

تحلیل فرکانسی فراماده آکوستیکی هلمهولتز-غشایی

رضا ذوالفقاری نژاد	سعید ضیایی راد*	علی لقمانی	محمد هادی فصیحی هرندي
دانشجوی کارشناسی ارشد	استاد	دانشیار	کارشناس آزمایشگاه
دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان
r.zolfaghari@me.iut.ac.ir	szrad@iut.ac.ir	a.loghmani@iut.ac.ir	fasihi.hadi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۷/۳

چکیده

در این پژوهش، عملکرد یک فراماده آکوستیکی مبتنی بر تشدیدگر هلمهولتز دوگانه کوپل شده با غشا بررسی شده است. این فراماده پتانسیل این را دارد که در زمینه‌هایی مانند سیستم تهویه و یا لوازم خانگی مانند جاروبرقی به کار برده شود. بر اساس اندازه‌گیری سطح فشار صوت مطابق استاندارد مربوطه، بازه فرکانسی هدف ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز تعیین شد. یکی از ویژگی‌های ساختار پیشنهادی این است که ضمن تضعیف صوت، مانعی در مسیر جریان هوا ایجاد نمی‌کند. نوآوری اصلی پژوهش، بررسی ارتباط مستقیم میان شکل مود غشا، تغییر حجم محفظه تشدیدگر هلمهولتز و ایجاد قله‌های افت انتقال صوت^۱ در یک ساختار هلمهولتز دوگانه-غشایی^۲ است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار کامسول^۳ در دو مرحله، شامل یک مدل ساده و سپس یک لایه از ساختار پیشنهادی، انجام شد. نتایج نشان داد قله‌های نمودار افت انتقال صوت عمدتاً در فرکانس مودهایی ظاهر می‌شوند که تغییر شکل غشا موجب تغییر حجم محفظه هلمهولتز می‌شود؛ در مدل ساده سه مود و در ساختار پیشنهادی پنج مود مؤثر از این نوع شناسایی شد. اختلاف فرکانس قله‌های نمودار افت انتقال صوت با فرکانس‌های ویژه متناظر در دو مرحله به ترتیب حدود ۲ و ۱/۵ درصد بود. همچنین محاسبه ۵۵ فرکانس ویژه در بازه صفر تا ۲۰۰۰ هرتز ۹ ثانیه زمان برد، در حالی که تحلیل دامنه فرکانسی با گام ۱ هرتز حدود ۶۳۰ ثانیه طول کشید؛ بنابراین تحلیل فرکانس ویژه با کاهش حدود ۷۰ برابری زمان محاسبات، دقت قابل قبولی برای شناسایی هدفمند قله‌های افت انتقال صوت فراهم کرد.

واژگان کلیدی: فراماده آکوستیکی، تشدیدگر هلمهولتز، غشا، شکل مود، حجم محفظه، تحلیل فرکانسی، افت انتقال صوت.

۱. مقدمه

مشکل مهم تبدیل شده است. تاکنون راهکارهای مختلفی در طی سال‌ها برای رفع مشکل نویز پیشنهاد و به کار گرفته شده است از جمله آن‌ها استفاده از

در زندگی امروزی با افزایش کاربرد وسایلی مانند لوازم خانگی که دارای موتور، فن و... می‌باشند، ایجاد صوت ناخواسته (نویز) در این وسایل و تجهیزات به یک

* نویسنده و سنول

جاذب‌های صوتی، کنترل صوت فعال^۴ و... می‌باشند. این روش‌ها برای کنترل نویزهای با فرکانس بالا و متوسط مناسب هستند ولی در فرکانس‌های پایین استفاده از آن‌ها مشکلاتی را به همراه دارد.

در مورد جاذب‌های صوتی باید گفت در لوازم خانگی چالش اصلی، نویزهای با فرکانس پایین و طول موج‌های زیاد می‌باشد زیرا فرکانس و طول موج رابطه عکس دارند. برای عملکرد مطلوب جاذب‌های صوتی می‌بایست به اندازه یک چهارم بزرگ‌ترین طول موج نویز صوتی برای این جاذب، ضخامت در نظر گرفت. پس ضخامت جاذب صوت و طول موج نویز صوتی نسبت مستقیم دارند. این جاذب‌ها اگر چه از مزایایی همچون قیمت پایین و سهولت در استفاده برخوردارند و فرکانس‌های بالا و میانی را به خوبی تضعیف می‌کنند اما زمانی که فرکانس نویز، کم و طول موج آن زیاد است باید ضخامت زیاد و حجم بیشتری برای جاذب در نظر گرفت. به علاوه بر طبق قوانین آکوستیک، میزان افت انتقال صوت با چگالی ماده جاذب نسبت مستقیم دارد. بدین معنی که هرچه اختلاف امپدانس آکوستیکی (حاصل ضرب چگالی در سرعت صوت در هر محیط) بین دو محیط بیشتر باشد افت انتقال صوت بیشتر است. برای مثال اگر موج صوت از محیط هوا وارد محیط جاذب صوت شده و دوباره وارد هوا گردد، این جاذب صوت باید تا حد ممکن چگالی بالایی داشته باشد. بنابراین وزن جاذب افزایش می‌یابد. لذا در مورد جاذب‌های صوت با معضل ضخامت و وزن زیاد رو به رو هستیم که این موضوع با توجه به محدودیت‌های لوازم خانگی اعم از جاروبرقی، ماشین لباسشویی، یخچال و... مشکل‌ساز است.

روش کنترل فعال نویز نیز از دیگر روش‌های کاهش نویز می‌باشد که در آن از یک منبع دوم تولید صوت علاوه بر منبع اصلی تولید کننده نویز استفاده می‌شود. در این روش منبع دوم، موج‌های صوتی با دامنه برابر با نویز منبع اول ولی با فاز عکس تولید می‌کند. در اثر تداخل و برهم نهی موج‌های این دو منبع، نویز خنثی می‌شود. روش کنترل فعال نویز نیاز به سیستم کنترلی، برد، میکروفون و... دارد و در نتیجه هزینه به کارگیری آن افزایش می‌یابد. به علاوه ممکن است در اثر تغییر فرکانس نویز این سیستم کنترلی ناپایدار شود.

فرامواد آکوستیکی این ظرفیت را دارند که بر همه چالش‌های مذکور فایز آیند. در توضیح فرامواد به طور کلی باید گفت همان‌گونه که از اسم‌شان مشخص است اینگونه مواد خواصی فراتر از موادی که به طور معمول در طبیعت یافت می‌شوند دارند. از جمله این خواص می‌توان به تراوایی^۵ مغناطیسی منفی، ثابت دی‌الکتریک منفی، نسبت پواسون منفی، مدول بالک منفی و چگالی منفی اشاره کرد. در واقع این مواد به صورت مصنوعی گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که دارای خواص غیرمعمول باشند. خواص این مواد علاوه بر ماده تشکیل‌دهنده آن‌ها به ساختارشان نیز بستگی دارد. این ساختار از کنار هم قرارگرفتن تعداد زیادی جزء مشابه به نام سلول واحد تشکیل می‌شوند. سلول واحد با توجه به عواملی مانند حوزه کاربرد آن فراماده، فرکانس مورد تحلیل و... ابعاد مختلفی می‌تواند داشته باشد. بنابراین فرامواد ساختاری پیچیده دارند. تعداد کمی فراماده طبیعی مانند چوب پنبه نیز وجود دارند که دارای ضریب پواسون نزدیک به صفر بوده و تحت فشار، انبساط جانبی کمی را از خود نشان می‌دهد.

تشدیدگر هلمهولتز یک استوانه توخالی (محفظه^۶) به همراه یک گلوله^۷ با قطر کوچک است که دارای یک فرکانس تشدید بوده و خواص جذب صوت آن در محدوده اطراف این فرکانس بررسی می‌شود و انرژی صوتی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند [۱]. همچنین فراماده‌ای غشایی به فراماده‌ای گفته می‌شود که در ساختار آن پوسته^۸ یا غشا^۹ به کار رفته باشد. این فراماده معمولاً از یک غشا، یک قاب برای مقید کردن غشا و در بعضی موارد از یک جرم یا جرم‌هایی که به غشا متصل شده است تشکیل می‌شوند.

با تنظیم ابعاد هندسی، جنس ماده، کشش غشا و... می‌توان فرامواد هلمهولتز و غشا را با توجه به باند فرکانسی تولید نویز تجهیز یا وسیله مورد نظر، متناسب‌سازی کرد.

فرامواد صوتی از نظر شکل و عملکرد به گروه‌های مختلفی مانند فرامواد هلمهولتز، سفتی منفی، آگزتیک^{۱۰} و غشایی تقسیم می‌شوند.

مقاله [۱] در سال ۲۰۲۴ یک ساختار جاذب صوت که شامل آرایه‌ای از تشدیدگرهای هلمهولتز دولایه می‌باشد را مورد بررسی قرار داد (شکل). عملکرد این ساختار با شبیه‌سازی و آزمایش به وسیله لوله امیدانس^{۱۱} مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از این دو بررسی مطابقت خوبی دارند. این ساختار در محدوده فرکانسی هدف ۳۰۰ تا ۱۱۰۰ هرتز جذب صدای پهن‌بند را دارا می‌باشد. همچنین ضریب جذب متوسط ساختار مذکور در این بازه فرکانسی بیش از ۰/۸ می‌باشد.

ترکیب فراماده آکوستیکی غشایی با تشدیدگر هلمهولتز یکی از این ایده‌های مطرح‌شده برای افزایش خاصیت جذب صوت می‌باشد. پژوهش [۲] در سال ۲۰۲۳ عملکرد جذب صوت فراماده آکوستیکی غشایی

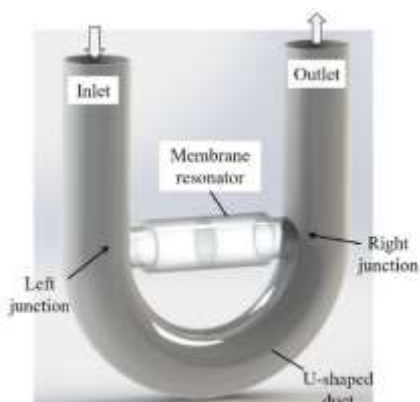


شکل ۱. الف) نمای جانبی تشدیدگر هلمهولتز دوگانه (ب) نمای سه‌بعدی تشدیدگر هلمهولتز دوگانه [۱]

که با تشدیدگر هلمهولتز ترکیب شده را مورد بررسی قرار داده است (شکل). فراماده غشایی به علت خواص تشدید محلی عملکرد جذب صوت بالایی دارد. در این پژوهش با ترکیب ساختارهای ساندویچی، دو عدد فرامواد آکوستیکی غشایی و تشدیدگر هلمهولتز ساختار جدیدی با خواص مکانیکی و جذب آکوستیکی مطلوب در فرکانس پایین طراحی شد. عملکرد جذب صوت میانگین این ساختار جدید در بازه ۵۰ تا ۱۶۰۰ هرتز، ۳۰ درصد بیشتر از ساختار ساندویچی با یک فراماده غشایی تنها و ۲۴/۸ درصد بیشتر از ساختار ساندویچی با دو فراماده غشایی و بدون تشدیدگر هلمهولتز بود.

مقاله [۳] در سال ۲۰۲۰ به بررسی یک ساختار تشدیدگر غشایی که شامل یک غشای کوپل شده با تشدیدگر هلمهولتز متصل به یک لوله U شکل است می‌پردازد. این تشدیدگر غشایی از طریق دو گردنه به

صوت^{۱۳} به میزان ۳/۶ دسی بل کاهش یافت و بازه افت انتقال صوت برای تحلیل و آزمایش به ترتیب ۲۵ - ۳۰ و ۱۰ - ۱۵ دسی بل بدست آمد.



شکل ۳. ساختار تشدیدگر غشایی متصل به لوله U شکل [۳]

استفاده از فرامواد آکوستیکی در مبحث برداشت انرژی نیز از موضوعات جدیدی است که در سال های اخیر مورد توجه پژوهش گران قرار گرفته است.

مطالعه [۵] یک مدل تحلیلی برای پیش بینی افت انتقال صوت در فراماده های آکوستیکی متشکل از صفحه ای مجهز به وصله های پیزوالکتریک شنت شده ارائه داد. در این پژوهش، با ترکیب تئوری محیط مؤثر با مدل سازی امپدانس مبتنی بر مدار الکتریکی معادل، پارامترهای مکانیکی و الکترومکانیکی مؤثر سلول واحد با استفاده از تئوری کلاسیک لمینت^{۱۴} استخراج و سپس چگالی مؤثر و STL به صورت تحلیلی و بدون نیاز به شبیه سازی های گسترده اجزای محدود محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشینه ی STL در فرکانسی رخ می دهد که چگالی مؤثر فراماده به بی نهایت میل می کند و متقابلاً کمینه ی آن منطبق با چگالی مؤثر نزدیک به صفر است. همچنین تغییر اندوکتانس^{۱۵} مدار شنت موجب جابه جایی فرکانس های پیک و افت

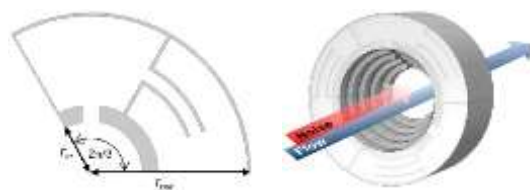
لوله U شکل متصل می شود (شکل). مطابق شبیه سازی عددی انجام شده، این ساختار یک افت انتقال فرکانس پایین مؤثر ایجاد می کند که حاصل



شکل ۲. ترکیب فراماده غشایی و تشدیدگر هلمهولتز [۲]

جفت شوندگی^{۱۲} ارتعاشی-آکوستیکی بین غشا و تشدیدگر هلمهولتز می باشد. پدیده رخ داده در این ساختار به این صورت است که فشارهای نامتعادل بین دو حفره باعث ارتعاش غشا شده و متقابلاً با افزایش ارتعاش غشا اختلاف فشار تقویت می شود. بدین صورت انرژی صوتی فرودی توسط تشدیدگر غشایی به دام می افتد. نکته دیگر این مطالعه بررسی دو نوع غشای لاستیکی و آلومینیومی است به طوری که غشای لاستیکی در مقایسه با آلومینیومی پهنای باند افت انتقال وسیع تری را فراهم می کند. همچنین تحلیل پارامتری انجام شده نشان داد با افزایش ضخامت و یا کاهش کشش غشا فرکانس تشدید این ساختار کم می شود.

پژوهش [۴] طراحی فراماده آکوستیکی برای کاهش نویز در جاروبرقی را مورد مطالعه قرار داد. فراماده آکوستیکی برمبنای اصل تشدید هلمهولتز بود و متغیرهای طراحی فراماده برای کاهش نویز در بازه ۱/۵ تا ۲/۵ کیلوهرتز تعریف شد. به علاوه سطح توان



شکل ۴. الف) ساختار هلمهولتز دوگانه موجود در مقاله (ب) سلول واحد ساختار [۶]

همان گونه که در توضیحات مقاله مرجع [۶] بیان شد، مطالعات پیشین تنها به بررسی تشدیدگرهای هلمهولتز با اشکال ساده مانند مکعب، استوانه و کره پرداخته‌اند و بررسی شکل‌های پیچیده‌تر و پیشرفته‌تر، کماکان نیازمند توجه و تحقیقات بیشتر می‌باشد. همچنین استفاده از ترکیب دو و یا چند فراماده مختلف نیز در وضعیتی مانند توضیحات فوق می‌باشد. لذا در این پژوهش با استفاده از ساختار تشدیدگر هلمهولتز دوگانه موجود در پژوهش مرجع [۶] و نیز ترکیب آن با تشدیدگر غشایی، پتانسیل کوپل این دو فراماده برای تضعیف نوفه تولیدی از جاروبرقی مدنظر قرار گرفته است. علاوه بر ویژگی پژوهش حاضر که در بالا ذکر شد، نکته دیگر الزامات عملکردی جاروبرقی می‌باشد. در جاروبرقی عمده نوفه تولیدی توسط موتور و جریان هوای خروجی ایجاد می‌گردد. بنابراین فراماده مورد نظر نباید در مسیر جریان هوای خروجی از جاروبرقی اختلال ایجاد کند. فراماده پیشنهادی از این ویژگی برخوردار است. همچنین ساختار مورد بررسی به علت دوگانه بودن تشدیدگرها و نیز لایه لایه بودن، دارای پهنای باند فرکانسی وسیع بوده و دارای چند فرکانس تشدید^{۱۶} می‌باشد.

۲. تشابه ساختار هلمهولتز و سیستم جرم و فنر

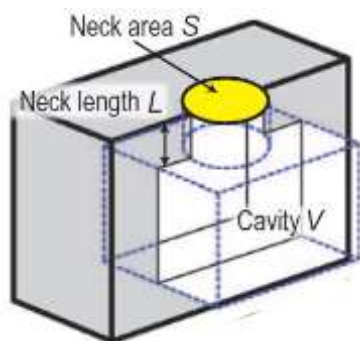
برای توضیح ساختار فیزیکی تشدیدگر هلمهولتز آن را با یک سیستم جرم و فنر مشابهت‌سازی می‌کنند [۷].

STL می‌شود، در حالی که تغییر مقاومت تنها بر شدت تضعیف در این فرکانس‌ها اثرگذار است، بدون آنکه محل فرکانسی آن‌ها را تغییر دهد. مدل ارائه‌شده با شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در نرم‌افزار کامسول اعتبارسنجی شد و تطابق قابل قبولی (با حداکثر اختلاف حدود ۱۰ درصد) بین نتایج تحلیلی و عددی مشاهده گردید. این رویکرد به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه، سریع و مقیاس‌پذیر برای روش‌های عددی محض معرفی شده و برای مراحل اولیه‌ی طراحی و بهینه‌سازی فراماده‌های عایق صوتی کاربرد دارد. با این حال، اعتبار آن محدود به فرض زیرطول‌موج (فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰۰ هرتز) بوده و کاربرد آن در سامانه‌های فرکانس بالا یا کاملاً نامنظم نیازمند اصلاحات بیشتر است.

مقاله [۶] در سال ۲۰۲۴ که مبنای این پژوهش است به بررسی کاربرد تشدیدگرهای هلمهولتز دوگانه در موج‌برهای نامتقارن و سیستم‌های تهویه می‌پردازد. مطالعات پیشین صرفاً به بررسی انواع محدودی از تشدیدگرهای ابتدایی پرداخته و فاقد اصلاحات و ایده‌های جدیدتر می‌باشند که این مسئله باعث ایجاد قله ضریب جذب صرفاً در فرکانس‌های محدود و مشخصی می‌شود. ساختار پیشنهادی در این مقاله یک عایق صوت درون لوله‌ای با تشدیدگرهای هلمهولتز دوگانه است (شکل ۱). از ویژگی‌های این ساختار انعطاف‌پذیری آن در انتخاب محدوده جذب و بازتاب است. این ساختار دارای ویژگی ۹۰ درصد تضعیف صوت در دو بازه فرکانسی ۵۵۰-۸۷۴ هرتز و ۱۳۴۴-۲۵۰۰ هرتز می‌باشد.

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (2)$$

در این رابطه مطابق شکل، c سرعت صوت، S سطح مقطع گلوله، V حجم محفظه و L طول گلوله می‌باشد.



شکل ۶. پارامترهای هندسی تشدیدگر هلمهولتز

۳. مکانیزم تضعیف موج صوت در فراماده

غشا

در فراماده غشایی با تبدیل انرژی صوتی به انرژی ارتعاشی غشا و همچنین انرژی لازم برای غلبه بر میرایی سازه‌ای موجود در آن، تضعیف صوت اتفاق می‌افتد. همچنین فرکانس تشدید غشا بر حسب هرتز از رابطه ۳ بدست می‌آید [۸]:

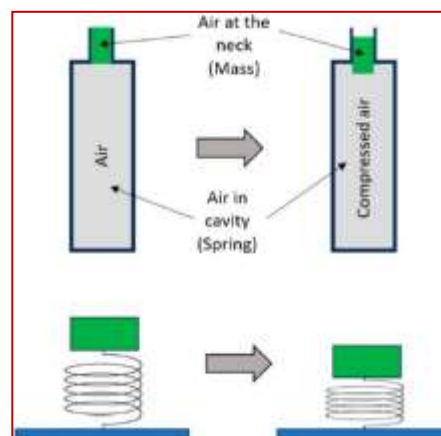
$$f_{mn} = \frac{\lambda_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{T}{\rho_s}} \quad (3)$$

در این معادله f_{mn} فرکانس تشدید مود m و n در راستاهای شعاعی و محیطی، λ_{mn} ریشه‌های تابع بسل نوع اول، R شعاع غشا، T کشش غشا و ρ_s چگالی سطحی غشا می‌باشد.

هنگامی که جریان هوا از روی یک تشدیدگر هلمهولتز عبور می‌کند هوای موجود در قسمت گلوله فشرده شده که این مسئله به نوبه‌ی خود باعث فشرده شدن هوای داخل حفره می‌شود. در اینجا یک نیروی بازگرداننده بوجود می‌آید که تمایل دارد هوای فشرده شده را مجدداً به حالت تعادل برگرداند. این نیروی بازگرداننده در ارتعاشات همان رابطه ۱ می‌باشد.

$$f = -k\Delta x \quad (1)$$

در رابطه (۱) k سفتی فنر، Δx مقدار جابه‌جایی فنر از حالت تعادل خود و f نیروی بازگرداننده می‌باشد. زمانی که فشار درون حفره تخلیه شد مجدداً به علت کم بودن فشار درون حفره نسبت به محیط بیرون هلمهولتز، هوا به داخل مکیده می‌شود و این پدیده به شکل مداوم تکرار می‌شود. بدین صورت هوای درون گلوله به مانند جرم و هوای درون محفظه مانند فنر عمل می‌کنند (شکل).



شکل ۵. معادل‌سازی ساختار تشدیدگر هلمهولتز و سیستم جرم و فنر [۷]

فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز بر حسب هرتز از رابطه ۲ بدست می‌آید:

۴. مشخصات کلی مسئله

هدف از انجام این پژوهش طراحی یک فراماده آکوستیکی مبتنی بر تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشا می باشد. بدین منظور با انجام آزمون اندازه گیری سطح فشار صوت نه نقطه ای مطابق استاندارد ISO 3744 [۹] بازه های فرکانسی که در آن نویز تولیدی جاروبرقی بیشترین میزان را دارد محاسبه شد. طبق این بررسی بازه هدف این پژوهش ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز می باشد. در جاروبرقی نوفه تولیدی عمدتاً توسط موتور و جریان هوای خروجی ایجاد می شود. بنابراین فراماده مدنظر نباید در مسیر جریان هوا مانعی ایجاد کند. همچنین نوفه تولیدی از جاروبرقی، نوفه سفید^{۱۷} بوده و نیاز است که فراماده تا جای امکان پهنای باند وسیع تری را برای تضعیف صدا، پوشش دهد.

همان گونه که پیشتر اشاره شد تشدیدگر هلمهولتز قله های جذب باریکی دارد. این پژوهش تلاش دارد با استفاده از ایده های مختلف، تا جای امکان پهنای باند وسیع تری را فراهم آورد. استفاده از تشدیدگرهای هلمهولتز سری و موازی، تشدیدگرهای هلمهولتز با شکل های پیچیده تر و کوپل کردن تشدیدگر هلمهولتز با فرامواد دیگر مانند غشا از ایده هایی است که در پژوهش های مختلف در حال بررسی می باشد.

۵. شبیه سازی عددی

در این قسمت برای انجام تحلیل فرکانسی با هدف بررسی ارتباط میان مودها و قله های نمودار افت انتقال صوت در فاز اول یک ساختار ساده شامل یک لوله که یک هلمهولتز به میانه آن متصل است و در انتهای آن غشا قرار داده شده، در نظر گرفته شد. در فاز دوم همین

بررسی برای ساختار موجود در مقاله [۶] که مرجع اصلی این پژوهش است انجام شد.

در این قسمت تنظیمات اعمال شده در نرم افزار بیان می گردد. برای شبیه سازی از نرم افزار کامسول استفاده شد. در این نرم افزار فیزیک های مورد استفاده، غشا و آکوستیک فشار^{۱۸} و نوع مطالعه^{۱۹} برای محاسبه فرکانس های طبیعی، فرکانس ویژه^{۲۰} و برای ترسیم نمودارها، دامنه فرکانسی^{۲۱} انتخاب شد. در فیزیک مربوطه از گزینه آکوستیک ناحیه باریک^{۲۲} برای در نظر گرفتن اتلاف حرارتی و ویسکوز در قسمت گلویی تشدیدگر هلمهولتز استفاده گردید و همچنین روش دو درگاه^{۲۳} برای شبیه سازی در نظر گرفته شد. دامنه فشار درگاه اول که تولید کننده صدای فرودی است ۱ پاسکال انتخاب شد.

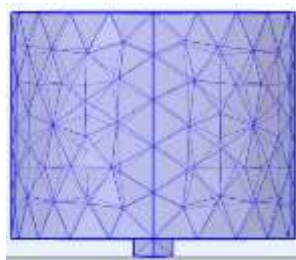
غشا از جنس لاتکس و بدنه تشدیدگر هلمهولتز صلب در نظر گرفته شد. بر لبه های غشا شرایط مرزی ثابت^{۲۴} و بر دیواره تشدیدگر هلمهولتز و لوله امپدانس شرط مرزی صوتی سخت^{۲۵} اعمال شد.

۶. تحلیل فرکانسی یک ساختار ساده شامل یک لوله با یک تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشای متصل به میانه ی آن

در این بخش ساختاری ساده شامل یک لوله با یک تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشای متصل به میانه ی آن مطابق با ابعاد جدول و شکل در نظر گرفته شد.

در این قسمت برای غشا، شبکه^{۲۶} چهارگره ای آزاد^{۲۷} و برای تشدیدگر هلمهولتز شبکه هرمی چهاروجهی آزاد^{۲۸} اعمال شده است (شکل و شکل). همچنین برای

تحلیل فرکانسی، مودهای تا ۲۰۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفت.



جدول ۱. ابعاد هندسی ساختار فاز اول (تمامی اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)

طول	شعاع	طول	شعاع	طول	شعاع
محفظه	محفظه	گلویی	گلویی	لوله	لوله
۴۰	۲۵	۵	۳/۵	۱۰۰۰	۲۵

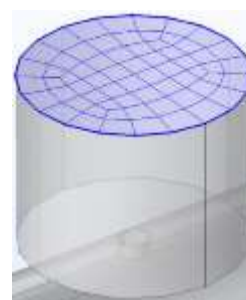
شکل ۹. شبکه‌بندی هرمی چهاروجهی تشدیدگر هلمهولتز

۶-۱. نتایج بررسی تشدیدگر هلمهولتز بدون غشا

در ابتدا برای بدست‌آوردن فرکانس‌های طبیعی تشدیدگر هلمهولتز یک تحلیل فرکانسی با استفاده از بخش فرکانس ویژه نرم‌افزار کامسول انجام شد که نتایج آن مطابق جدول است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تمامی فرکانس‌های طبیعی در مرتبه بالای ۴۰۰۰ هرتز می‌باشند و در بازه فرکانسی موردنظر قرار نمی‌گیرند.



شکل ۷. ساختار ساده در نظر گرفته شده شامل یک لوله با یک تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشای متصل به میانه‌ی آن



شکل ۸. شبکه‌بندی چهار گره‌ای غشا

جدول ۲. فرکانس‌های طبیعی هلمهولتز بدون غشا

فرکانس‌های ویژه (Hz)	۴۰۲۵	۴۰۲۵	۴۲۷۸	۵۸۸۶	۵۸۸۶	۶۶۷۶/۵	۶۶۷۷
----------------------	------	------	------	------	------	--------	------

آن‌ها با قله‌های نمودار افت انتقال صوت می‌باشد. در ادامه این دسته‌بندی ارائه می‌شود.

۶-۳. مودهای موج‌بر

دسته‌بندی اول مربوط به مودهای موج‌بر می‌باشد (جدول ۳). برای مثال، در شکل که مود اول موج‌بر را نشان می‌دهد، دیده می‌شود که تمامی فشار آکوستیکی در موج‌بر تجمع یافته و فشار درون هلمهولتز صفر

۶-۲. نتایج بررسی هلمهولتز و غشا در موج‌بر^{۲۹}

در این قسمت با انجام یک تحلیل پارامتری، کشش غشا از ۱۰۰ N/m تا ۲۰۰ N/m با گام ۱۰ تغییر داده شد و مودهای ویژه بدست آمد.

هدف از انجام این کار دو چیز است: اول دنبال کردن^{۳۰} و بررسی اینکه کدام مود نسبت به کشش غشا تابعیت دارد. هدف دوم دسته‌بندی مودها برای بررسی ارتباط



شکل ۱۰. مود اول موج‌بر

می‌باشد. برای سایر مودهای این دسته نیز اتفاقی مشابه رخ می‌دهد. این گروه از مودها تأثیری در ایجاد قله در نمودار افت انتقال صوت ایفا نمی‌کنند.

جدول ۳. مودهای موج‌بر

۱۰۳۹	۸۵۸	۶۹۴	۵۱۵	۳۶۷	۱۷۲	فرکانس‌های ویژه موج‌بر (Hz)
۲۰۶۳	۱۸۸۸	۱۷۲۱	۱۵۴۴/۵	۱۳۸۰	۱۲۰۱	

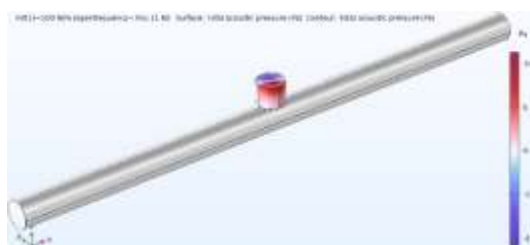
۴-۶. مودهای غشا

می‌آید (شکل ۱). این گروه از مودها نیز نقشی در ایجاد قله‌های نمودار افت انتقال صوت ندارند.



شکل ۱۱. مود دوم غشا متناظر با فرکانس ۷۶۵ هرتز

تعدادی از شکل مودهای غشا که دسته دیگری از مودها را شامل می‌شوند حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی‌دهند (جدول ۴). این دسته‌بندی، بر مبنای بررسی شکل مود غشا و توزیع فشار آکوستیکی موجود در تشدیدگر هلمهولتز در همان فرکانس حاصل شده است. در این ساختار اگر شکل مود به گونه‌ای باشد که حجم محفظه هلمهولتز را عوض نکند؛ به عنوان مود زوج و در غیر این صورت مود فرد محسوب می‌گردد. در شکل که نمایانگر مود دوم غشا می‌باشد چنین حالتی رخ داده است. به این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود انتگرال جابه‌جایی روی سطح غشا برابر صفر است و فشار آکوستیکی بسیار کمی در هلمهولتز به وجود



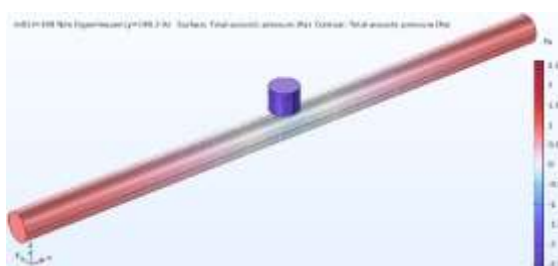
شکل ۱. توزیع فشار آکوستیکی در مود ۷۶۵ هرتز

جدول ۴. مودهایی از غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی‌دهند.

۱۴۰۴	۱۳۷۴	۱۰۶۹	۱۰۶۶	۷۷۱	۷۶۵	فرکانس‌های ویژه (Hz)
	۱۷۰۲	۱۶۰۷/۵	۱۴۸۳	۱۴۶۶	۱۴۶۵/۵	

بدین صورت باعث ایجاد قله در نمودار STL می‌شوند (جدول ۴). برای مثال اولین مودی که در این دسته قرار

در بازه مورد بررسی این پژوهش دسته‌ای از مودها وجود دارند که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر داده و

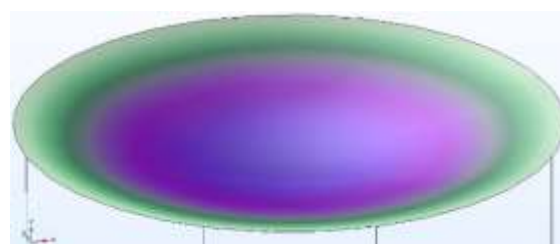


شکل ۳. توزیع فشار آکوستیکی در مود ۱۹۹ هرتز

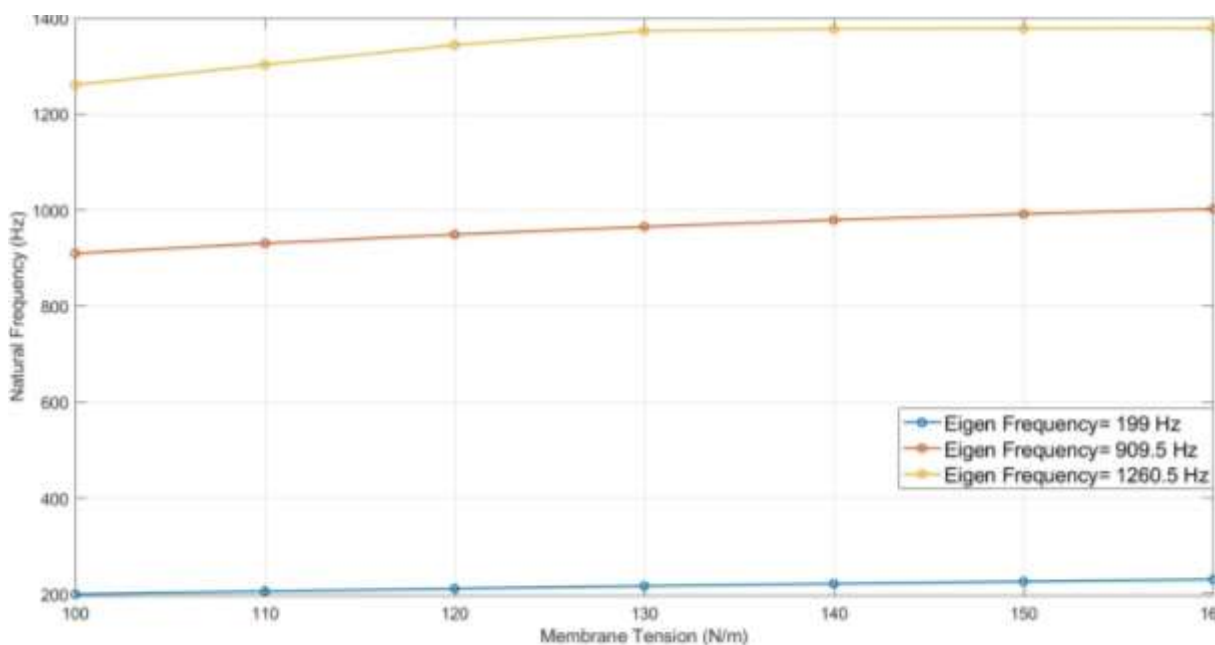
جدول ۵. مودهای فرد غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر می‌دهند.

مودهای فرد غشا و آکوستیک (Hz)	۱۹۹	۹۰۹/۵	۱۲۶۰/۵
----------------------------------	-----	-------	--------

دارد در شکل ۲ و شکل ۳ که متناظر با فرکانس ۱۹۹ هرتز می‌باشد، نمایش داده شده است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد؛ با هدف تعیین مودهای وابسته به غشا، مقدار کشش غشا تغییر داده شد و مودهای مذکور که باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز می‌شوند؛ محاسبه گردید. شکل ۴ نمودار تغییر این سه مود را برحسب کشش غشا نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که با افزایش کشش غشا، مطابق انتظار مودهای ویژه نیز به سمت فرکانس‌های بیشتر منتقل شده‌اند.



شکل ۲. مود اول غشا متناظر با فرکانس ۱۹۹ هرتز



شکل ۴. نمودار مودهای طبیعی تغییر دهنده حجم محفظه هلمهولتز بر حسب کشش غشا در ساختار ساده

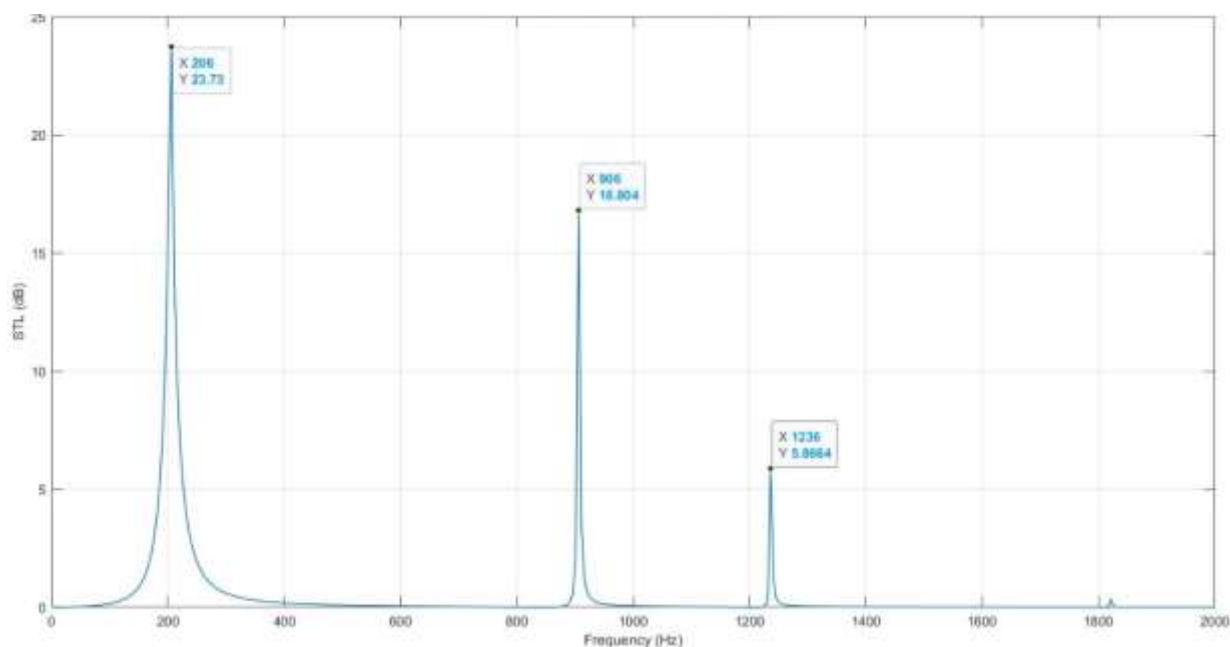
۵-۶. تحلیل قله‌های نمودار STL

نمودار STL ساختار مذکور مطابق شکل ۵ است. همانطور که مشاهده می‌شود قله‌های نمودار با تقریب خوبی متناظر با مودهای جدول می‌باشند. علت اختلاف موجود بین مقادیر نمودار و جدول، به حل‌گرهای نرم‌افزار برمی‌گردد. جدول با استفاده از حل‌گر فرکانس ویژه (Eigenfrequency) نرم‌افزار کامسول و شکل ۵. نمودار STL ساختار ساده شکل با حل‌گر دامنه فرکانسی (Frequency Domain) این نرم‌افزار بدست آمده است و حدود ۲ درصد بین مقادیر فوق اختلاف وجود دارد.

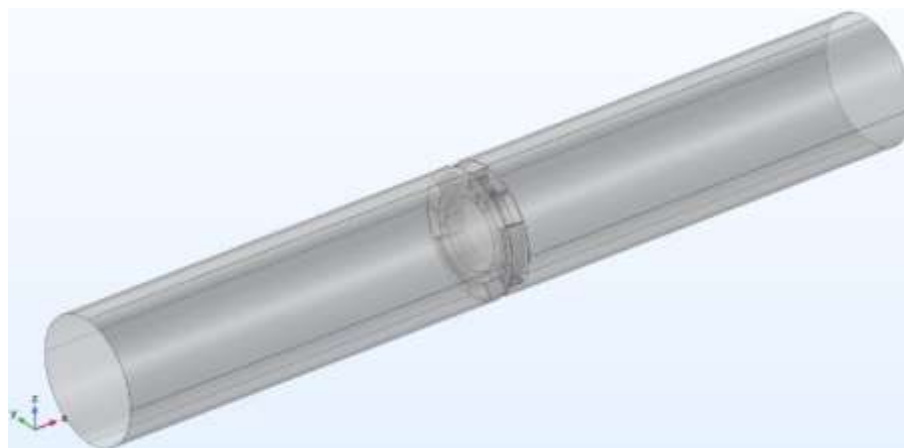
بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که همان‌طور که در رابطه فرکانس طبیعی هلمهولتز بیان شد حجم عامل مهمی در تشدید هلمهولتز است و حتی پس از کوپل شدن با غشا کماکان این تابعیت ادامه می‌یابد.

۷. تحلیل فرکانسی هلمهولتز دوگانه شامل یک لایه از ساختار پیشنهادی کوپل شده با غشا

در این فاز یک لایه از ساختار هلمهولتز دوگانه موجود در مقاله [۶] را در نظر گرفته و مطابق شکل ۶ در دو سمت آن غشا قرار می‌دهیم.



شکل ۵. نمودار STL ساختار ساده شکل



شکل ۶. ساختار در نظر گرفته شده برای فاز دوم تحلیل فرکانسی

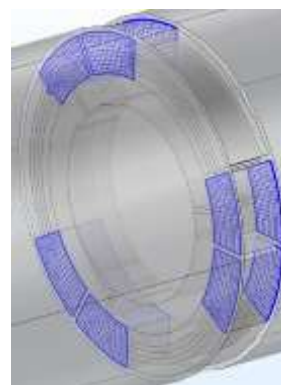
۷-۱. نتایج بررسی ساختار پیشنهادی هلمهولتز

بدون غشا

مطابق روند فاز اول ابتدا فرکانس‌های طبیعی ساختار پیشنهادی هلمهولتز بدون غشا را محاسبه می‌کنیم (جدول ۲). این کار با این هدف صورت می‌گیرد که با افزودن غشا به ساختار پیشنهادی هلمهولتز، منشأ مودها بهتر شناسایی شوند. برای مثال ممکن است در ساختار پیشنهادی کوپل هلمهولتز و غشا، بعضی مودها عمدتاً به دلیل نزدیکی به فرکانس طبیعی هلمهولتز و بعضی دیگر به خاطر نزدیکی به فرکانس طبیعی غشا ایجاد گردند. در حالت‌های بعدی این مسئله بیشتر بررسی می‌شود.

همچنین ابعاد هندسی این ساختار مطابق جدول ۱ است. این ابعاد بر مبنای اعداد موجود در مقاله مرجع [۶] انتخاب شده‌اند.

شبکه‌بندی این حالت نیز برای غشا و هلمهولتز، مشابه فاز اول می‌باشد (شکل ۷ و شکل ۸). در اینجا برای تحلیل فرکانسی مودهای تا ۳۰۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفت.



شکل ۷. شبکه‌بندی چهار گره‌ای غشا

۷-۲. نتایج بررسی ساختار پیشنهادی هلمهولتز

و غشا در موج بر

در این قسمت نیز با انجام یک تحلیل پارامتری نیروی کشش غشا از 100 N/m تا 160 N/m با گام ۱۰ تغییر داده و نتایج ثبت می شود. همچنین هر کدام از مودهای موجود در بازه هدف (۰ تا ۳۰۰۰ هرتز)، دنبال شده و در جدولی ثبت می شود. در ادامه نیز همانند فاز اول مودها را برحسب منشأ آنها دسته بندی می کنیم.



شکل ۸. شبکه بندی هرمی چهاروجهی تشدیدگر هلمهولتز دوگانه

جدول ۱. ابعاد هندسی ساختار مورد بررسی در فاز دوم [۶]

طول گلویی دوم (Ln2)	طول گلویی اول (Ln1)	عرض گلویی دوم (Wn2)	عرض گلویی اول (Wn1)	طول موج بر	شعاع موج بر
۲۷/۲۲ [mm]	۵ [mm]	۱ [mm]	۱ [mm]	۴۰۸ [mm]	۳۰ [mm]

جدول ۲. فرکانس های طبیعی هلمهولتز تنها

فرکانس های ویژه (Hz)	۵۲۵	۵۲۵	۷۱۶	۱۵۹۸	۱۵۹۹	۱۸۹۳	۲۶۵۴	۲۶۵۴	۲۶۵۴
----------------------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------

۷-۳. مودهای موج بر

با همان استدلال ارائه شده در فاز اول مشاهده می شود که این دسته از مودها (جدول) تأثیری در نمودار STL ندارند. مبنای این دسته بندی نیز همانند فاز اول، توزیع فشار آکوستیکی در موج بر می باشد.

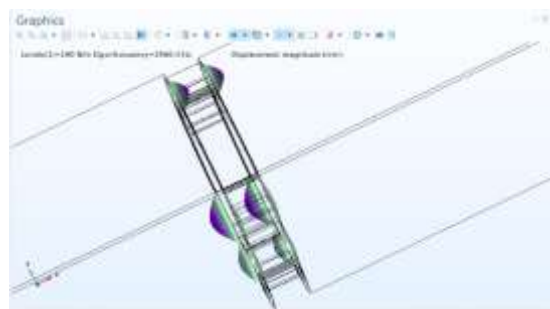
۷-۴. مودهای غشا در ساختار پیشنهادی

در این دسته از مودها (جدول) مشاهده می شود که آرایش شکل مود غشاها به گونه ای است که تغییری در حجم محفظه هلمهولتز ایجاد نمی کند و لذا در ایجاد قله های نمودار STL نیز نقشی ندارد. کماکان مانند فاز اول، شکل مود غشا و نیز توزیع فشار آکوستیکی در ساختار تشدیدگر عامل اصلی این دسته بندی می باشد.

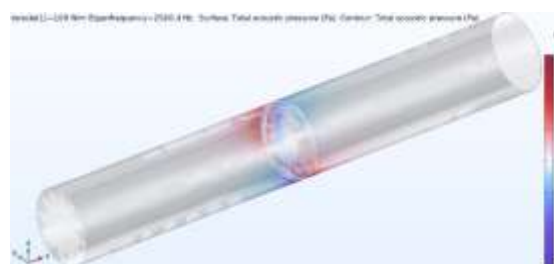
به عنوان نمونه، اولین مودی که در این دسته بندی قرار می گیرد؛ مود متناظر با فرکانس ۲۵۶۰ هرتز است که شکل مود غشا و کانتور فشار آکوستیکی آن در شکل ۹ و شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در شکل ۹ مشاهده می شود که میزان برآمدگی و یا فرورفتگی غشاهای سمت چپ و راست مربوط به هر محفظه هلمهولتز برابر بوده و لذا تغییری در حجم محفظه هلمهولتز ایجاد نمی شود.

لازم به توضیح است که در جدول مودهای اول تا سوم و مودهای چهارم تا ششم مودهای سه گانه و مودهای هفتم و نهم مودهای دو گانه بوده که به علت تقارن در ساختار غشاها بوجود می آیند.

با مقایسه مودهای موجود در جدول و جدول ۲ مشاهده می شود که برخی از فرکانس ها مقداری نزدیک به هم دارند. در این حالت می توان این گونه برداشت کرد که به علت افزودن غشا، فرکانس های طبیعی تشدیدگر هلمهولتز تغییر کرده و فرکانس های موجود در جدول حاصل می گردد. به عبارت دیگر بخشی از عملکرد جذب صوت ناشی هلمهولتز و بخش دیگر ناشی از غشا می باشد. شکل ۱۲ نیز نمایان گر تغییر مقدار فرکانس مودهای تغییر دهنده حجم محفظه بر حسب کشش غشا است که دیده می شود با افزایش کشش، مقدار فرکانس های طبیعی نیز افزایش می یابد.



شکل ۹. مود غشای متناظر با فرکانس ۲۵۶۰ هرتز



شکل ۱۰. توزیع فشار آکوستیکی در مود ۲۵۶۰ هرتز

دسته بندی دیگر مودهای غشا، مربوط به مودهایی هستند که حجم محفظه را تغییر می دهند. همانگونه که در شکل ۲۲-ب مشاهده می شود؛ چیدمان لایه های غشا به گونه ای است که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر داده و باعث ایجاد قله در نمودار STL می گردد.

جدول ۸. مودهای موج بر

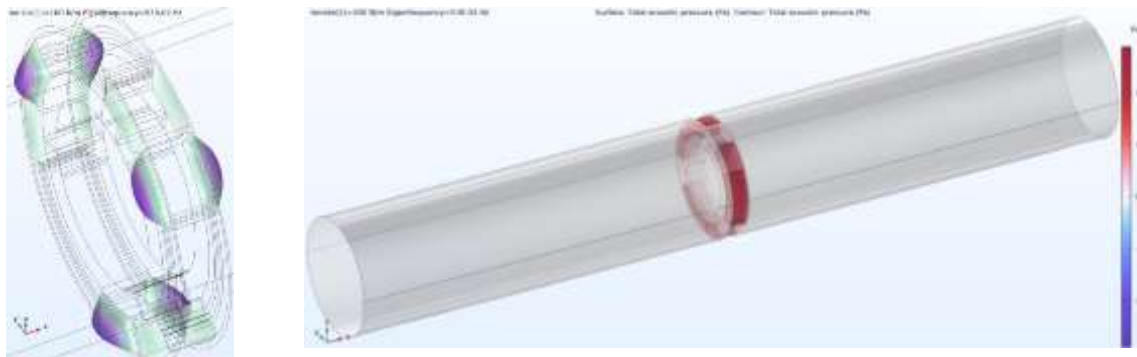
فرکانس های ویژه موج بر (Hz)	۳۸۰	۸۵۱	۱۱۴۸	۱۷۰۷	۱۹۲۸	۲۵۲۹	۲۵۴۰	۲۸۰۴
-----------------------------	-----	-----	------	------	------	------	------	------

جدول ۹. مودهایی از غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی دهند.

فرکانس های ویژه (Hz)	۲۵۶۰	۲۵۶۰	۲۶۰۹	۲۶۱۰	۲۶۱۰
----------------------	------	------	------	------	------

جدول ۱۰. مودهای غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر می دهند.

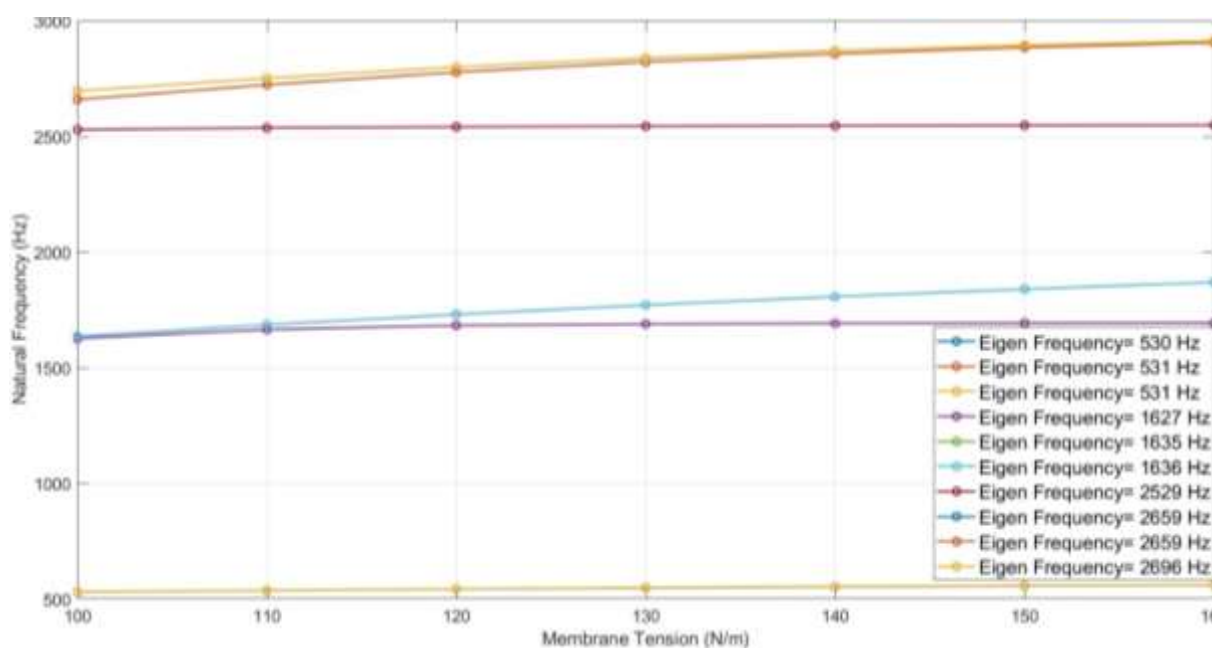
فرکانس های ویژه (Hz)	۵۳۰	۵۳۱	۵۳۱	۱۶۲۷	۱۶۳۵	۱۶۳۶	۲۵۲۹	۲۶۵۹	۲۶۵۹	۲۶۹۶
----------------------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------



ب

الف

شکل ۱۱. الف) توزیع فشار آکوستیکی (ب) شکل مود متناظر با فرکانس ۵۳۰ هرتز

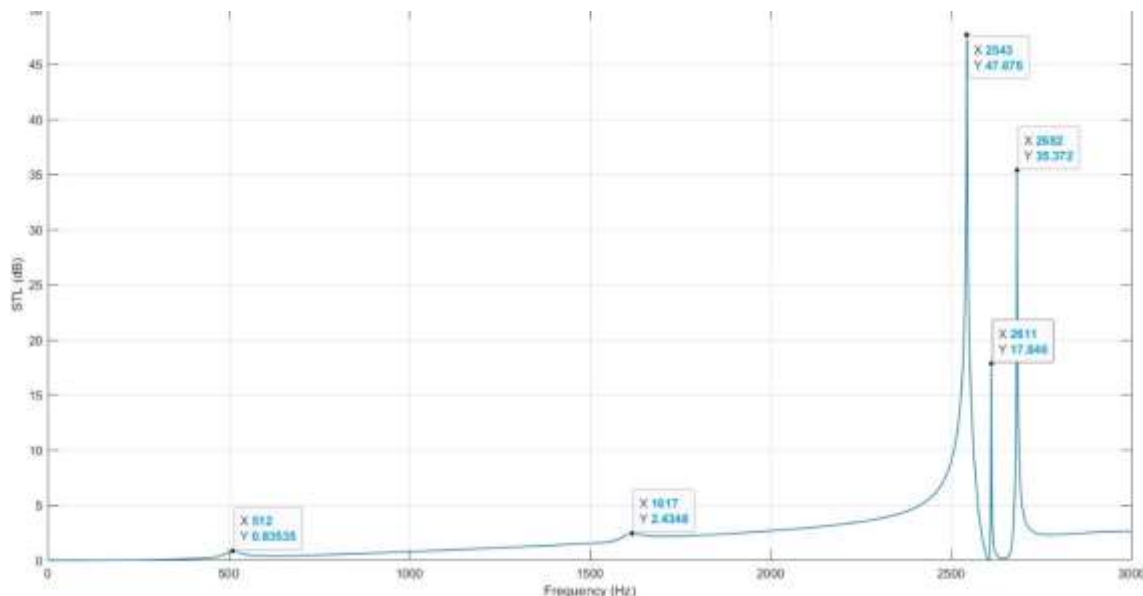


شکل ۱۲. نمودار مودهای طبیعی تغییر دهنده حجم محفظه هلمهولتز بر حسب کشش غشا در ساختار پیشنهادی

جدول نیز همانند بررسی ساختار ساده، استفاده از حل گرهای مختلف در نرم افزار عامل ایجاد اختلاف بین نتایج نمودار و جدول می باشد و تفاوتی در حدود ۱/۵ درصد بین نتایج را پدید می آورد.

۵-۷. تحلیل قله های نمودار STL

مطابق شکل دیده می شود که قله های موجود در این نمودار با اختلاف قابل قبولی با مودهای جدول منطبق هستند. درباره اختلاف موجود بین اعداد نمودار و



شکل ۲۴. نمودار STL ساختار شکل ۶

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل فرکانسی ساختار فراماده آکوستیکی مبتنی بر تشدیدگر هلمهولتز کوپل‌شده با غشا انجام شد. با بررسی دو مدل (ساختار ساده و لایه‌ای از ساختار پیشنهادی)، نشان داده شد که قله‌های نمودار STL عمدتاً در فرکانس‌هایی ظاهر می‌شوند که شکل مود غشا باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز گردد. این یافته تأیید می‌کند که حتی پس از کوپل شدن با غشا، فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز همچنان تحت تأثیر حجم محفظه قرار دارد. نتایج حاکی از آن است که تحلیل فرکانسی، روشی کارآمد و کم‌هزینه برای شناسایی و انتقال قله‌های نمودار STL به بازه هدف می‌باشد و در مقایسه با تحلیل بر روی کل دامنه فرکانسی، زمان محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای مثال در بررسی ساختار ساده فاز اول برای محاسبه ۵۵ فرکانس

ویژه ساختار که در بازه صفر تا ۲۰۰۰ هرتز قرار داشت؛ زمان محاسبه برابر ۹ ثانیه بود. اما همین مورد، برای دامنه کامل فرکانسی با رزولوشن فرکانسی ۱ هرتز حدود ۶۳۰ ثانیه طول می‌کشید. لذا برای انجام تحلیل‌ها در زمان بهینه، بررسی تنها فرکانس‌های ویژه مناسب‌تر است.

دسته‌بندی مودها نشان داد که تنها مودهایی که حجم محفظه را تغییر می‌دهند، در ایجاد قله‌های مؤثر در نمودار STL نقش دارند، در حالی که موده‌های موج‌بر و موده‌های غشایی بدون تغییر حجم، تأثیر ناچیزی بر عملکرد جذب دارند.

این پژوهش با ارائه ارتباط مستقیم بین شکل مود غشا و عملکرد آکوستیکی، راهکاری عملی برای طراحی هدفمند فرامواد آکوستیکی ارائه می‌دهد.

- [1] X. Li and Q. Mao, "A Helmholtz Resonator Array for Low-Frequency Broadband Sound Absorption," in *Proceedings of the 6th China Aeronautical Science and Technology Conference*, Singapore, 2024// 2024: Springer Nature Singapore, pp. 580-586.
- [2] H.-Z. Li, X.-C. Liu, Q. Liu, S. Li, J.-S. Yang, L.-L. Tong, S.-B. Shi, R. Schmidt, and K.-U. Schröder, "Sound insulation performance of double membrane-type acoustic metamaterials combined with a Helmholtz resonator," *Applied Acoustics*, vol. 205, p. 109297, 2023.
- [3] Y. Mi and X. Yu, "Attenuation of low-frequency sound in U-shaped duct with membrane coupled acoustic resonator: Modeling and analysis," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 489, p. 115679, 2020.
- [4] K. Y. An, H. Kwon, J.-Y. Jang, and K. Song, "Acoustic metamaterial design for noise reduction in vacuum cleaner," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, no. 11, pp. 5353-5362, 2022.
- [5] Z. Jazayeri, A. Loghmani, and H. Nahvi, "Analytical modeling of sound transmission loss in shunted piezo-plate acoustic metamaterials," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 47, no. 9, p. 422, 2025/06/28 2025, doi: 10.1007/s40430-025-05753-0.
- [6] I. Han, I. Lee, and G. Yoon, "Studies on dual Helmholtz resonators and asymmetric waveguides for ventilated soundproofing," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1432, 2024.
- [7] R. Hedayati and S. P. Lakshmanan, "Active acoustic metamaterial based on Helmholtz resonators to absorb broadband low-frequency noise," *Materials*, vol. 17, no. 4, p. 962, 2024.
- [8] A. F. Bower, 1st Edition ed. Boca Raton(in English). 2009.
- [9] *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*, I. O. f. S. (ISO), Geneva, Switzerland, 2010-10-01. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/52055.html>

-
- ¹ Sound Transmission Loss, STL
 - ² Dual Helmholtz Resonator Coupled with Membrane
 - ³ Comsol
 - ⁴ Active noise control
 - ⁵ Permeability
 - ⁶ Cavity
 - ⁷ Neck
 - ⁸ Shell
 - ⁹ Membrane
 - ¹⁰ Auxetic
 - ¹¹ Impedance Tube
 - ¹² Coupling
 - ¹³ Sound power level
 - ¹⁴ Classical Laminated Plate Theory, CLPT
 - ¹⁵ Inductance
 - ¹⁶ Multi-resonance
 - ¹⁷ White Noise

-
- ¹⁸ Pressure Acoustics
 - ¹⁹ Study
 - ²⁰ Eigenfrequency
 - ²¹ Frequency Domain
 - ²² Narrow Region Acoustics
 - ²³ Two Port
 - ²⁴ Fixed Constraint
 - ²⁵ Sound Hard Boundary
 - ²⁶ Mesh
 - ²⁷ Free Quad
 - ²⁸ Free Tetrahedral
 - ²⁹ Waveguide
 - ³⁰ Track