

تحلیل ارتعاشات آزاد یک پوسته استوانه‌ای با روش‌های تجربی و

عددی تحت تاثیر افزایش دما

مهدی کریمی	امید محمدپور	میثم پرهیخته	رضا احمدی*
استادیار گروه مهندسی مکانیک	استادیار گروه مهندسی مکانیک	دانشجو دکتری گروه مهندسی مکانیک	استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک	دانشگاه پیام نور
دانشگاه بوعلی سینا همدان	دانشگاه پیام نور تهران	دانشگاه بوعلی سینا همدان	تهران
m_karimi@basu.ac.ir	mohammadpour@pnu.ac.ir	Parhikhteh665@gmail.com	rahmadi@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹

چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای در بسیاری از کاربردهای صنعتی در طول عمر خود تحت تأثیر شرایط دمایی مختلفی قرار می‌گیرند که این امر باعث ایجاد تنش‌های حرارتی و اثرگذاری بر روی مشخصات ارتعاشی و مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه می‌گردد. لذا در این تحقیق تأثیرات افزایش دما بر روی فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای از طریق آزمون آکوستیک بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور ابتدا فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای شکل با استفاده از نرم‌افزار کامسول استخراج می‌گردد. سپس با استفاده از آزمون ضربه چکش، فرکانس‌های طبیعی پوسته تعیین می‌شوند. در ادامه پوسته استوانه‌ای در داخل اتاق آکوستیک قرار گرفته و به وسیله یک بلندگو در داخل اتاق آکوستیک تحریک می‌شود. در این حالت تراز فشار صوتی^۱ توسط میکروفون داخل پوسته اندازه‌گیری شده و با آنالیز فرکانسی، مقدار فرکانس‌های طبیعی سیستم در دمای محیط اندازه‌گیری می‌شود. اعتبار روش آزمون آکوستیک ارائه شده در این مقاله با نتایج آزمون مودال و حل عددی در دمای محیط مورد ارزیابی و تأیید قرار می‌گیرد. نهایتاً پوسته در یک محفظه حرارتی تا دمای بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و مجدداً آزمون آکوستیک تکرار می‌شود. نتایج بیانگر کاهش فرکانس‌های طبیعی سیستم بر اثر افزایش دما می‌باشند.

واژگان کلیدی: آزمون آکوستیک، فرکانس طبیعی، پوسته استوانه‌ای، آنالیز مودال، تراز فشار صوت

۱. مقدمه

امروزه پوسته‌های استوانه‌ای به علت دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیکی، شکل‌پذیری مناسب، قابلیت اطمینان و ظرفیت تحمل بار بالا و در عین حال توانایی ایجاد فضاهای بسته به طور گسترده در بسیاری از سازه‌ها مانند هواپیماها، موشک‌ها، فضاپیماها، زیردریایی‌ها، مخازن تحت فشار و سایر سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱].

در کاربردهای مختلف، اغلب این سازه‌ها در معرض بارهای مختلف حرارتی و یا رطوبتی قرار دارند. بطور مثال محدوده دمای خارجی که سازه‌های فضایی در آن مورد استفاده قرار می‌گیرند بین ۱۰۰- تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با افزایش دما، سفتی و مقاومت سازه بدلیل ایجاد تنش‌های حرارتی تغییر کرده و در نهایت این امر، بر روی ویژگی‌های دینامیکی و ارتعاشی سازه‌ها از جمله مقادیر فرکانس طبیعی آن‌ها اثر می‌گذارد [۲]. بنابراین تجزیه و تحلیل ارتعاشات و محاسبه فرکانس‌های طبیعی چنین سازه‌هایی تحت اثر گرادیان دما در محیط‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ از این رو این موضوع سال‌ها مورد توجه محققان و پژوهشگران مختلف قرار گرفته است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه فرکانس طبیعی سازه‌ها 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 [۳]. اکثر مطالعات موجود بر روی ارتعاشات صفحات و پوسته‌ها در شرایط دمای محیط و غالباً به روش تحلیلی و عددی انجام شده‌اند و در مقالات، کمتر به بررسی رفتار

ارتعاشی حرارتی آن‌ها به ویژه به روش تجربی پرداخته شده است.

در سال ۲۰۰۱ پاره‌ی و همکارانش [۴]، با استفاده از فرمولاسیون اجزاء محدود، معادلات ارتعاشات پنل و پوسته‌های چند لایه کامپوزیتی را در محیطی که در معرض گرادیان‌های حرارتی و رطوبت قرار داشت استخراج کردند. حل آن‌ها بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم نیومارک^۲ ارائه شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که فرکانس طبیعی سازه با افزایش درصد رطوبت و گرما، کاهش پیدا می‌کند. کیم [۵]، مشخصات ارتعاشی پنل‌های سرامیکی و مستطیلی شکل ساخته شده از مواد تابعی مدرج^۳ در محیط حرارتی را به کمک روش ریلی-ریتز^۴ بررسی کرده و معادلات فرکانسی سیستم را استخراج نمود. پژوهشگران دیگری از جمله نایدو [۶] و کاندو [۷] و همکارانشان، با استفاده از روش اجزاء محدود، ارتعاشات و پاسخ غیر خطی پوسته‌های چندلایه کامپوزیت لایه‌ای را تحت اثر گرادیان‌های حرارتی و تغییر رطوبت محیطی مورد بررسی قرار دادند. تحلیل ویژگی‌های غیرخطی دینامیکی یک پوسته دو انحنایی ساخته شده از مواد تابعی مدرج و با در نظر گرفتن اثر حرارتی، توسط علیجانی و همکارانش [۸] با استفاده از روش انرژی مودال چند حالتی انجام شد. ایشان از دو تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر غیرخطی مختلف و با فرض شرایط مرزی پوسته بصورت ساده و با لبه‌های محرک استفاده کردند. کیانی و همکارانش [۹] با استفاده از تئوری مرتبه اول تغییر شکل برشی، رفتار دینامیکی و ارتعاشات آزاد یک پنل دو انحنایی از جنس تابعی مدرج را که تحت اثر توأمان

بارهای حرارتی و مکانیکی قرار دارد بررسی کردند. ایشان برای تبدیل معادلات دیفرانسیل ضمنی وابسته به زمان به معادلات دیفرانسیل معمولی، یک راه حل مبتنی بر روش حل ناویر^۵ پیشنهاد دادند. جویبار و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثرات بارهای حرارتی بر روی رفتار ارتعاشی پنل‌های مخروطی ناقص از جنس مواد تابعی مدرج پرداختند. در این پژوهش اثر تغییر دما بر روی خواص مادی پوسته لحاظ شده است. وانگ و همکارانش [۱۱] ارتعاشات حرارتی آزاد پوسته‌های استوانه‌ای متخلخل ساخته شده از مواد تابعی مدرج را مورد بررسی قرار دادند. سه نوع بارگذاری حرارتی بصورت توزیع دمای یکنواخت، خطی و غیرخطی برای بررسی اثرات آن‌ها بر ویژگی‌های ارتعاشی این نوع سازه‌ها در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، از تئوری پوسته لاو^۶ برای فرمول‌بندی معادلات کرنش-جابجایی و از روش ریلی-ریتز برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم استفاده شده است. داک و همکارانش [۱۲]، یک حل تحلیلی برای بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی و ارتعاش پانل‌های استوانه‌ای ساندویچی تابعی مدرج متشکل از سرامیک و فلز و با تغییر خواص ماده به صورت توانی در راستای ضخامت بر روی بستر الاستیک در محیط‌های حرارتی ارائه دادند. در این مقاله فرض شده است که سازه توسط تقویت کننده‌های طولی و عرضی مهار شده و تحت بارهای مکانیکی و حرارتی قرار گرفته و بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه سوم ردی^۷، معادلات حرکت و سازگاری سازه با در نظر گرفتن غیرخطی بودن هندسی و بستر الاستیک نوع پسترناک^۸ استخراج شده‌اند. بویچاک و همکارانش [۱۳] با استفاده از روش اجزاء محدود به تحلیل

فرکانس‌های طبیعی و موده‌های ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای موج‌دار جدار نازک بسته پرداختند. ارتعاشات یک پوسته استوانه‌ای ساخته شده از مواد تابعی مدرج که برای انتقال جریان سیال استفاده شده بود توسط ابراهیمی [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که فرکانس طبیعی با افزایش میزان سرعت سیال کاهش پیدا می‌کند. بابایی و جعفری [۱۵]، اثرات محیط‌های حرارتی را بر روی رفتار ارتعاشات آزاد پوسته‌های ترکیبی استوانه‌ای-مخروطی تابعی مدرج تقویت شده با نانولوله‌های کربنی براساس فرضیات لاو^۹ مورد بررسی قرار دادند.

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که پژوهش‌های بسیار محدودی در رابطه با تحلیل پاسخ ارتعاشی صفحات و پوسته‌های استوانه‌ای در حضور تغییرات دما بصورت تجربی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. بطور مثال در سال ۲۰۱۵، وو و همکارانش [۱۶]، ویژگی‌های ارتعاشی حرارتی با دمای بالا برای سازه بال کامپوزیتی تجهیزات پرندۀ مافوق صوت را به روش تجربی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با ترکیب یک سیستم شبیه‌ساز گرمایشی گذرا با دمای بالا و یک دستگاه آزمون ارتعاش، یک ست‌آپ آزمایشگاهی ارتعاشی حرارتی را ایجاد نمودند. کوکونیانو و همکارش [۱۷] برای بررسی رفتار ارتعاشی صوتی بدنه هواپیما هنگامی که در معرض یک جریان لایه مرزی متلاطم قرار دارد، از روش آزمایشگاهی اتاق انتقال استفاده کردند. در مقاله دیگری، اولیازاده و همکارانش [۱۸] 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 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 شد. زیپو و همکارانش [۱۹] به مطالعه تجربی ارتعاشات غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای پلیمری با مقطع دایره‌ای تحت اثرات حرارتی پرداختند. این آزمایشات در یک محیط کنترل‌شده تحت چندین شرایط دما و دامنه تحریک همگن و با هدف مطالعه تأثیر دما بر روی دینامیک پیچیده پوسته‌ها انجام شدند. هوی و همکارانش [۲۰] ویژگی‌های ارتعاش غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با الیاف در محیط حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مقاله یک مدل تحلیلی بر اساس تئوری مواد غیرخطی جونز-نلسون^{۱۰} ارائه شده که غیرخطی‌های هندسی و مواد و اثر حرارتی را منظور کرده است. همچنین یک سری آزمایشات تجربی ارتعاش حرارتی بر روی دو نمونه پوسته ساخته شده از کامپوزیت برای اعتبارسنجی روش حل تحلیلی پیشنهادی انجام داده است. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۴، ویژگی‌های ارتعاشی-آکوستیکی یک پوسته استوانه‌ای تقویت شده در زیر آب توسط تانگ و همکارانش [۲۱] با استفاده از روش‌های تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه‌گیری‌های تجربی در یک اتاق بدون انعکاس و تحت تحریک‌های نويز سفید انجام شده‌اند.

با مرور مقالات ارائه شده در حوزه بررسی اثر گرادیان‌های حرارتی بر روی ارتعاشات و تخمین فرکانس‌های طبیعی سازه‌های مختلف از جمله ورق‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای، مشخص شد که تاکنون اکثر پژوهش‌های انجام شده به روش تحلیلی و عددی صورت گرفته است و این مسأله بصورت تجربی بویژه به روش آزمون آکوستیک کمتر مورد مطالعه قرار

گرفته است. در نتیجه در پژوهش حاضر، اثرات افزایش دما بر روی فرکانس‌های طبیعی یک پوسته استوانه‌ای بصورت تجربی و با استفاده از تحریک امواج آکوستیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق، ابتدا جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی یک پوسته فولادی نمونه ساخته شده بصورت تجربی در دمای محیط، از روش آزمون آکوستیک استفاده شده است. برای صحه‌گذاری این روش آزمون، فرکانس‌های طبیعی پوسته مورد نظر در محدوده فرکانسی زیر ۱۰۰۰ هرتز در دمای محیط، با نتایج حاصل از روش آزمون چکش مودال و تحلیل عددی اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول مقایسه شده‌اند. تطابق مناسبی بین نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و حل عددی مشاهده گردید. سپس جهت بررسی اثرات افزایش دما، پوسته استوانه‌ای به محفظه حرارتی منتقل شده و مجدداً آزمایش در اتاق آکوستیک برای دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تکرار گردید. همچنین فرکانس‌های طبیعی سازه به روش عددی نیز در دمای مذکور محاسبه شده و در نهایت، اثرات افزایش دما بر روی فرکانس‌های طبیعی پوسته توسط هر دو روش تجربی و عددی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲. تحلیل عددی

برای تحلیل عددی فرکانس‌های طبیعی سیستم، ابتدا مدل سه‌بعدی یک پوسته استوانه‌ای نمونه با قطر خارجی ۱۶۸/۳ میلی‌متر، ضخامت ۶/۳ میلی‌متر و طول ۵۵۰ میلی‌متر و اعمال مشخصات مکانیکی جدول ۱ در قسمت مواد نرم‌افزار ایجاد گردید.

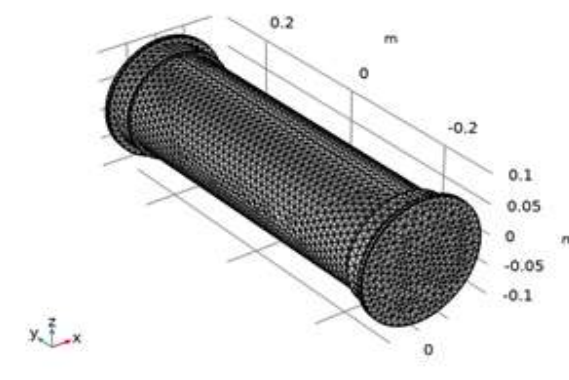
نمایی از هندسه و شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار در شکل ۱ نشان داده شده است.

جهت المان‌بندی اجزای مختلف پوسته از المان‌های چهار وجهی^{۱۱} استفاده شده است. با توجه به افزایش المان‌ها و به دنبال آن زیاد شدن زمان حل، بایستی حداقل تعداد المان ممکن که دارای دقت مورد قبولی

باشد استفاده گردد. جهت بررسی حساسیت مدل به شبکه و رسیدن به تعداد المان بهینه مدل اجزاء محدود، این مدل برای پنج اندازه مختلف المان (مطابق جدول ۲)، حل شده و مقادیر هشت فرکانس طبیعی اول سازه در محدوده فرکانسی کمتر از ۱۰۰۰ هرتز در هر حالت محاسبه شده‌اند.



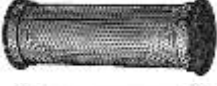


جدول ۱. مشخصات مکانیکی پوسته استوانه‌ای

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



شکل ۱. پوسته شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول

جدول ۲. انواع شبکه‌بندی‌های اعمال شده بر روی مدل

نام شبکه‌بندی	تعداد المان	تصویر شبکه‌بندی
Extra coarse	۳۷۲۱	
Coarse	۱۰۶۴۹	
Normal	۱۷۸۶۶	
Finer	۴۳۷۴۰	
Extra fine	۷۶۹۲۶	

شده است. پس از شبکه‌بندی مدل و اعمال شرایط مرزی به صورت مدل دو سر آزاد بر روی پوسته و بارگذاری مربوطه، تحلیل صورت گرفت و فرکانس‌های طبیعی سازه برای زمانی که پوسته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، استخراج گردید.

۳. آزمون تجربی

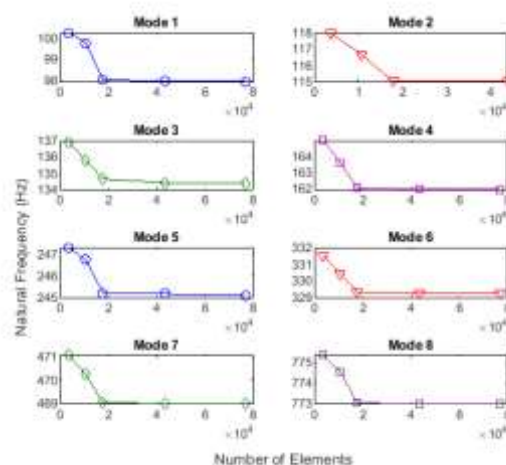
۳-۱. آماده سازی نمونه

پوسته استوانه‌ای تحت آزمایش از ماده‌ای با استاندارد آلیاژی ASTM A106 و مشخصات مکانیکی جدول ۱ ساخته شده است. مشخصات هندسی این پوسته همانند ابعاد ذکر شده در بخش ۲ می‌باشد. (شکل ۳).



شکل ۳. پوسته استوانه‌ای فولادی ساخته شده

در شکل ۲ نمودار استقلال نتایج از شبکه‌بندی مدل اجزاء محدود و همگرایی نتایج برای هشت فرکانس اول سازه نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار استقلال نتایج از شبکه‌بندی

پس از تحلیل حساسیت شبکه المانی، همانطور که در شکل ۲ 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

۲-۳. آزمون چکش مودال

برای صحه‌گذاری نتایج آزمون آکوستیک، آزمون چکش مودال نیز انجام شده است و فرکانس‌های طبیعی پوسته نمونه در بازه ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز در دمای محیط اندازه‌گیری شده‌اند. جهت انجام این آزمایش، از یک شتاب‌سنج پیزوالکتریک GLOBALTEST مدل AP2037-100، رویدادنگار داده^{۱۲} NI-USB 4431 و برای تحریک فرکانس‌های طبیعی پوسته از یک چکش مدل SINO-CERA LC-01A استفاده شده است که در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. برای اطمینان از تکرارپذیری 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 ۴. آزمون چکش مودال بر روی پوسته استوانه‌ای

۳-۳. آزمون آکوستیک

برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای نمونه از روش غیرتماسی با استفاده از بلندگو جهت تحریک آکوستیکی سازه در داخل اتاق آکوستیک استفاده شده است. برای انجام این آزمون، 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 با شعاع داخلی ۸۴/۱۵ میلی‌متر، ضخامت ۵/۶ میلی‌متر و وزن ۱/۸۶ کیلوگرم بسته شده و پوسته از بیرون توسط بلندگوی داخل اتاق آکوستیک تحت تحریک امواج آکوستیکی قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که مطابق شکل ۵، پوسته توسط چند طناب نگهدارنده به پایه‌های فلزی آویزان شده است. دلیل معلق نگه داشتن پوسته استوانه‌ای اینست که قرار گرفتن آن بر روی پایه‌های نگهدارنده، مانع از ایجاد ارتعاش در برخی از شکل مودها می‌شود و این امر سبب می‌گردد که فرکانس‌های مربوطه در نمودار طیف فرکانسی قابل شناسایی نباشند. در نهایت بعد از آزمون نمونه در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد)، سطح فشار صوت عبوری از بیرون به داخل پوسته داده‌برداری می‌شود. از آنجایی که داده‌های جمع‌آوری شده در حوزه زمان می‌باشند لذا برای اینکه در حوزه فرکانس بررسی شوند، داده‌های سطح فشار صوت به نرم‌افزار متلب منتقل شده و با گرفتن تبدیل فوریه سریع^{۱۳} از آن‌ها، تحلیل فرکانسی آن‌ها صورت می‌گیرد و بدین ترتیب مکان فرکانس‌های طبیعی پوسته را با توجه به قله‌های موجود آمده در آنالیز فرکانسی می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۵. تصویری از داخل اتاق آزمون و نحوه آماده‌سازی نمونه جهت انجام آزمایش

جهت آزمون 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 دسی‌بل^{۱۴} که مناسب برای آزمون نمونه-های با ابعاد ۲×۲×۲ می‌باشد، 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 ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶. تصویری از اتاق آکوستیک

برای تحریک صوتی پوسته استوانه‌ای از یک بلندگوی پایونیر^{۱۵} نوع CS-G405 استفاده شده است که توانایی پوشش بازه فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را دارد. در واقع در این روش تحریک غیرتماسی از بلندگوی مذکور برای فرستادن سیگنال‌های نویز سفید استفاده شده است. نویز سفید سیگنالی تصادفی می‌باشد که تابع چگالی توان آن در همه فرکانس‌ها به طور یکنواخت توزیع شده است و می‌تواند کلیه فرکانس‌هایی که در محدوده کاری بلندگو قرار دارد را دربرگیرد. آزمایش روش تحریک غیرتماسی در اتاق

آکوستیک پربازتاب انجام شده است. دلیل این امر آن است که فشار صوت در تمامی نقاط پوسته استوانه‌ای یکسان باشد که این شرایط در اتاق پربازتاب مهیا است زیرا یکنواخت بودن توزیع انرژی آکوستیکی در اتاق یکنواخت بودن تابع چگالی توان در فرکانس‌های مختلف سبب می‌شود که میدان آکوستیکی در اتاق دارای فشار صوتی یکسانی باشد.

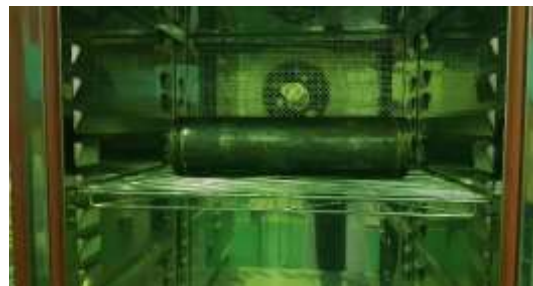
میکروفون مورد استفاده جهت سنجش سطح فشار صوت داخل پوسته از نوع پی‌سی‌بی پیزوترونیکی^{۱۶} مدل 378C01 با دقت اندازه‌گیری ۳ دسی‌بل می‌باشد. قابل ذکر است که همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است علاوه بر میکروفون داخل پوسته استوانه‌ای، یک میکروفون نیز در خارج از پوسته تعبیه شده است تا از یکسان بودن شرایط در اتاق آکوستیک و شدت صدای تولیدی در حالات مختلف آزمون اطمینان حاصل گردد.

مطابق شکل ۷، برای آماده‌سازی آزمایش، قسمت میانی یکی از درپوش‌ها جهت عبور سیم میکروفون سوراخ شده است. این میکروفون در داخل پوسته استوانه‌ای بگونه‌ای تعبیه شده که امکان تغییر موقعیت آن از بیرون توسط یک دسته وجود داشته باشد.



شکل ۷. نحوه قرار گیری میکروفون در داخل پوسته

هنگامی که درپوش بر روی انتهای پوسته قرار می‌گیرد، میکروفون نیز به داخل پوسته هدایت می‌گردد. همچنین داده‌ها با نرخ فرکانس ۲۰۰۰۰ هرتز توسط میکروفون تعبیه شده در داخل پوسته نمونه‌برداری شده‌اند. جهت اعمال دما بر روی نمونه ساخته شده و برای آنکه توزیع دما بصورت 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 ۸ نمایی از این محفظه^{۱۷} حرارتی و نحوه قرارگیری نمونه پوسته استوانه‌ای در داخل آن را نمایش می‌دهد.



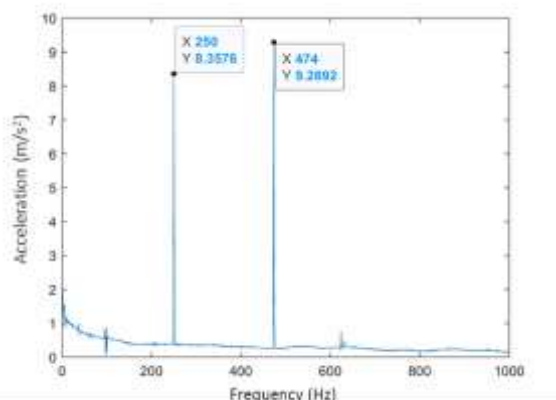
شکل ۸. پوسته استوانه‌ای در داخل محفظه حرارتی

۴. اعتبارسنجی نتایج در دمای محیط

برای اطمینان از صحت رویه انجام آزمون آزمایشگاهی آکوستیک برای استخراج فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای نمونه، ابتدا نتایج به دست آمده از این آزمون در دمای محیط با نتایج تجربی آزمون چکش مودال مقایسه شده است. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های

تجربی با نتایج حل عددی بدست آمده از مدل‌سازی سازه در نرم‌افزار کامسول در دمای محیط مقایسه و صحت‌گذاری شده‌اند.

۴-۱. مقایسه نتایج چکش مودال و آزمون آکوستیک نمودار FFT بدست آمده از روش تماسی آزمون چکش مودال پوسته استوانه‌ای در دمای محیط در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین فرکانس‌های طبیعی استخراج شده از این آزمون برای بازه فرکانسی ۰ الی ۱۰۰۰ هرتز در جدول ۳ درج شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود بدلیل استفاده از چکش جهت استخراج فرکانس‌های طبیعی پوسته، تنها دو فرکانس طبیعی حاصل از این تحریک بوضوح در نمودار شکل ۹ نمایان شده‌اند که همین دو فرکانس، بعنوان فرکانس‌های مرجع جهت مقایسه با نتایج سایر روش‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علت این امر می‌تواند عوامل مختلف از جمله جنس سر چکش (آلومینیومی)، عدم کنترل دقیق دامنه نیرو، کیفیت نامطلوب پاسخ فرکانسی در بعضی مودها بعلت تحریک ناکافی سیستم توسط ضربات چکش، ثبت ارتعاشات تنها در یک جهت بدلیل محدودیت سنسور و ... باشد.



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

جدول ۳. فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آزمون چکش مودال در بازه ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز

پارامتر	مقدار	واحد
فرکانس	۲۵۰	هرتز
	۴۷۴	هرتز

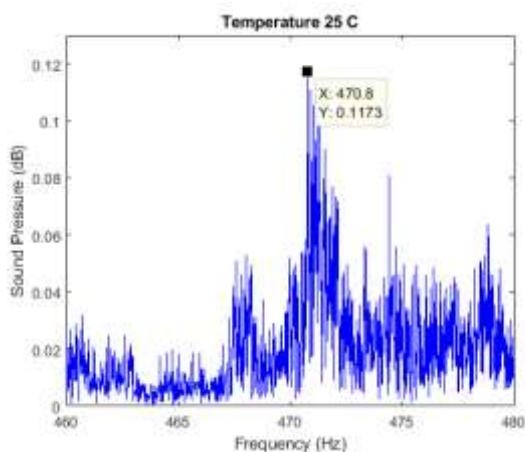
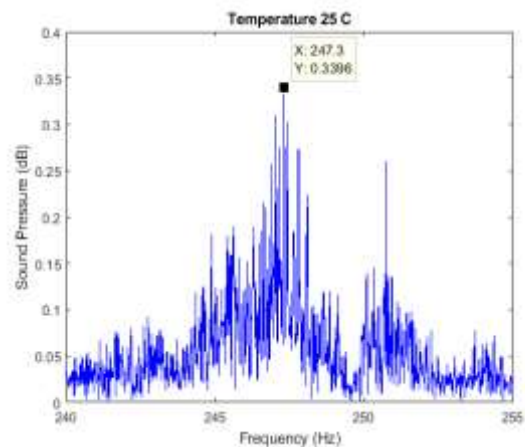
قابل ذکر است که از آنجاییکه داده‌های جمع آوری شده توسط میکروفون‌ها در حوزه زمان می‌باشند لذا برای اینکه در حوزه فرکانس بررسی شوند، این داده‌ها به نرم‌افزار متلب منتقل شده و با گرفتن تبدیل فوریه سریع از آن‌ها تحلیل فرکانسی صورت گرفته است. همانطور که در نمودارهای شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند دو قله در نمودار FFT مربوط به آزمون آکوستیک در فرکانس‌های ۲۴۷/۳۲ و ۴۷۰/۷۷ هرتز وجود دارد که بسیار نزدیک به فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آزمون چکش مودال می‌باشد و این امر نشان می‌دهد که در آزمون آکوستیک نیز دو فرکانس بدست آمده از آزمون چکش با دقت مناسبی ظاهر شده‌اند.

۴-۲. مقایسه نتایج حل عددی و آزمون آکوستیک
فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از حل عددی حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود پوسته استوانه‌ای در نرم‌افزار کامسول در دمای محیط در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از نرم‌افزار کامسول در دمای محیط

پارامتر	مقدار	واحد
فرکانس	۲۴۵/۲۰	هرتز
	۴۶۹/۰۳	هرتز

نمودارهای شکل ۱۰ نیز نمودار FFT بزرگنمایی شده حاصل از آزمون آکوستیک در محدوده فرکانسی دو فرکانس طبیعی بدست آمده از آزمون چکش مودال بعنوان فرکانس‌های مرجع در دمای محیط را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰. نمودار FFT مربوط به آزمون آکوستیک در دمای محیط در محدوده فرکانسی دو فرکانس مرجع

همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی نیز دو فرکانس طبیعی ۲۴۵/۲۰ و ۴۶۹/۰۳ هرتز را برای پوسته استوانه‌ای نشان می‌دهد. مقایسه نتایج حل عددی تطابق رضایت بخشی با نتایج آزمایش‌های تجربی هر دو آزمون آکوستیک و چکش مودال دارد به طوری که اختلاف نتایج سه روش با یکدیگر کمتر از ۲ درصد می‌باشد.

۵. تحلیل نتایج

با توجه به اینکه هدف اصلی این مقاله بررسی تجربی اثرات افزایش دما بر روی فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای است، لذا در ادامه نتایج حاصل از آزمون آکوستیک و نیز نتایج حل عددی پوسته استوانه‌ای در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد آورده شده و با یکدیگر مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۵-۱. نتایج حل عددی در دمای ۸۰+ درجه

جهت بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی پوسته تحت گرمایش، مجدداً شبیه‌سازی و تحلیل آن برای حالتی که پوسته در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد، توسط نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است.

فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از این تحلیل اجزاء محدود برای پوسته استوانه‌ای تحت دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقایسه نتایج جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد با افزایش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی کاهش یافته‌اند. بطور مثال مقادیر دو فرکانس طبیعی مرجع ۲۴۵/۲۰ و ۴۶۹/۰۳ هرتز با افزایش دما تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد، به ترتیب به فرکانس‌های ۲۳۱/۵۰ و ۴۶۰/۰۳ هرتز کاهش یافته‌اند.

جدول ۵. فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از نرم‌افزار کامسول برای دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

پارامتر	مقدار	واحد
فرکانس	۲۳۱/۵	هرتز
	۴۶۰/۰۳	هرتز

۵-۲. نتایج آزمون آکوستیک در دمای ۸۰+ درجه

بعد از اعمال گرما بر روی پوسته استوانه‌ای توسط محفظه حرارتی و رسیدن به دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد، پوسته استوانه‌ای سریعاً به داخل اتاق آکوستیک منتقل می‌شود. پس از اینکه دمای پوسته به ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت، آزمون آکوستیک انجام و داده‌برداری صورت می‌پذیرد. نمودارهای شکل ۱۱ نمودار FFT بزرگنمایی شده حاصل از آزمون آکوستیک در محدوده فرکانسی دو فرکانس مرجع را برای آزمون آکوستیک پوسته استوانه‌ای در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نمایش می‌دهند.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود محل قله‌هایی که قبلاً در دمای محیط بعنوان فرکانس طبیعی استخراج شده بودند، در نمودار FFT جدید گرفته شده از داده‌های میکروفون برای دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، دیگر دارای قله نیستند و مکان آن‌ها به فرکانس‌های پایین‌تر تغییر کرده است. بطور مثال دو قله مشخص شده در نمودار شکل ۱۰ در دمای محیط با افزایش دما به فرکانس‌های ۲۲۳/۲۷ و ۴۵۰/۱۱ هرتز (طبق شکل ۱۱) جابجا شده‌اند. در واقع با افزایش دما شاهد کاهش مقادیر فرکانس‌های طبیعی پوسته خواهیم بود.

آکوستیک در اثر این افزایش دما در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۶. مقایسه فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آزمون آکوستیک و حل عددی

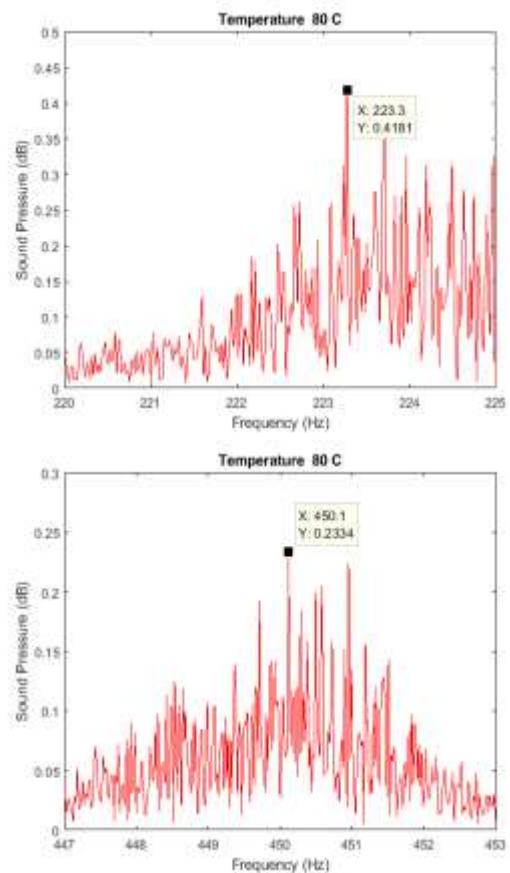
دما	آزمون آکوستیک	حل عددی	درصد خطا
۲۵ درجه سانتی‌گراد	۲۴۷/۳۲	۲۴۵/۲۰	۰/۸۶ %
۸۰ درجه سانتی‌گراد	۴۷۰/۷۷	۴۶۹/۰۳	۰/۳۷ %
۲۵ درجه سانتی‌گراد	۲۲۳/۲۷	۲۳۱/۵	۳/۶۹ %
۸۰ درجه سانتی‌گراد	۴۵۰/۱۱	۴۶۰/۰۳	۲/۲۰ %

جدول ۷. درصد تغییرات فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای در اثر افزایش دما به روش آزمون آکوستیک

پارامتر	دمای ۲۵°C	دمای ۸۰°C	درصد تغییرات
فرکانس	۲۴۷/۳۲	۲۲۳/۲۷	۹/۷۲ %
	۴۷۰/۷۷	۴۵۰/۱۱	۴/۳۹ %

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه تجربی و عددی اثرات افزایش دما بر 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 اجزاء محدود کامسول به حل عددی مسأله تجربی و شبیه‌سازی آن پرداخته شد. تطابق مناسب بین نتایج تجربی روش آزمون



شکل ۱۱. نمودار FFT مربوط به روش آزمون آکوستیک در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در محدوده فرکانسی دو فرکانس مرجع

۳-۵. مقایسه نتایج تجربی و عددی

در جدول ۶ مقایسه بین نتایج تجربی آزمون آکوستیک و حل عددی برای دو فرکانس مرجع بدست آمده از روش چکش مودال آورده شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف بین نتایج این دو روش با یکدیگر کمتر از ۴ درصد بوده است که این امر نشان می‌دهد نتایج هر دو روش حتی در دماهای بالا هم تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

مقایسه نتایج نشان می‌دهند که محل فرکانس‌های طبیعی پوسته با افزایش دما به ۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده و مقداری کاهش را تجربه می‌کنند. درصد تغییرات مقادیر فرکانس طبیعی بدست آمده از آزمون

در واقع اعمال بار گرمایش علاوه بر کاهش سفتی سیستم، فرکانس‌های طبیعی را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهند. یکی از نوآوری‌های مقاله حاضر تعیین تجربی فرکانس‌های طبیعی پوسته استوانه‌ای به روش آزمون آکوستیک می‌باشد که می‌توان از این نتایج تجربی به عنوان معیاری مناسب جهت تعیین دقت روش‌های عددی و تحلیلی استفاده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با دقت قابل قبولی می‌توان فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای را در دماهای مختلف از طریق حل عددی اجزاء محدود و به کمک نرم‌افزار کامسول محاسبه نمود.

آکوستیک در دمای محیط با نتایج آزمون چکش مودال و نتایج حل عددی نرم‌افزار، اعتبار روش آزمون و صحت نتایج شبیه‌سازی را تضمین می‌کند. در ادامه مجدداً آزمون آکوستیک بر روی پوسته استوانه‌ای نمونه و حل اجزاء محدود توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام و فرکانس‌های طبیعی جدید سازه اندازه‌گیری و ثبت گردید. از مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون آزمایشگاهی و حل اجزاء محدود مشاهده می‌شود که در دماهای بالا نیز تطابق مناسبی بین آن‌ها وجود دارد. مطابق انتظار نتایج حاصله نشان دادند که با افزایش دما، مقدار فرکانس‌های طبیعی سازه، کاهش می‌یابند.

۷. منابع

- [1] Zarastvand, M. R., M. Ghassabi, and R. Talebitooti. "Acoustic insulation characteristics of shell structures: a review." *Archives of Computational Methods in Engineering* 28 (2021): 505-523.
- [2] Chronopoulos, D., M. Ichchou, B. Troclet, and O. Bareille. "Thermal effects on the sound transmission through aerospace composite structures." *Aerospace Science and Technology* 30, no. 1 (2013): 192-199.
- [3] Rahmatnezhad, K., 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* 276 (2021): 114557.
- [4] Parhi, P. K., SK and Bhattacharyya, and P. K. Sinha. "Hygrothermal effects on the dynamic behavior of multiple delaminated composite plates and shells." *Journal of Sound and Vibration* 248, no. 2 (2001): 195-214.
- [5] Kim, Young-Wann. "Temperature dependent vibration analysis of functionally graded rectangular plates." *journal of sound and vibration* 284, no. 3-5 (2005): 531-549.
- [6] Naidu, NV Swamy, and P. K. Sinha. "Nonlinear free vibration analysis of laminated composite shells in hygrothermal environments." *Composite Structures* 77, no. 4 (2007): 475-483.
- [7] Kundu, C. K., D. K. Maiti, and P. K. Sinha. "Nonlinear finite element analysis of laminated composite doubly curved shells in hygrothermal environment." *Journal of reinforced plastics and composites* 26, no. 14 (2007): 1461-1478.
- [8] Alijani, F., Marco Amabili, and F. Bakhtiari-Nejad. "Thermal effects on nonlinear vibrations of functionally graded doubly curved shells using higher order shear deformation theory." *Composite Structures* 93, no. 10 (2011): 2541-2553.

- [9] Kiani, Y., M. Shakeri, and MR Eslami. "Thermoelastic free vibration and dynamic behaviour of an FGM doubly curved panel via the analytical hybrid Laplace–Fourier transformation." *Acta Mechanica* 223, no. 6 (2012): 1199-1218.
- [10] Jooybar, Najmeh, Parviz Malekzadeh, Alireza Fiouz, and Mohammad Vaghefi. "Thermal effect on free vibration of functionally graded truncated conical shell panels." *Thin-Walled Structures* 103 (2016): 45-61.
- [11] Wang, Yanqing, Chao Ye, and JW3839496 Zu. "Identifying the temperature effect on the vibrations of functionally graded cylindrical shells with porosities." *Applied Mathematics and Mechanics* 39, no. 11 (2018): 1587-1604.
- [12] Duc, Nguyen D., Ngo Duc Tuan, Phuong Tran, Tran Q. Quan, and Nguyen Van Thanh. "Nonlinear dynamic response and vibration of imperfect eccentrically stiffened sandwich third-order shear deformable FGM cylindrical panels in thermal environments." *Journal of Sandwich Structures & Materials* 21, no. 8 (2019): 2816-2845.
- [13] Grigorenko, O. Ya, M. Yu Borisenko, O. V. Boychuk, and A. A. Shums' ka. "Numerical determination of natural frequencies and modes of closed corrugated cylindrical shells." *International Applied Mechanics* 58, no. 5 (2022): 520-532.
- [14] Ebrahimi, Zohreh. "Free vibration and stability analysis of a functionally graded cylindrical shell embedded in piezoelectric layers conveying fluid flow." *Journal of Vibration and Control* 29, no. 11-12 (2023): 2515-2527.
- [15] Babaei, Mohammad Javad, and Ali Asghar Jafari. "Effect of thermal environment on the free vibration of functionally graded carbon nanotubes cylindrical-conical shell." *Journal of Thermal Stresses* 47, no. 1 (2024): 35-58.
- [16] Wu, Dafang, Yuewu Wang, Ying Pu, Lan Shang, and Zhentong Gao. "Experimental investigation of high temperature thermal-vibration characteristics for composite wing structure of hypersonic flight vehicles." *Journal of Vibroengineering* 17, no. 2 (2015): 917-927.
- [17] Koukounian, Viken N., and Chris K. Mechefske. "Computational modelling and experimental verification of the vibro-acoustic behavior of aircraft fuselage sections." *Applied Acoustics* 132 (2018): 8-18.
- [18] Oliazadeh, Pouria, Anooshiravan Farshidianfar, and Malcolm J. Crocker. "Study of sound transmission through single-and double-walled plates with absorbing material: Experimental and analytical investigation." *Applied Acoustics* 145 (2019): 7-24.
- [19] Zippo, Antonio, Marco Barbieri, Giovanni Iarriccio, and Francesco Pellicano. "Nonlinear vibrations of circular cylindrical shells with thermal effects: an experimental study." *Nonlinear Dynamics* 99 (2020): 373-391.
- [20] Li, Hui, Haiyu Lv, Jianfei Gu, Jian Xiong, Qingkai Han, Jinguo Liu, and Zhaoye Qin. "Nonlinear vibration characteristics of fibre reinforced composite cylindrical shells in thermal environment." *Mechanical Systems and Signal Processing* 156 (2021): 107665.
- [21] Tang, Yang, Zhe Zhao, Yuxuan Qin, Fuzhen Pang, Yuan Du, Cong Gao, and Haichao Li. "Experimental and numerical investigation on vibro-acoustic performance of a submerged stiffened cylindrical shell under multiple excitations." *Thin-Walled Structures* 197 (2024): 111569.

-
- ¹ Sound pressure level, SPL
 - ² Newmark
 - ³ Functionally graded materials, FGMs
 - ⁴ Rayleigh-Ritz
 - ⁵ Navier
 - ⁶ Love shell theory
 - ⁷ Reddy's third-order shear deformation shell theory
 - ⁸ Pasternak
 - ⁹ Love assumptions
 - ¹⁰ Jones-Nelson nonlinear material theory
 - ¹¹ Tetrahedral
 - ¹² Data-logger
 - ¹³ Fast Fourier transform, FFT
 - ¹⁴ Decibel, dB
 - ¹⁵ Pioneer
 - ¹⁶ PCB Piezotronics
 - ¹⁷ Chamber