

تحلیل فرکانسی فراماده آکوستیکی بر مبنای تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشا به منظور کاهش نویز در جاروبرقی

رضا ذوالفقاری نژاد^{۱*}، سعید ضیایی راد^۲، علی لقمانی^۳، محمد هادی فصیحی هرنندی^۴

^۱ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، استاد

^۳ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشیار

^۴ ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، سایر

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r.zolfaghari@me.iut.ac.ir

در این پژوهش یک ساختار تشدیدگر هلمهولتز دوگانه کوپل شده با غشا در نظر گرفته شده و تحلیل فرکانسی برای یافتن قله‌های نمودار افت انتقال صوت آن انجام می‌شود و نحوه انتقال این فرکانس‌های طبیعی به بازه فرکانسی هدف بررسی می‌شود. در ادامه نیاز است برای افزایش مقدار افت انتقال صوت در بازه فرکانسی هدف بهینه‌سازی انجام شود. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار COMSOL انجام شده است. با توجه به پیچیدگی موجود در ساختار مذکور ابتدا یک مدل ساده شامل یک لوله که یک تشدیدگر هلمهولتز کوپل شده با غشا در وسط آن قرار دارد را در نظر گرفته و تحلیل فرکانسی برای آن انجام می‌گیرد. در این بخش بازه فرکانسی صفر تا ۲۰۰۰ هرتز مدنظر می‌باشد. در ادامه یک لایه از ساختار موردنظر که در دو سمت آن غشا می‌باشد در نظر گرفته شده و روند مرحله قبل تا فرکانس ۲۶۰۰ هرتز برای این ساختار نیز تکرار شده است. نتیجه تحلیل فرکانسی هر دو مرحله کاملاً یکسان می‌باشد. یافته‌های این پژوهش نشان دادند که فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز می‌تواند دید حجم محفظه، یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر این فرکانس می‌باشد. یافته‌های این پژوهش نشان دادند که فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز پس از کوپل شدن با غشا نیز کماکان تابع حجم هلمهولتز است. به عبارت دیگر هنگامی که شکل مود غشا به گونه‌ای باشد که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر دهد، در این مود در نمودار STL قله بوجود می‌آید. در بررسی مدل ساده مشاهده شد که هر سه مودی که در آن‌ها حجم محفظه تشدیدگر هلمهولتز تغییر می‌کند در نمودار STL قله ایجاد می‌کنند. بعلاوه استفاده از تحلیل فرکانسی در مقایسه با تحلیل بر روی کل بازه فرکانسی هزینه محاسباتی کمتری در پی دارد. بررسی تجربی عملکرد جذب صوت این فراماده مربوط به گام‌های بعدی می‌باشد که در آینده انجام خواهد شد.

کلمات کلیدی: تشدیدگر هلمهولتز؛ غشا؛ شکل مود؛ حجم محفظه.

۱- مقدمه

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 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 جاذب‌های صوتی، کنترل صوت فعال^۱ 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. 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. بعلاوه، بر طبق قوانین آکوستیک، میزان افت انتقال صوت با چگالی ماده جاذب نسبت مستقیم دارد. بنابراین وزن جاذب افزایش می‌یابد. لذا در مورد جاذب‌های صوت با معضل ضخامت و وزن زیاد روبرو هستیم که این موضوع با توجه به محدودیت‌های لوازم خانگی اعم از جاروبرقی، ماشین لباسشویی، یخچال و... مشکل ساز است.

فرامواد آکوستیکی این ظرفیت را دارند که بر همه چالش‌های مذکور فائق آیند. خواص این مواد علاوه بر ماده تشکیل‌دهنده آن‌ها به ساختارشان نیز بستگی دارد. این ساختار از کنار هم قرار گرفتن تعداد زیادی جز مشابه به نام سلول واحد تشکیل می‌شوند.

تشدیدگر هلمهولتز یک استوانه توخالی (محفظه^۲) به همراه یک گلولی^۳ 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^۴ یا غشای^۵ به کار رفته باشد.

مقاله [۱] در سال ۲۰۲۴ یک ساختار جاذب صوت که شامل آرایه‌ای از تشدیدگرهای هلمهولتز دولایه می‌باشد را مورد بررسی قرار داد. عملکرد این ساختار با شبیه‌سازی و آزمایش به وسیله لوله امپدانس^۶ 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 که با تشدیدگر هلمهولتز ترکیب شده را مورد بررسی قرار داده است. 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 می‌باشد.

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 لوله U شکل متصل می‌شود. مطابق شبیه‌سازی عددی انجام شده، این ساختار یک افت انتقال فرکانس پایین موثر ایجاد می‌کند که حاصل جفت‌شوندگی^۷ ارتعاشی-آکوستیکی بین غشا و تشدیدگر هلمهولتز می‌باشد. 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 می‌شود. 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 وسیع‌تری را فراهم می‌کند. همچنین تحلیل پارامتری انجام‌شده نشان داد با افزایش ضخامت و یا کاهش کشش غشا فرکانس تشدید این ساختار کم می‌شود.

^۱ Active noise control

^۲ Cavity

^۳ Neck

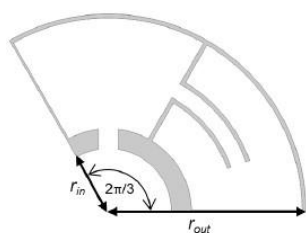
^۴ Shell

^۵ Membrane

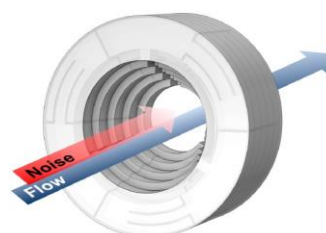
^۶ Impedance Tube

^۷ Coupling

پژوهش [۴] طراحی فراماده آکوستیکی برای کاهش نویز در جاروبرقی را مورد مطالعه قرار داد. فراماده آکوستیکی بر مبنای 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 صوت^۱ به میزان ۳.۶ دسی‌بل کاهش یافت و بازه افت انتقال صوت برای تحلیل و آزمایش به ترتیب ۲۵ - ۳۰ و ۱۰ - ۱۵ دسی‌بل بدست آمد. مقاله [۵] 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 قله‌ی ضریب جذب صرفاً در فرکانس‌های محدود و مشخصی می‌شود. ساختار پیشنهادی در این مقاله یک عایق صوت درون لوله‌ای با تشدیدگرهای هلمهولتز دوگانه است. 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.



ب



الف

شکل ۱. الف) ساختار هلمهولتز دوگانه موجود در مقاله ب) سلول واحد ساختار [۵]

۲- ارائه مدل‌های فیزیکی و ریاضی، ارائه مشخصات کلی مسئله

۲-۱ فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز

برای توضیح ساختار فیزیکی تشدیدگر هلمهولتز آن را با یک سیستم جرم و فنر مشابهت‌سازی می‌کنند [۶]. بدین صورت که هوای درون گلولی به مانند جرم و هوای درون محفظه مانند فنر عمل می‌کنند. فرکانس طبیعی تشدیدگر هلمهولتز بر حسب هرتز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (1)$$

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

۲-۲ 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 (۴) بدست می‌آید:

$$f_{mn} = \frac{\lambda_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{T}{\rho_s}} \quad (4)$$

^۱ Sound power level

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 چگالی سطحی غشا می‌باشد.

۲-۳ مشخصات کلی مسئله

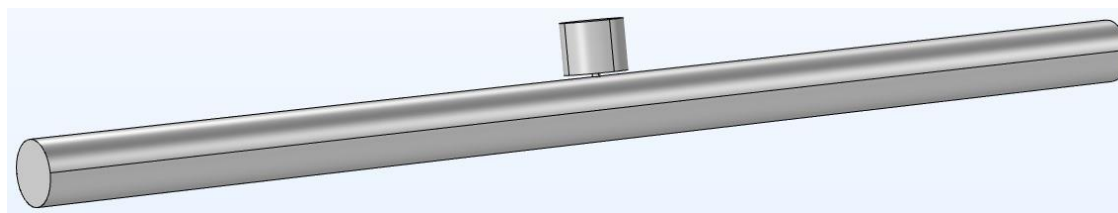
هدف از انجام این پژوهش طراحی یک فراماده آکوستیکی مبتنی بر تشدیدگر هلمهولتز کوپل‌شده با غشا می‌باشد. بازه هدف این پژوهش ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز می‌باشد.

۳- شبیه‌سازی

در این قسمت برای انجام تحلیل فرکانسی با هدف بررسی ارتباط میان مودها و قله‌های 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 [۵] که مرجع اصلی این پژوهش است انجام شد. غشا از جنس لاتکس و بدنه تشدیدگر هلمهولتز صلب در نظر گرفته شد. بر لبه‌های غشا شرایط مرزی ثابت (Fixed Constraint) و بر دیواره تشدیدگر هلمهولتز و لوله امپدانس شرط مرزی صوتی سخت (Sound Hard Boundary) اعمال شد.

۳-۱ تحلیل فرکانسی ساختار ساده

در این بخش ساختاری مطابق با ابعاد (جدول ۱) در نظر گرفته شد.



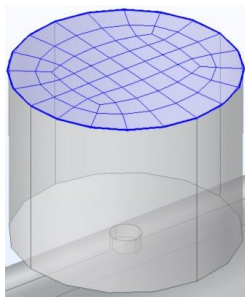
شکل ۲. ساختار ساده در نظر گرفته شده شامل یک لوله با یک تشدیدگر هلمهولتز کوپل‌شده با غشای متصل به میانه‌ی آن

جدول ۱. ابعاد هندسی ساختار فاز اول

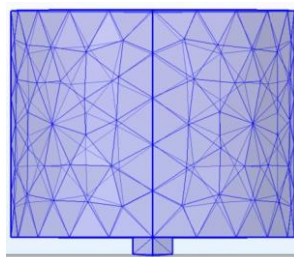
طول محفظه	شعاع محفظه	طول گلویی	شعاع گلویی	طول لوله	شعاع لوله
۴۰ [mm]	۲۵ [mm]	۵ [mm]	۳/۵ [mm]	۱۰۰۰ [mm]	۲۵ [mm]

در این قسمت برای غشا، شبکه^۱ چهارگرای آزاد و برای تشدیدگر هلمهولتز شبکه هرمی چهاروجهی آزاد اعمال شده است (شکل ۳ و شکل ۴). همچنین برای تحلیل فرکانسی، مودهای تا ۲۰۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفت. به طور کلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی از قسمت فرکانس ویژه (Eigenfrequency) نرم‌افزار کامسول و برای ترسیم نمودارها از قسمت دامنه فرکانسی (Frequency Domain) آن استفاده شد.

^۱ Mesh



شکل ۳. شبکه‌بندی چهار گره‌ای غشا



شکل ۴. شبکه‌بندی هرمی چهاروجهی تشدیدگر هلمهولتز

۳-۱-۱ نتایج بررسی تشدیدگر هلمهولتز بدون غشا

در ابتدا برای بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی تشدیدگر هلمهولتز یک تحلیل فرکانسی با استفاده از بخش فرکانس ویژه (Eigenfrequency) نرم‌افزار کامسول انجام شد که نتایج آن مطابق (جدول ۲) است.

جدول ۲. فرکانس‌های طبیعی هلمهولتز بدون غشا

فرکانس‌های ویژه (Hz)	۴۰۲۵/۲	۴۰۲۵/۳	۴۲۷۸/۴	۵۸۸۶/۰	۵۸۸۶/۴	۶۶۷۶/۵	۶۶۷۷/۱
----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

همانگونه که مشاهده می‌شود تمامی فرکانس‌های طبیعی در مرتبه بالای ۴۰۰۰ هرتز می‌باشد و در بازه فرکانسی موردنظر قرار نمی‌گیرد.

۳-۱-۲ نتایج بررسی هلمهولتز و غشا در موجبر

در این قسمت با انجام یک تحلیل پارامتری کشش غشا را از ۱۰۰ N/m تا ۲۰۰ N/m با گام ۱۰ تغییر داده و مودهای ویژه بدست می‌آیند. (جدول ۳) نتایج را نشان می‌دهد. هر مود با یک رنگ مشخص شده است.

جدول ۳. فرکانس‌های ویژه حاصل از تغییر کشش غشا

2.0905E-6+1.3004E-4i	1.1060E-4+6.9944E-Si	1.0720E-4+2.5952E-Si	3.1844E-5+1.5295E-4i	0.0013566+7.7296E-4i	2.2515E-4+7.3286E-4i	2.4705E-4+7.8856E-Si	2.7787E-4+9.6123E-Si	4.5087E-4+3.7695E-4i	3.3666E-4+4.1252E-4i	1.9867E-4+3.0796E-4i
199.2	205.45	211.18	216.47	221.35	225.87	230.06	233.96	237.59	240.98	244.15
367.52	368.52	369.52	370.52	371.52	372.53	373.53	374.53	375.53	376.53	377.52
514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82	514.82
694.32	694.67	694.98	695.26	695.52	695.76	695.98	696.19	696.39	696.57	696.75
765.11	802.37	837.96	858.04	858.04	858.04	858.04	858.04	858.04	858.04	858.04
771.07	808.61	844.47	872.08	904.9	936.56	967.16	996.82	1017.8	1022.6	1025.9
858.04	858.04	858.04	878.85	911.92	943.82	974.66	1004.5	1025.6	1053.6	1079.8
909.5	930.65	948.96	965.04	979.23	991.69	1002.4	1011.1	1023.5	1061.7	1080.8
1098	1099.2	1099.4	1099.4	1099.4	1099.4	1099.4	1099.4	1099.4	1099.4	1099.2
1066	1118	1167.7	1201.3	1201.3	1201.3	1201.3	1201.3	1201.3	1201.3	1201.3
1068.9	1171	1170.8	1215.3	1261.1	1305.3	1348.1	1379	1379.1	1379.2	1379.1
1201.3	1201.3	1201.3	1218.5	1264.4	1308.7	1351.6	1389.5	1429.7	1468.8	1506.9
1260.5	1302.6	1343.8	1373	1377.5	1378.4	1378.8	1393.1	1433.4	1472.6	1510.8
1374.2	1380.9	1382.5	1396	1433.6	1474.4	1515	1528.2	1537	1544.5	1544.5
1380.3	1441.2	1483.8	1492.8	1501.7	1510.6	1519.5	1528.5	1537.2	1545.6	1544.2
1404	1472.5	1484	1493.1	1502	1510.9	1519.7	1528.5	1537.2	1545.9	1544.5
1465.5	1474.7	1505.3	1544.5	1584.5	1584.5	1555.1	1594.5	1633.1	1670.8	1670.8
1465.8	1475	1537.9	1566.7	1625.8	1682.8	1721.1	1721.1	1721.1	1721.1	1721.6
1482.6	1544.5	1544.5	1600.6	1661	1719.2	1737.9	1791.3	1843.2	1887.8	1887.8
1544.5	1554.8	1623.8	1689.9	1721	1721.1	1775.6	1830.1	1875	1892.9	1910.6
1607.5	1685.8	1721	1721	1753.5	1814.8	1838.6	1856.9	1883.1	1893.7	1942.8
1702	1721	1760.6	1782.8	1801.6	1820.2	1874.1	1887.8	1887.8	1934.7	1984.9
1720.9	1744.5	1763.8	1832.3	1887.8	1887.8	1887.8	1931.6	1987.3	2041.5	2063.3

هدف از محاسبه جدول بالا دو چیز است: اول دنبال کردن و بررسی اینکه کدام مود نسبت به کشش غشا تابعیت دارد. برای مثال مود اول در جدول بالا به دلیل اینکه با افزایش کشش غشا هیچ تغییری نداشته، وابستگی به کشش غشا ندارد.

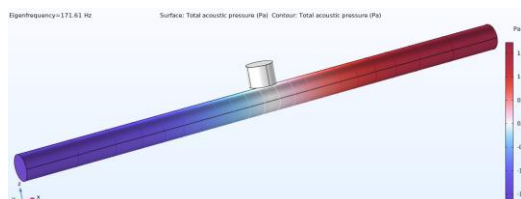
هدف دوم دسته‌بندی مودها برای بررسی ارتباط آن‌ها با قله‌های نمودار افت انتقال صوت می‌باشد. در ادامه این دسته‌بندی ارائه می‌شود.

۳-۱-۳ مودهای موجبر^۱

دسته‌بندی اول مربوط به مودهای موجبر می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴. مودهای موجبر

۲۰۶۳/۲	۱۸۸۷/۸	۱۷۲۰/۹	۱۵۴۴/۵	۱۲۰۱/۳	۸۵۸/۰۴	۵۱۴/۸۲	۱۷۱/۶۱	فرکانس‌های ویژه موجبر (Hz)
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	----------------------------



شکل ۵. مود اول موجبر

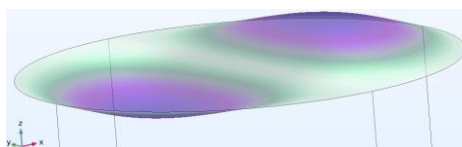
در (شکل ۵) دیده می‌شود که تمامی فشار آکوستیکی در موجبر تجمع یافته و فشار درون هلمهولتز صفر می‌باشد. برای سایر مودها نیز اتفاقی مشابه رخ می‌دهد. این دسته از مودها تاثیری در ایجاد قله در نمودار افت انتقال صوت ایفا نمی‌کنند.

۳-۱-۴ مودهای غشا که باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز نمی‌شوند

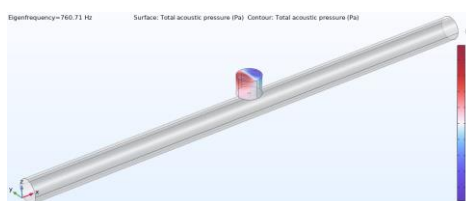
تعدادی از شکل مودهای غشا که دسته دیگری از مودها را شامل می‌شود حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی‌دهند (جدول ۵). به این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود انتگرال جابجایی روی سطح غشا برابر صفر است. در این حالت مشاهده می‌شود که فشار آکوستیکی بسیار کمی در هلمهولتز به وجود می‌آید (شکل ۷). این گروه از مودها نیز نقشی در ایجاد قله‌های نمودار افت انتقال صوت ندارند.

جدول ۵. مودهایی از غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی‌دهند

۱۳۱۴/۳	۱۳۱۴/۲	۱۰۴۵/۹	۱۰۴۵/۶	۷۶۰/۸۵	۷۶۰/۷۱	فرکانس‌های ویژه (Hz)
--------	--------	--------	--------	--------	--------	----------------------



شکل ۶. مود دوم غشا متناظر با فرکانس ۷۶۰/۷۱ هرتز



شکل ۷. توزیع فشار آکوستیکی در مود ۸۱۳/۳۵ هرتز

^۱ Waveguide

۵-۱-۳ مودهای غشا که باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز می‌شوند

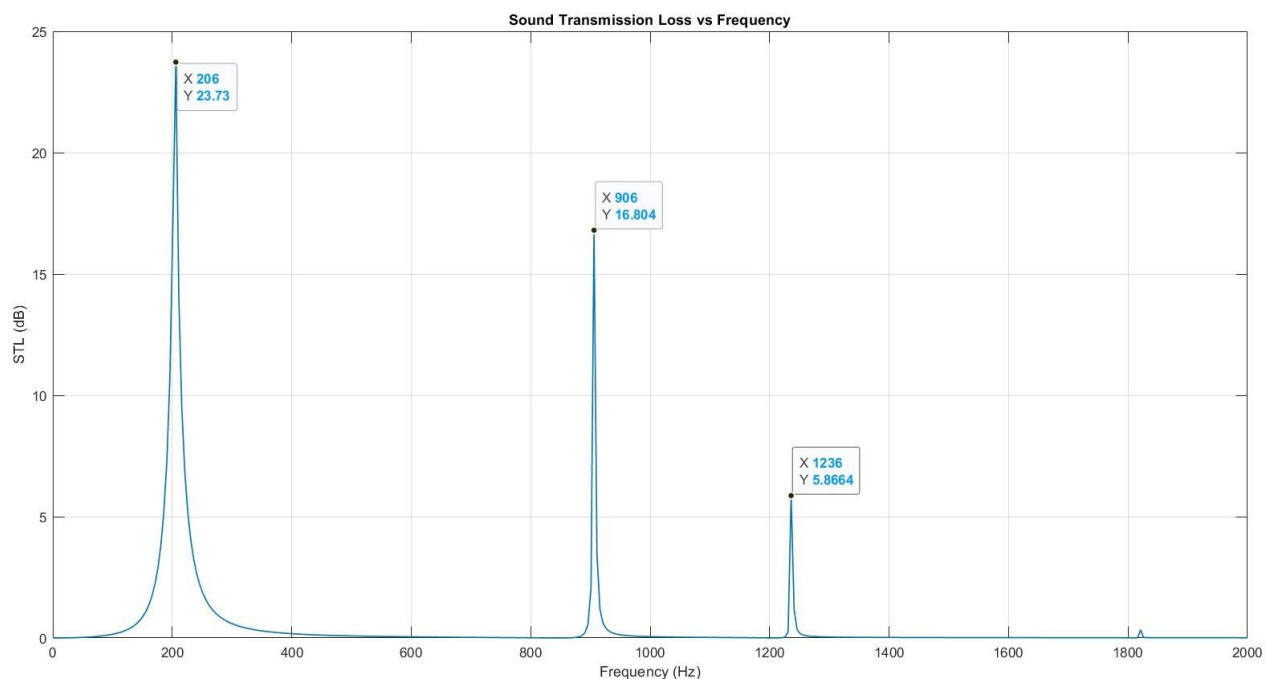
در بازه مورد بررسی این پژوهش دسته‌ای از مودها وجود دارند که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر داده و بدین صورت باعث ایجاد قله در نمودار STL می‌شوند.

جدول ۶. مودهای فرد غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر می‌دهند

۱۲۳۶/۷	۹۰۵	۱۹۹/۱۸	مودهای فرد غشا و آکوستیک (Hz)
--------	-----	--------	-------------------------------

۶-۱-۳ تحلیل قله‌های نمودار STL

نمودار STL ساختار بدین صورت است:

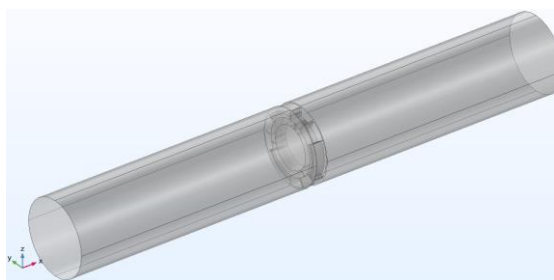


شکل ۸. نمودار STL ساختار

همانطور که مشاهده می‌شود قله‌های نمودار (شکل ۸) با تقریب خوبی متناظر با مودهای (جدول ۶) می‌باشد. 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.

۲-۳ تحلیل فرکانسی ساختار پیشنهادی

در این فاز یک لایه از ساختار هلمهولتز دوگانه موجود در مقاله [۵] (شکل ۹) را در نظر گرفته و در دو سمت آن غشا قرار می‌دهیم.

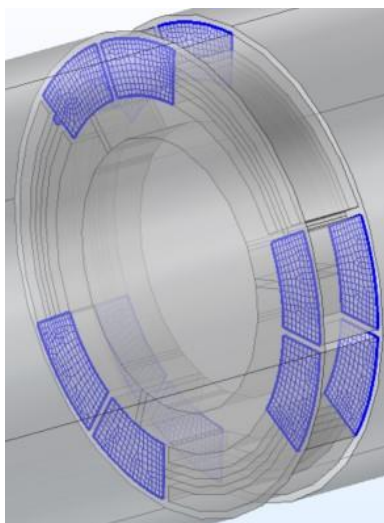


شکل ۹. ساختار در نظر گرفته شده برای فاز دوم تحلیل فرکانسی

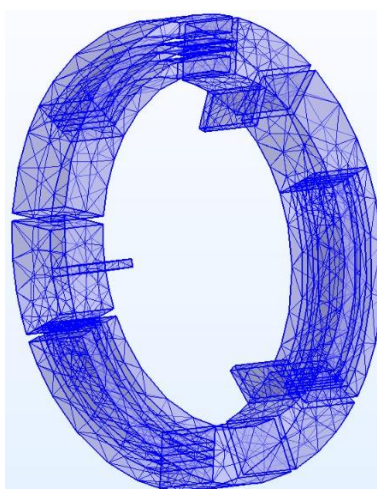
جدول ۷. ابعاد هندسی ساختار مورد بررسی در فاز دوم

طول گلولی دوم (L_{n2})	طول گلولی اول (L_{n1})	عرض گلولی دوم (W_{n2})	عرض گلولی اول (W_{n1})	طول موجبر	شعاع موجبر
۲۷/۲۲ [mm]	۵ [mm]	۱ [mm]	۱ [mm]	۴۰.۸ [mm]	۳۰ [mm]

شبکه‌بندی این حالت نیز همانند فاز اول برای غشا و هلمهولتز می‌باشد. در اینجا برای تحلیل فرکانسی موده‌ای تا ۲۶۰۰ هرتز مدنظر قرار گرفت.



شکل ۱۰. شبکه‌بندی چهار گره‌ای غشا



شکل ۱۱. شبکه‌بندی هرمی چهاروجهی تشدیدگر هلمهولتز دوگانه

۳-۲-۱ نتایج بررسی هلمهولتز بدون غشا

مطابق روند فاز اول ابتدا فرکانس‌های طبیعی ساختار هلمهولتز تنها را محاسبه می‌کنیم (جدول ۸).

جدول ۸. فرکانس‌های طبیعی هلمهولتز تنها

فرکانس‌های ویژه (Hz)	۵۲۵/۵	۵۲۵/۵۴	۷۱۶/۵۴	۱۵۹۸/۱	۱۵۹۸/۸	۱۸۹۲/۸	۲۶۵۳/۷	۲۶۵۳/۸	۲۶۵۴
----------------------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	------

۳-۲-۲ نتایج بررسی هلمهولتز و غشا در موجبر

در این قسمت نیز با انجام یک تحلیل پارامتری نیروی کشش غشا را از 100 N/m تا 160 N/m با گام ۱۰ تغییر داده و نتایج ثبت می‌شود. همچنین هر کدام از مودهای موجود در بازه هدف (۰ تا ۲۶۰۰ هرتز) را دنبال شده و جدول زیر تکمیل می‌شود.

جدول ۹. فرکانس‌های ویژه حاصل از تغییر کشش غشا

100N/m	110N/m	120N/m	130N/m	140N/m	150N/m	160N/m
3.4084E-5-2.9091E-8i	3.7208E-5+3.4979E-7i	4.5444E-7-1.3231E-5i	1.3851E-5-4.0192E-7i	2.7010E-7+1.9902E-5i	1.1527E-6-1.7121E-5i	1.1310E-7+1.3478E-5i
380.25	380.25	380.26	380.26	380.27	380.27	380.27
530.02	537.07	543.13	548.4	553.02	557.1	560.74
530.59	537.74	543.91	549.27	553.98	558.14	561.85
530.62	537.78	543.94	549.31	554.02	558.18	561.89
851.24	851.52	851.77	852	852.21	852.4	852.57
1148.2	1148.4	1148.6	1148.7	1148.8	1148.9	1149
1626.7	1664.9	1682.8	1689	1691.7	1693.3	1694.2
1634.9	1685.1	1730	1770.3	1806.5	1839.2	1868.9
1635.7	1686	1730.8	1771.1	1807.3	1840	1869.7
1706.7	1719.3	1746.7	1781	1814.8	1846.2	1875.1
1928.4	1930.4	1931.8	1932.9	1933.6	1934.3	1934.8
2529	2536.8	2541.2	2544.1	2546.2	2547.8	2549.2
2539.8	2624.8	2676.8	2702.9	2716.2	2723.7	2728.5
2560.4	2682.5	2777.2	2821.7	2856.8	2884.1	2904.9
2560.5	2682.6	2777.5	2821.9	2857.1	2884.4	2905.2
2608.7	2723	2798.2	2838.8	2870.1	2894.3	2912.8
2609.7	2723.2	2798.4	2908.1	3012.2	3110.3	3201.2
2609.8	2735	2799.1	2908.3	3012.4	3110.5	3201.4
2658.9	2736	2854.2	2965.7	3068.1	3163.3	3252.5
2659.2	2736.5	2856.8	2972.6	3084	3191.2	3272.3
2696.1	2751	2857.5	2973.4	3084.8	3192.1	3272.6
2804.3	2841.4	2906.7	2995.1	3095.6	3199.2	3294.6
3102.3	3121.5	3144.8	3172.6	3204.1	3238.1	3295.4

در ادامه نیز همانند فاز اول مودها را برحسب منشأ آن‌ها دسته‌بندی می‌کنیم.

۳-۲-۳ مودهای موجبر

جدول ۱۰. مودهای موجبر

فرکانس‌های ویژه موجبر (Hz)	۳۸۰/۲۵	۸۵۱/۲۴	۱۱۴۸/۲	۱۷۰۶/۷	۱۹۲۸/۴	۲۵۲۹	۲۵۳۹/۸	۲۸۰۴/۳
----------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	------	--------	--------

با همان استدلال ارائه شده در فاز اول مشاهده می‌شود که این دسته از مودها تاثیری در نمودار STL ندارند.

۳-۲-۴ مودهای غشا که باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز نمی‌شوند

جدول ۱۱. مودهایی از غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر نمی‌دهند

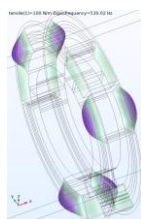
فرکانس‌های ویژه (Hz)	۲۵۶۰/۴	۲۵۶۰/۵	۲۶۰۸/۷	۲۶۰۹/۷	۲۶۰۹/۸
----------------------	--------	--------	--------	--------	--------

در این دسته از مودها مشاهده می‌شود که آرایش شکل مود غشاها به‌گونه‌ای است که تغییری در حجم محفظه هلمهولتز ایجاد نمی‌کند و لذا در ایجاد قله‌های نمودار STL نیز نقشی ندارد.

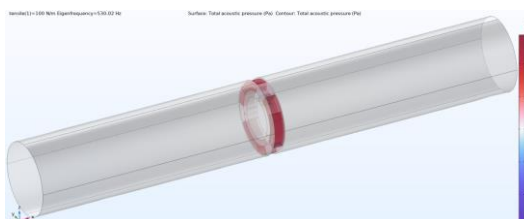
۵-۲-۳ مودهای غشا که باعث تغییر حجم محفظه هلمهولتز می‌شوند

جدول ۱۲. مودهای غشا که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر می‌دهند

فرکانس‌های ویژه (Hz)	۵۳۰/۰۲	۵۳۰/۵۹	۵۳۰/۶۲	۱۶۲۶/۷	۱۶۳۴/۹	۱۶۳۵/۷	۲۵۲۹	۲۶۵۸/۹	۲۶۵۹/۲	۲۶۹۶/۱
----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	------	--------	--------	--------



ب

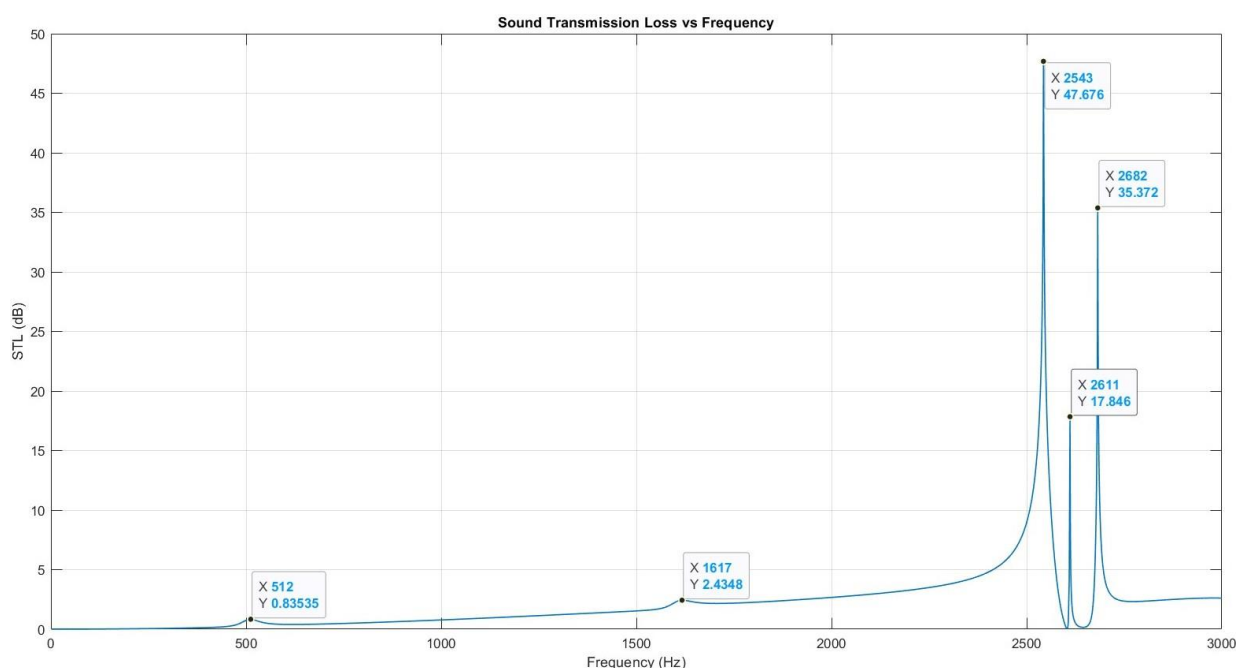


الف

شکل ۱۲. توزیع فشار آکوستیکی (ب) شکل مود متناظر با فرکانس ۵۳۰/۰۲ هرتز

همانگونه که در (شکل ۱۲ ب) مشاهده می‌شود چیدمان لایه‌های غشا به گونه‌ای است که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر داده و باعث ایجاد قله در نمودار STL می‌گردد. لازم به توضیح است که در (جدول ۱۲) مودهای اول تا سوم و مودهای چهارم تا ششم مودهای سه‌گانه و مودهای هفتم و نهم مودهای دوگانه بوده که به علت تقارن در ساختار غشاها بوجود می‌آیند.

۶-۲-۳ تحلیل قله‌های نمودار STL



شکل ۱۳. نمودار STL ساختار شکل ۹

مطابق (شکل ۱۳) دیده می‌شود که قله‌های موجود در این نمودار با اختلاف قابل‌قبولی با مودهای (جدول ۱۲) منطبق هستند. درباره اختلاف موجود بین اعداد نمودار و (جدول ۱۲) می‌توان به عواملی مانند همگرا نبودن مش، خطاهای عددی، پایین بودن رزولوشن فرکانسی و پیچیدگی ساختار اشاره کرد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی تاثیر شکل مود غشای کوپل شده با تشدیدگر هلمهولتز بر افزایش افت انتقال صوت این فراماده آکوستیکی پرداخته است. بازه‌ی فرکانسی مورد بررسی در بخش اول صفر تا ۲۰۰۰ هرتز و در بخش دوم صفر تا ۲۶۰۰ هرتز است. مشاهده شد که در فرکانس‌هایی که آرایش شکل مودها به‌گونه‌ای است که حجم محفظه هلمهولتز را تغییر دهد در نمودار STL قله وجود دارد. این یافته در هنگام طراحی و بهینه‌سازی ساختار کمک می‌کند بجای تحلیل روی دامنه فرکانسی وسیع با صرف زمان کمتر و فرکانس‌های محدودتر بتوان قله‌های افت انتقال صوت را به بازه‌های فرکانسی مدنظر انتقال داد. همچنین در گام بعد عملکرد تجربی این فراماده به‌وسیله لوله امپدانس در آزمایشگاه بررسی خواهد شد.

مراجع

- [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] 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.
- [6] 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.