأثیر دما بر انتقال صوت در ساختارهای کامپوزیتی تحت بار حرارتی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرات دما می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مشخصات انتقال صوت در این نوع ساختارها را تحت تأثیر قرار دهد. رضایی و همکاران [۳۶] به مدل سازی و شبیه سازی انتقال صوت و رفتار وایبره در پنل‌های کامپوزیتی در شرایط حرارتی پرداختند. نویسندگان با استفاده از روش‌های عددی، اثرات حرارت بر روی خاصیت‌های وایبره‌ای و صوتی این پنل‌ها را بررسی کرده‌اند.

با مرور مقالات ارائه شده در حوزه بررسی اثر گرادیانهای حرارتی بر روی رفتار آکوستیکی ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای در حضور تغییرات دمایی، مشخص شد که تاکنون اکثر پژوهش‌های انجام شده به روش تحلیلی و عددی صورت گرفته است و این مسأله بصورت تجربی بویژه به روش تست آکوستیک کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. لذا نوآوری اصلی این تحقیق، مطالعه تجربی تأثیر کاهش دما بر رفتار آکوستیکی و سطح فشار صوت عبوری از پوسته‌های استوانه‌ای به روش تجربی تست آکوستیک می‌باشد. انجام شبیه‌سازی در نرم افزار کامسول و تطابق قابل قبول نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی نرم افزاری، بیانگر دقت و کیفیت مطلوب تستهای انجام شده در پژوهش است.

۲- آزمایش های تجربی

۲-۱- مشخصات هندسی پوسته استوانه‌ای تحت آزمایش

نمونه مورد آزمایش، یک پوسته استوانه‌ای با قطر خارجی ۱۶۸/۳ میلیمتر، ضخامت ۶/۳ میلیمتر و طول ۵۵۰ میلیمتر و از جنس آلایژ ASTM A106 می‌باشد که مشخصات کامل در جدول ۱ آمده است.

محیط حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. معادلات حرکت سازه با در نظر گرفتن تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی پوسته‌های کم عمق و با استفاده از اصل همیلتون استخراج شده‌اند.

پژوهشی دیگری در سال ۲۰۲۳ توسط یوان و همکارانش [۲۴] با موضوع بررسی عملکرد ارتعاشی و افت انتقال صوت از صفحات ساندویچی متخلخل ساخته شده از مواد تابعی مدرج تحت تأثیر میدان دمایی انجام شده است. معادلات دینامیکی سیستم بر اساس اصل همیلتون و با استفاده از تئوری مرتبه بالاتر تغییر شکل برشی استخراج شده‌اند. در سال ۲۰۲۳، باسکار و همکارانش [۲۵]، به بررسی عددی ویژگی‌های ارتعاشی-آکوستیکی یک پانل منحنی GFRP که در معرض دمای غیریکنواخت محیط قرار گرفته است، با استفاده از نرم افزار انسیس پرداختند.

وانگ و همکارش [۲۶] رفتار آکوستیکی صفحات ساندویچی لانه زنبوری تحت محیط حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. معادلات حرکت بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول استخراج شده و به کمک روش بسط مودال حل شده‌اند و نهایتاً نتایج حل تحلیل با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده‌اند. صفاری و همکارانش [۲۷] به بررسی افت انتقال صوت از طریق صفحات مستطیلی دو جداره ساندویچی هوشمند مغناطیسی الکتروالاستیک (MEE) با هسته تابعی مدرج متخلخل (PFGM) که در معرض یک جریان هوای خارجی و توزیع دمایی یکنواخت و غیر یکنواخت قرار گرفته است، به روش تحلیلی و با استفاده از اصل همیلتون و به کمک سری های فوریه دوگانه پرداختند.

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که در رابطه با تحلیل آکوستیکی پوسته های استوانه‌ای بویژه در حضور تغییرات دمایی، پژوهش‌های بسیار محدودی به صورت تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. بطور مثال وو و همکارانش [۲۸] در سال ۲۰۱۵ به بررسی تجربی ویژگی‌های ارتعاش حرارتی با دمای بالا برای سازه بال کامپوزیتی تجهیزات پرنده مافوق صوت پرداختند. در سال ۲۰۱۸، کوکونیانو و همکارش [۲۹] برای مطالعه رفتار آکوستیکی بدنه هواپیما هنگامی که در معرض یک جریان لایه مرزی متلاطم قرار دارد، از روش آزمایشگاهی اتاق انتقال استفاده کردند. انتقال صوت از طریق پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک به دو صورت تحلیلی و تجربی توسط اولیازاده و همکارانش [۳۰] مورد مطالعه قرار گرفته است. ایشان یک مدل نظری مبتنی بر روش تحلیل انرژی آماری (SEA) برای محاسبه کاهش نویز و افت انتقال صدا از پوسته استوانه‌ای توسعه دادند. در پژوهش دیگری [۳۱]، ایشان به بررسی تحلیلی و تجربی انتقال صدا از طریق صفحات مستطیلی جدار نازک تک و دو جداره با طول محدود پرداختند. روش تحلیلی بر اساس روش تحلیل انرژی آماری (SEA) انجام شده است و در بخش تجربی، سه روش اتاق انتقال، روش شدت صوت با رویکرد مستقیم و با رویکرد غیرمستقیم برای اندازه‌گیری افت انتقال صوت بکار برده شده است.



شکل ۱ تصویر اتاق آکوستیک

Figure 1 Illustration of the acoustic chamber

۳-۲-۲- محفظه حرارتی

جهت اعمال دما بر روی نمونه ساخته شده، از یک محفظه حرارتی با کنترل PID استفاده شده است. محفظه داخلی از جنس استیل ضد زنگ ساخته شده و ابعاد داخلی آن $70 \times 70 \times 100$ سانتی‌متر است. این محفظه قادر است دمایی بین منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد تا مثبت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 2 درجه سانتی‌گراد ایجاد کند و نرخ تغییر دمای آن ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه است. شکل ۲ نمای شماتیک از محفظه و نحوه قرارگیری نمونه استوانه‌ای در داخل آن را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲- روش انجام تست آکوستیک بر روی پوسته استوانه‌ای

جهت اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی و تعیین سطح فشار صوت عبوری پوسته استوانه‌ای، آزمایشی به شرح زیر طراحی و اجرا شده است. در ابتدا با قرار دادن درپوش‌ها در دو طرف پوسته استوانه‌ای، آن را کاملاً بسته و مطابق شکل ۳، با استفاده از چند طناب به پایه‌های فلزی آویزان شد. سپس، دو عدد میکروفون در داخل و خارج پوسته نصب گردید تا پاسخ ارتعاشی پوسته را در برابر تحریک صوتی را

جدول ۱ مشخصات مکانیکی پوسته استوانه‌ای

Table 1 Mechanical properties of the cylindrical shell

Unit	Value	Parameter
GPa	200	Modulus of Elasticity
Kg/m ³	7800	Density
----	0.3	Poisson's Ratio

۲-۲-۲- تست آکوستیک بر روی پوسته استوانه‌ای

برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد در اندازه‌گیری سطح فشار صوت عبوری از پوسته استوانه‌ای در دو دمای متفاوت ۲۵ و ۷۰- درجه سانتی‌گراد، از روش تحریک آکوستیکی در داخل اتاق انعکاسی استفاده شده است. با توجه به تأثیر عوامل محیطی بر نتایج آزمایش، شرایط اتاق آکوستیک به دقت کنترل شده و آزمایش در هر دما سه بار تکرار شده است و حداکثر درصد خطای استاندارد آزمایش در دمای ۲۵ درجه ۴ درصد و در دمای ۷۰- درجه کمتر از ۶ درصد اندازه‌گیری شد [۳۷].

۱-۲-۲- مشخصات اتاق آکوستیک

آزمایش‌ها در یک اتاق آکوستیکی پربازتاب با ابعاد داخلی $2 \times 2 \times 2$ متر انجام شد. تمام سطوح داخلی محفظه (دیوارها، سقف و کف) با فوم پلی اورتان سلول باز با دانسیته ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۵ سانتی‌متر پوشیده شده است. این محفظه می‌تواند برای بررسی رفتار ارتعاشی سازه‌های، توسعه سیستم‌های صوتی، کالیبراسون میکروفون‌ها و مطالعه خواص آکوستیکی مواد مختلف مورد استفاده قرار گیرد. تصویری از این اتاق آکوستیک در شکل ۱ قابل مشاهده است. برای تحریک صوتی پوسته استوانه‌ای از یک بلندگوی Pioneer نوع CS-G405 استفاده شده است که توانایی پوشش بازه فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را دارد.

۲-۲-۲- مشخصات میکروفون و نحوه قرارگیری آن

برای اندازه‌گیری دقیق سطح فشار صوت داخل پوسته در این آزمایش، از میکروفون نوع PCB PIEZOTRONICS مدل 378C01 با دقت اندازه‌گیری ۳ دسی بل استفاده شده است. قابل ذکر است علاوه بر میکروفون داخل پوسته استوانه‌ای، یک میکروفون نیز در خارج از پوسته تعبیه شده است تا از یکسان بودن شرایط در اتاق آکوستیک و شدت صدای تولیدی در حالات مختلف تست اطمینان حاصل گردد. برای انجام آزمایش، سیستم به گونه‌ای طراحی شده که با استفاده از یک دسته قابل تنظیم، امکان تغییر موقعیت میکروفون در داخل پوسته فراهم شده است. قابل ذکر است که داده‌ها با نرخ فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز توسط میکروفون تعبیه شده در داخل پوسته نمونه برداری شده‌اند.

استقلال شبکه از حل، فرکانس‌های طبیعی سازه و سطح انتقال صوت در دو دمای ۲۵ و منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. برای بررسی حساسیت مدل به مش و دستیابی به تعداد المان بهینه مدل اجزاء محدود، مدل برای پنج اندازه مختلف المان (مطابق جدول ۲)، در دمای محیط حل گردیده و مقادیر سطح فشار صوت عبوری از پوسته در محدوده فرکانسی کمتر از ۴۰۰۰ هرتز در هر حالت محاسبه شده‌اند. در شکل ۴ نمودار استقلال نتایج از شبکه بندی مدل اجزاء محدود و همگرایی نتایج برای هشت فرکانس مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲ پوسته استوانه‌ای داخل محفظه حرارتی

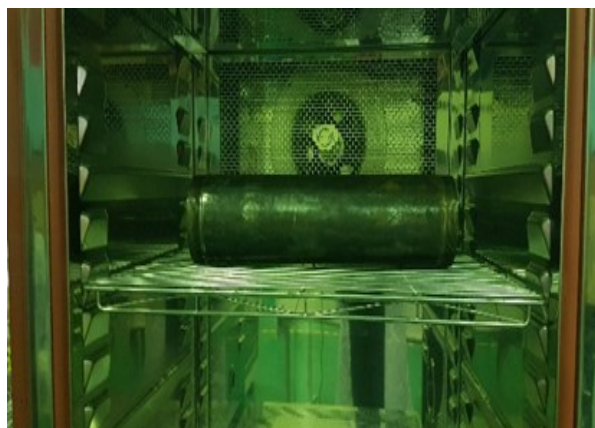
Figure 2 Cylindrical shell inside the thermal chamber



شکل ۳ تصویر داخل اتاق آکوستیک و نحوه آماده سازی نمونه جهت تست

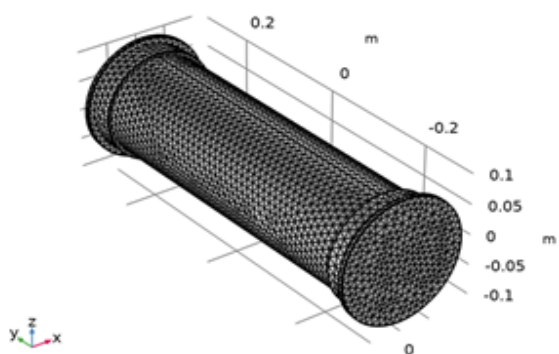
Figure 3 Interior view of the acoustic chamber and sample preparation for testing

ثبت نماید. در مرحله بعد، پوسته توسط یک بلندگوی پهن‌بند با پاسخ فرکانسی ۴ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز که در داخل اتاق آکوستیک قرار داشت، در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) تحت تحریک امواج صوتی قرار گرفت. سیگنال‌های دریافتی از میکروفون‌ها که در حوزه زمان بودند، به نرم‌افزار متلب منتقل شده و با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) به حوزه فرکانسی تبدیل شدند. در ادامه، پوسته استوانه‌ای به داخل محفظه حرارتی منتقل شده و بعد از سرد شدن، بلافاصله به داخل اتاق آکوستیک منتقل شده و مجدداً آزمایش بر روی پوسته در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد انجام و داده‌ها ثبت می‌گردند.



۳- شبیه سازی عددی

برای حل عددی، مدل سه بعدی از پوسته استوانه‌ای به همراه صفحات کناری و میله هدایت کننده میکروفون در نرم‌افزار کامسول شبیه سازی شد. در این شبیه سازی، هندسه و مشخصات مواد مدل پوسته مطابق با نمونه تست واقعی (جدول ۱) تعریف شده است. قابل ذکر است که تغییرات مدول الاستیسیته بر حسب دما از مقادیر تجربی گزارش شده در مراجع [۳۸-۳۹] برای فولادهای کم کربن از جمله فولاد ASTM A106 اقتباس شده و در شبیه سازی عددی، مقدار مدول الاستیسیته در دمای ۷۰- درجه سانتی‌گراد برابر ۲۰۸/۶۵ گیگا پاسکال در نظر گرفته شده است همچنین از آنجا که تغییرات میرایی (ضریب اتلاف) برای فولادهای کربنی در دماهای پایین ناچیز می‌باشد، لذا در این پژوهش در شبیه سازی عددی، از اثرات دما بر میرایی پوسته استوانه‌ای تک جداره که می‌تواند بر پاسخ آکوستیکی آن تأثیر بگذارد، صرف نظر شده است [۴۰-۴۱]. بعد از انجام عملیات مش بندی مدل و پس از اعمال شرایط مرزی به صورت مدل دو سر آزاد بر روی پوسته و بارگذاری مربوطه، تحلیل صورت گرفت. جهت المان بندی اجزای مختلف پوسته از المان - های تترا هدرال استفاده شده است. در نهایت پس از بررسی

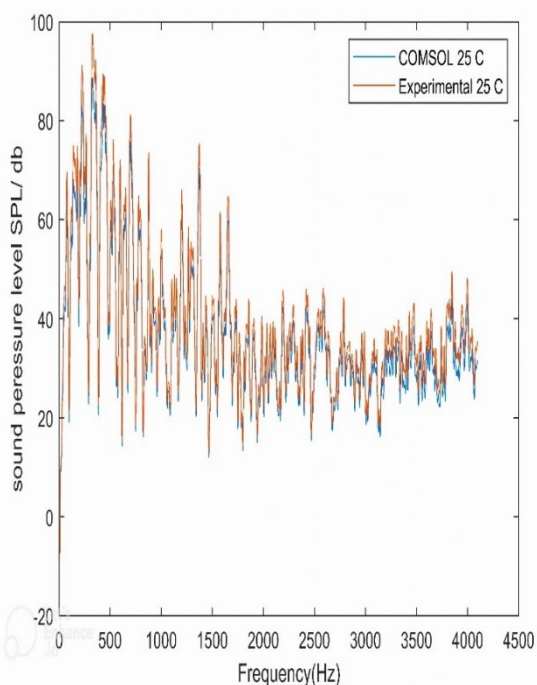


شکل ۵ شبیه سازی پوسته در نرم افزار کامسول

Figure 5 Simulation of the shell in COMSOL software

۴- اعتبار سنجی

برای اعتبارسنجی روند انجام و صحت نتایج حاصل از تست تجربی آکوستیک، سطح فشار صوت داخل پوسته استوانه‌ای بر حسب دسی بل حاصل از نتایج تست آکوستیک با نتایج شبیه سازی اجزای محدود برای پوسته استوانه‌ای در دمای محیط مقایسه و صحت گذاری شده‌اند. نتایج این مقایسه در شکل ۶ آورده شده است. همچنین در جدول ۴، نتایج هر دو روش برای باندهای فرکانسی یک سوم اکتاو آورده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود حداکثر اختلاف بین دو روش کمتر از ۱۰٪ می‌باشد که این امر تطابق مناسب نتایج تست آکوستیک با حل عددی و صحت روش آزمون تجربی و نیز فرآیند مدل سازی عددی را تأیید می‌کند.



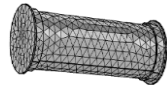
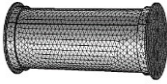
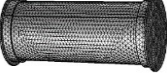
شکل ۶ مقایسه نتایج حل عددی و تست تجربی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

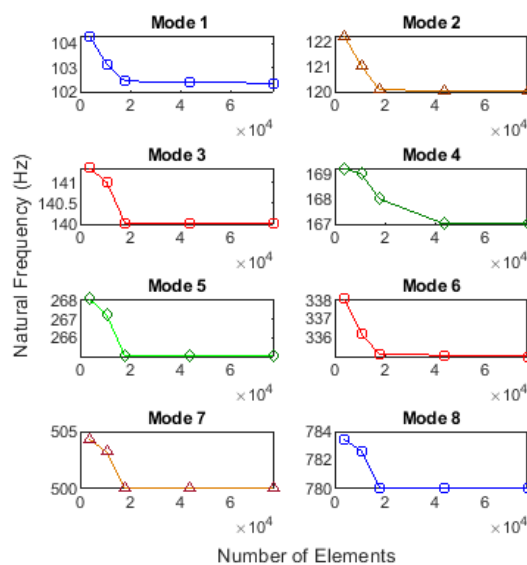
Figure 6 Comparison between numerical results and experimental data at 25°C

پس از تحلیل حساسیت شبکه المانی، همانطور که شکل ۴ مشاهده می‌شود بکارگیری شبکه ریزتر از ۱۷۸۶۶ المان، تغییر محسوسی در پاسخ‌ها بوجود نیاورده است که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را بیان می‌کند. بر همین اساس از شبکه‌بندی نرمال (اندازه متوسط) بعنوان شبکه‌بندی مطلوب استفاده شده است. بر این اساس نمایی از هندسه و شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار کامسول در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲ انواع مش‌های مورد استفاده در مدل

Table 2 Types of meshes used in the model

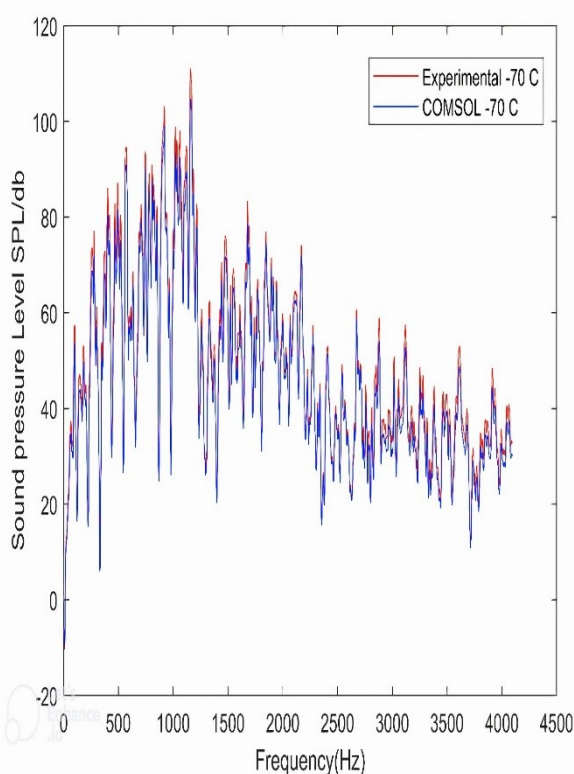
Mesh Image	Number of Elements	Mesh Name
	3721	Extra coarse
	10649	Coarse
	17866	Normal
	43740	Finer
	76926	Extra fine



شکل ۴ گراف نشان دهنده استقلال نتایج از مش

Figure 4 Mesh independence analysis graph

استوانه‌ای سریعاً به داخل اتاق آکوستیک منتقل می‌شود. پس از اینکه دمای پوسته به منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد رسید، تست آکوستیک آغاز و داده برداری انجام شده است. شکل ۷ نمودار سطح فشار صوت داخل پوسته استوانه‌ای بر حسب دسی‌بل حاصل از نتایج تست آکوستیک با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. همچنین در جدول ۴، نتایج هر دو روش برای باندهای فرکانسی یک سوم اکتاو آورده شده‌اند که حداکثر اختلاف کمتر از ۱۰٪ را بین نتایج دو روش تست تجربی و حل عددی نشان می‌دهد.



شکل ۷ مقایسه نتایج حل عددی و تست تجربی در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد

Figure 7 Comparison between numerical results and experimental data at -70°C

شکل ۸ مقدار فشار صوت عبوری از پوسته (بر حسب پاسکال) حاصل از تست آکوستیک را بطور همزمان در دمای ۲۵ و منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند دما تأثیر قابل توجهی بر میزان انتقال صوت از پوسته دارد به طوری که مقادیر فشار صوت عبوری از پوسته در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد، تقریباً در تمامی فرکانسها، پایین تر از مقادیر متناظر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود و طیف فشار صوت عبوری از پوسته تقریباً در تمامی فرکانسهای مشابه، برای حالتی که پوسته در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، کمتر از حالتی هست که پوسته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد

جدول ۳ مقایسه دامنه سطح فشار صوت برای باند فرکانسی یک سوم اکتاو در دمای محیط

Table 3 Comparison of Sound Pressure Level (SPL) for one-third octave bands at ambient temperature

Percentage Difference	Experimental Results	Simulation Results	Frequency (Hz)
9.1%	14.71	13.37	25
9.98%	25.66	23.1	31.5
6.5%	35.25	32.96	40
8.14%	44.01	40.43	50
5.36%	44.08	41.72	63
7.7%	66.16	61.06	80
3.34%	23.05	22.28	100
6.29%	59.01	55.30	125
9.15%	71.8	65.23	160
8.53%	53.02	48.5	200
9.09%	70.13	63.76	250
9.08%	82.9	75.37	315
7.67%	63.79	58.9	400
6.99%	54.03	50.25	500
6.55%	56.86	53.14	630
6.89%	59.3	55.21	800
4.9%	56.99	54.2	1000
4.28%	32.07	30.7	1250
5.67%	35.01	33.027	1600
3.47%	23.35	22.54	2000
4.59%	30.07	27.79	2500
7.35%	22.05	20.43	3450
6.68%	46.01	41.56	4000

۴- نتایج و بحث

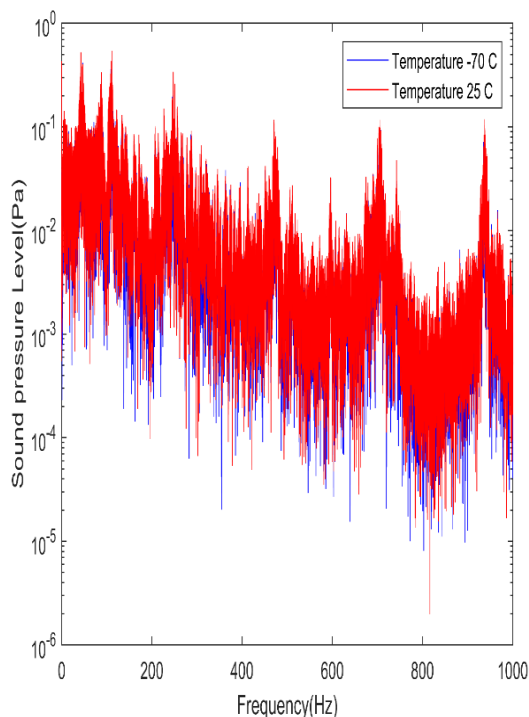
از آنجا که هدف اصلی این پژوهش مطالعه تجربی اثرات کاهش دما بر رفتار آکوستیکی و سطح فشار صوت پوسته استوانه‌ای است، لذا در ادامه نتایج حاصل از تست آکوستیک و حل عددی در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد آورده و با یکدیگر مقایسه شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

پس از اعمال سرما بر روی پوسته استوانه‌ای در داخل محفظه حرارتی و رسیدن به دمای حدود منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد، پوسته

۶-نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثرات کاهش دما بر رفتار ارتعاشی و آکوستیکی یک پوسته استوانه‌ای به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تست تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار کامسول نشان داد که کاهش دما منجر به کاهش سطح فشار صوت عبوری از پوسته، به ویژه در محدوده فرکانس‌های پایین، می‌شود. این کاهش در انتقال صوت را می‌توان به تغییرات در خواص مکانیکی ماده پوسته از جمله افزایش مدول الاستیسیته و سفتی پوسته نسبت داد.

تطابق مناسب بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، اعتبارسنجی مدل عددی را نیز تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که با وجود محدودیت‌های زیاد در انجام تست‌های تجربی، تحلیل عددی می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند و مناسب برای پیش‌بینی رفتار ارتعاشی و آکوستیکی سازه‌های پوسته‌ای در دماهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت در نظرگیری تأثیر دما به عنوان یک پارامتر کلیدی در طراحی بهینه سازه‌های با عملکرد آکوستیکی بالا، به ویژه در کاربردهای صنعتی همچون هوا فضا، خودرو سازی و ساختمان، تأکید می‌نماید با در نظر گرفتن تأثیر دما بر رفتار ارتعاشی و آکوستیکی سازه‌ها، می‌توان به طراحی سازه‌هایی با سطح صدای کمتر و کیفیت آکوستیکی بهتر دست یافت.



شکل ۸ مقایسه سطح فشار صوت عبوری از پوسته در دمای ۲۵

درجه و منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد

Figure 8. Comparison of the transmitted Sound Pressure Level (SPL) through the shell at 25°C and -70°C

این نتیجه نشان دهنده آن است که با کاهش دما، توانایی پوسته در انتقال صوت کاهش می‌یابد.

جدول ۴) مقایسه دامنه سطح فشار صوت برای باند فرکانسی یک

سوم اکتاو در دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد

Table 4 Comparison of Sound Pressure Level (SPL) for one-third octave bands at -70°C

Percentage Difference	Experimental Results	Simulation Results	Frequency (Hz)
3.16%	12.35	11.96	25
5.37%	14.53	13.75	31.5
3.54%	20.01	19.302	40
1.17%	23.23	22.96	50
6.4%	35.67	33.39	63
6.25%	33.01	30.95	80
2.99%	55.06	53.41	100
8.32%	45.83	42.017	125
5.14%	4.022	38.155	160
۹٪/۶۷	44.9	40.559	200
8.9%	47.89	61.85	250
9.54%	49.02	44.339	315
8.14%	83.43	76.64	400
7.03%	79.52	73.925	500
6.33%	68.04	63.73	630
6.8%	70.93	66.102	800
4.38%	74.42	71.159	1000
7.9%	57.31	52.208	1250
7.005%	56.73	52.756	1600
1.8%	59.008	57.935	2000
3.56%	35.14	33.89	2500
2.36%	34.14	33.335	3150
7.25%	32.98	30.59	4000

همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش فرکانس، میزان انتقال صوت در هر دو حالت دمایی روند نزولی دارد و میزان اختلاف فشار صوت بیشتری در فرکانسهای پایین نسبت به فرکانس‌های بالاتر، برای پوسته با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به پوسته با دمای منفی ۷۰ درجه سانتی‌گراد ملاحظه می‌گردد.

environments," *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 28, no. 1, pp. 11-22, 2015.

doi:10.1007/s10338-015-0016-2.

[13] T. Yang, W. Zheng, Q. Huang, and S. Li, "Sound radiation of functionally graded materials plates in thermal environment," *Compos. Struct.*, vol. 144, pp. 165-176, 2016.

doi:10.1016/j.compstruct.2016.02.061.

[14] F. X. Xin, J. Q. Gong, S. W. Ren, L. X. Huang, and T. J. Lu, "Thermoacoustic response of a simply supported isotropic rectangular plate in graded thermal environments," *Appl. Math. Model.*, vol. 44, pp. 456-469, 2017. doi:10.1016/j.apm.2017.02.003.

[15] X. Li, K. Yu, and R. Zhao, "Vibro-acoustic response of a clamped rectangular sandwich panel in thermal environment," *Appl. Acoust.*, vol. 132, pp. 82-96, 2018. doi:10.1016/j.apacoust.2017.12.030.

[16] X. Li, K. Yu, R. Zhao, J. Han, and H. Song, "Sound transmission loss of composite and sandwich panels in thermal environment," *Composites Part B: Engineering*, vol. 133, pp. 1-14, 2018. doi:10.1016/j.compositesb.2017.10.028.

[17] N. Sharma, T. R. Mahapatra, and S. K. Panda, "Numerical analysis of acoustic radiation properties of laminated composite flat panel in thermal environment: a higher-order finite boundary element approach," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 232, no. 18, pp. 3235-3249, 2018. doi:10.1177/0954406218766666.

[18] N. Sharma, T. R. Mahapatra, and S. K. Panda, "Thermoacoustic Behavior of Laminated Composite Curved Panels Using Higher-Order Finite-Boundary Element Model," *Int. J. Appl. Mechanics*, vol. 10, no. 1, 2018. doi:10.1142/S1758825118500175.

[19] N. Sharma, T. R. Mahapatra, S. K. Panda, and P. Katariya, "Thermo-acoustic analysis of higher-order shear deformable laminated composite sandwich flat panel," *J. Sandwich Struct. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 1357-1385, 2020. doi:10.1177/1099636218784846.

[20] N. Sharma, T. R. Mahapatra, and S. K. Panda, "Numerical analysis of acoustic radiation responses of shear deformable laminated composite shell panel in hygrothermal environment," *J. Sound Vib.*, vol. 431, pp. 346-366, 2018. doi:10.1016/j.jsv.2018.05.051.

[21] N. Sharma, T. R. Mahapatra, and S. K. Panda, "Hygrothermal effect on vibroacoustic behaviour of higher-order sandwich panel structure with laminated composite face sheets," *Engineering Structures*, vol. 197, pp. 109355, 2019.

doi:10.1016/j.engstruct.2019.109355.

[22] K. Zhou, Z. Lin, X. Huang, and H. Hua, "Vibration and sound radiation analysis of temperature dependent porous functionally graded material plates with general boundary conditions," *Appl. Acoust.*, vol. 154, pp. 236-250, 2019.

doi:10.1016/j.apacoust.2019.05.020.

[23] K. Rahmatnezhad, M. R. Zarastvand, and R. Talebitooti, "Mechanism study and power transmission feature of acoustically stimulated and thermally loaded composite shell structures with double curvature," *Composite Structures*, vol. 276, pp. 114557, 2021.

doi:10.1016/j.compstruct.2021.114557.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد

منابع

[1] M. R. Zarastvand, M. Ghassabi, and R. Talebitooti, "Acoustic Insulation Characteristics of Shell Structures: A Review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, pp. 505-523, 2021. doi:10.1007/s11831-020-09569-2.

[2] D. Chronopoulos, M. Ichchou, B. Troclet, and O. Bareille, "Thermal effects on the sound transmission through aerospace composite structures," *Aerospace Sci. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 192-199, 2013. doi:10.1016/j.aerosci.2013.02.007.

[3] K. Rahmatnezhad, M. R. Zarastvand, and R. Talebitooti, "Mechanism study and power transmission feature of acoustically stimulated and thermally loaded composite shell structures with double curvature," *Composite Structures*, vol. 276, pp. 114557, 2021.

doi:10.1016/j.compstruct.2021.114557.

[4] P. W. Smith, "Sound transmission through thin cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 29, pp. 712-729, 1955. doi:10.1121/1.1908165.

[5] M. C. Junger and P. W. Smith, "The Transmission of Sound by Spherical Shells," *J. Acustica*, vol. 5, pp. 47-48, 1955. doi:10.1016/S0003-682X(55)80007.

[6] P. Jeyaraj, C. Padmanabhan, and N. Ganesan, "Vibration and acoustic response of an isotropic plate in a thermal environment," *J. Vib. Acoust.*, vol. 130, no. 5, 2008. doi:10.1115/1.2907632.

[7] P. Jeyaraj, N. Ganesan, and C. Padmanabhan, "Vibration and acoustic response of a composite plate with inherent material damping in a thermal environment," *J. Sound Vib.*, vol. 320, no. 1-2, pp. 322-343, 2009. doi:10.1016/j.jsv.2008.07.040.

[8] P. Jeyaraj, C. Padmanabhan, and N. Ganesan, "Vibro-acoustic behavior of a multilayered viscoelastic sandwich plate under a thermal environment," *J. Sandwich Struct. Mater.*, vol. 13, no. 5, pp. 509-537, 2011. doi:10.1177/1099636211409491.

[9] P. Ponnusamy and R. Selvamani, "Wave propagation in a transversely isotropic magneto thermo elastic cylindrical panel," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 39, pp. 76-85, 2013. doi:10.1016/j.euromechsol.2012.06.009.

[10] D. Chronopoulos, M. Ichchou, B. Troclet, and O. Bareille, "Computing the broadband vibroacoustic response of arbitrarily thick layered panels by a wave finite element approach," *Appl. Acoust.*, vol. 77, pp. 89-98, 2014. doi:10.1016/j.apacoust.2013.10.010.

[11] X. Li and K. Yu, "Vibration and acoustic responses of composite and sandwich panels under thermal environment," *Composite Structures*, vol. 131, pp. 104-1049, 2015.

doi:10.1016/j.compstruct.2015.06.037.

[12] W. Li and Y. Li, "Vibration and sound radiation of an asymmetric laminated plate in thermal

- Int. J. Naval Architect. Ocean Eng., vol. 16, 100585, 2024. doi:10.1016/j.ijnaoe.2023.100585.
- [35] A. Mohammadi and B. Gholizadeh, "Analysis of Temperature Effect on Acoustic Behavior of Composite Structures Under Thermal Loading," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 123-134, 2021. doi:10.22060/mej.2021.19434.103.
- [36] M. Rezaei and J. H. Faraji, "Modeling Vibration and Sound Transmission in Composite Panels Under Thermal Effects," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 145-159, 2021. doi:10.22060/mej.2021.19435.1031.
- [37] Everitt, B.S., "The Cambridge Dictionary of Statistics", 2003.
- [38] Power Piping, ASME code for pressure piping, B31 ASME B31.1, Table C-1, 2024.
- [39] https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_773.html
- [40] Fukuhara, M. & Sanpei, A. "Internal friction and elastic modulus of carbon steels". *ISI International*, Vol. 33, no 4, pp. 374-381, 1993.
- [41] Hoyos, J. J. et al. "Effects of tempering on internal friction of carbon steels". *Materials Science & Engineering A*, vol. 528, no. 28, pp. 8689-8696, 2011.
- [24] W. Yuan, H. Liao, R. Gao et al., "Vibration and sound transmission loss characteristics of porous foam functionally graded sandwich panels in thermal environment," *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.*, vol. 44, pp. 897-916, 2023. doi:10.1007/s10483-023-3004-7.
- [25] B. Meesala, P. Chaupal, and P. Rajendran, "Vibro-acoustic Behavior of GFRP Curved Panel Under Non-uniform Thermal Environment," in *Proceedings of the International Symposium on Lightweight and Sustainable Polymeric Materials (LSPM23)*, S. Mavinkere Rangappa and S. Synching, Eds. Singapore: Springer, 2023, vol. 32. doi:10.1007/978-981-99-5567-1_5.
- [26] Z. Wang, T. Fu, and J. Li, "Sound transmission loss behavior of honeycomb sandwich plate structure under thermal loading," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 1-11, 2023. doi:10.108/15376494.2023.2262106.
- [27] P. Roodgar Saffari, S. Sirimontree, C. Thongchom, T. Jearsiripongkul, P. Saffari, and S. Keawsawasvong, "Effect of uniform and nonuniform temperature distributions on sound transmission loss of double-walled porous functionally graded magneto-electro-elastic sandwich plates with subsonic external flow," *Int. J. Thermofluids*, vol. 17, 100311, 2023. doi:10.1016/j.ijft.2023.100311.
- [28] D. Wu, Y. Wang, Y. Pu, L. Shang, and Z. Gao, "Experimental investigation of high temperature thermal-vibration characteristics for composite wing structure of hypersonic flight vehicles," *J. Vibroengineering*, vol. 17, no. 2, pp. 917-927, Mar. 2015. doi:10.21595/jve.2015.16367.
- [29] V. N. Koukounian and C. K. Mechefske, "Computational Modelling and Experimental Verification of the Vibroacoustic Behavior of Aircraft Fuselage Sections," *Appl. Acoust.*, vol. 132, pp. 8-18, 2018. doi:10.1016/j.apacoust.2017.09.013.
- [30] P. Oliazadeh, A. Farshidianfar, and M. J. Crocker, "Experimental and analytical investigation on sound transmission loss of cylindrical shells with absorbing material," *J. Sound Vibration*, vol. 434, pp. 28-43, 2018. doi:10.1016/j.jsv.2018.07.024.
- [31] P. Oliazadeh, A. Farshidianfar, and M. J. Crocker, "Study of sound transmission through single- and double-walled plates with absorbing material: Experimental and analytical investigation," *Appl. Acoust.*, vol. 145, pp. 7-24, 2019. doi:10.1016/j.apacoust.2018.10.027.
- [32] T. Yang, Z. Zhao, Y. Qin, F. Pang, Y. Du, C. Gao, and H. Li, "Experimental and numerical investigation on vibro-acoustic performance of a submerged stiffened cylindrical shell under multiple excitations," *Thin-Walled Struct.*, vol. 197, 111569, 2024. doi:10.1016/j.tws.2024.111569.
- [33] K. Erukala, A. K. Meher, V. Kumar, N. Sharma, H. C. Dewangan, P. Kataria, and S. K. Panda, "Numerical prediction of thermoacoustic responses of CNT reinforced natural (luffa) fibre/epoxy hybrid composite and experimental verification," *Appl. Acoust.*, vol. 211, 109580, 2023. doi:10.1016/j.apacoust.2022.109580.
- [34] J. Lee, D. Cho, K. Kim, and S. Park, "Experimental validation on structure-borne underwater radiated noise transfer function analysis for marine structure,"