



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



بررسی تاثیر انواع جهت گیری ها و شکل گردنه در فراماده صوتی C-شکل

سمیرا خدابخش پور باریکی^{*}، محمدرضا موحدی^ب، کیوان محمدی^ج

^ا ایران، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، دانشجو

^ب ایران، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، استاد

^ج ایران، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khp@mech.sharif.edu

چکیده

فرامواد صوتی، موادی نوآورانه با ساختارهای مهندسی شده هستند که امکان کنترل و هدایت امواج صوتی را فراتر از محدودیت‌های مواد متداول فراهم می‌کنند. این دسته از مواد، به دلیل توانایی در کاهش نویز، بهبود کیفیت صوتی و ایجاد خواص صوتی منحصربه‌فرد، در تحقیقات علمی و صنعتی به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، تأثیر هندسه و جهت‌گیری گردنه در فراماده‌ی صوتی C-شکل که دارای شکاف باند ناشی از تشدید هلمهولتز است، مورد بررسی قرار گرفته است. این شکاف باند موجب کاهش انتقال صوت (STL) در محدوده‌ی فرکانسی تشدید می‌شود. برای تحلیل این ساختار، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. شکل گردنه‌ها شامل فیلتر دار، گردنه‌ی رو به بیرون، گردنه‌ی رو به داخل، دارای لبه‌ی کناری، لبه‌ی مربعی، و لبه‌ی دایروی است. تأثیر این متغیرها بر فرکانس و شدت کاهش انتقال صوت در محدوده‌ی تشدید هلمهولتز بررسی شده و نتایج به دست آمده تحلیل گردیده است. برای اعتبارسنجی، نمونه‌ای از این فراماده با استفاده از روش پرینت سه‌بعدی ساخته شده و نتایج شبیه‌سازی آن با داده‌های آزمایش تجربی مقایسه شده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای طراحی بهینه‌ی فرامواد صوتی جهت کاربردهای خاص نظیر عایق‌های صوتی و فیلترهای فرکانسی باشد.

کلمات کلیدی: فرامواد صوتی؛ تشدید هلمهولتز؛ کاهش انتقال صوت؛ پرینت سه‌بعدی.

۱- مقدمه

آلودگی صوتی یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی در جوامع شهری و صنعتی است که تأثیرات منفی گسترده‌ای بر سلامت انسان‌ها و محیط زیست دارد. این نوع آلودگی، ناشی از منابع مختلفی مانند ترافیک، صنایع، ساخت‌وساز و فعالیت‌های شهری است و می‌تواند منجر به مشکلاتی نظیر کاهش شنوایی، افزایش استرس، اختلالات خواب و بیماری‌های قلبی-عروقی شود. تحقیقات نشان

داده‌اند که مواجهه طولانی‌مدت با سطوح بالای صداهای مزاحم می‌تواند کیفیت زندگی را به طور قابل توجهی کاهش دهد [۱]. از این رو، محققان همواره به دنبال راه‌حل‌های موثرتر برای کاهش آلودگی صوتی و بهبود کیفیت زندگی هستند.

استفاده از مواد سنتی، مانند الیاف طبیعی، مواد متخلخل، پشم شیشه، فوم ملامین، پلی‌اورتان و ... اگر چه تا حدودی برای کاهش و جذب سر و صدا موثر است، اما با محدودیت‌هایی همراه است. این مواد، برای جذب صدا در محدوده فرکانس بالا کارآمد هستند؛ اما در سر و صداهای فرکانس پایین (کمتر از ۵۰۰ هرتز)، به دلیل پیروی از قانون چگالی جرم، اغلب نمی‌توانند نویز را به طور موثری کاهش دهند و نیاز به افزایش چندین برابری ضخامت دارند [۲]. در مقابل، با ظهور فرامواد صوتی و ویژگی‌های منحصر به فردی که در کنترل و هدایت امواج صوتی از خود نشان داده‌اند، این مواد، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. از دیگر ویژگی‌های مثبت این مواد، قابلیت مهندسی خواص ویژه آن، برای اهداف مورد نظر است.

یکی از قابلیت‌های منحصر به فرد فرامواد صوتی، جاذب/مانع عالی صدا در ابعاد زیر طول موج است [۲]. در این فرامواد، عموماً از مکانیزم‌های پراکندگی براگ^۱، تشدید موضعی^۲ و پیچش فضایی^۳ برای دستکاری امواج صوتی استفاده شده است. در مکانیزم پراکندگی براگ، پراکنده‌گرهایی به صورت تکرار منظم در مسیر انتشار موج قرار می‌گیرند (که در این حالت به آن، کریستال فونونیک می‌گویند). امواج، پس از برخورد با پراکنده‌گرها، با یک اختلاف فاز مشخصی که با فاصله پراکنده‌گرها ارتباط دارد، ساطع می‌شوند. با تداخل امواج دارای اختلاف فاز ۱۸۰ درجه (تداخل مخرب)، امواج همدیگر را خنثی می‌کنند و از این طریق می‌توان در محدوده مشخصی، شکاف باند^۴ ایجاد کرد. در مکانیزم تشدید موضعی، تشدیدکننده‌هایی در مسیر انتشار موج قرار می‌گیرند و امواجی که در فرکانس تشدید آن‌ها منتشر می‌شوند را به دام می‌اندازند. مکانیزم پیچش فضایی نیز با طولانی کردن مسیر موج و ایجاد حالتی معادل با ضریب شکست بالا، بر روی امواج صوتی منتشر شده تاثیر می‌گذارد [۳].

هر کدام از مکانیزم‌های نامبرده، مزایا و معایب مختص به خود را دارند. در کریستال‌های فونونیک، شکاف باند اگرچه نسبتاً وسیع است، اما به ثابت شبکه و تعداد پراکنده‌گرها وابسته است و در فرکانس‌های پایین، فضای بیشتری لازم دارد. در مقابل، مکانیزم تشدید موضعی، محدودیت فضایی در فرکانس‌های پایین ندارد؛ اما تنها در محدوده فرکانس تشدید تشدیدکننده‌ها شکاف باند ایجاد می‌کند؛ که محدوده باریکی است. مکانیزم پیچش فضایی، عموماً دارای هندسه‌های پیچیده‌ای هستند و بررسی و ساخت آن‌ها دشوار است؛ البته امروزه با پیشرفت تکنولوژی‌های پرینتر سه‌بعدی، این مسئله ساخت آن‌ها تا حدودی رفع شده است.

در این مقاله، با استفاده از سلول واحد پیشنهادی الفورد و همکاران [۴]، مطالعاتی بر روی تاثیر جهت‌گیری‌ها و همچنین انواع شکل‌گرفته بر فرکانس کاهش انتقال صوت فراماده صوتی C-شکل انجام شده است. این بررسی‌ها، به منظور یافتن طرحی بهینه‌تر با هدف کاهش آلودگی‌های صوتی به صورت کارآمدتر انجام شده است. در کنار بررسی‌هایی که در نرم‌افزار المان محدود کامسول انجام شده است، یک نمونه از ساختار C-شکل پرینت شده است و نتیجه تست تجربی آن با نتیجه شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است.

۲- تئوری مسئله

در این بررسی، محیط انتشار موج صوتی، پیوسته فرض شده است؛ یعنی خصوصیات ماکروسکوپی المان‌ها در طول انتشار امواج، تغییر نمی‌کند. از تلفات لزجت و حرارت به دلیل اثرات ناچیز در نتایج نهایی صرف نظر شده است. با این فرضیات، تغییرات اندازه کوچک فشار هارمونیک $p(\vec{x}, t) = p(\vec{x})e^{i\omega t}$ ، از معادله همگن هلمهولتز (۱) به دست می‌آید [۵]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_0^2} = 0 \quad (1)$$

^۱ Bragg scattering

^۲ Local resonance

^۳ Space coiling

^۴ Band Gap

که $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای و f فرکانس با واحد Hz است. همچنین، $\rho_0 = 1.225 kg/m^3$ و $c_0 = 343 m/s$ به ترتیب چگالی و سرعت صوت در هوا در دمای $T = 20^\circ C$ می‌باشد.

در این مطالعه، برای بررسی اثر عناصر مورد استفاده بر امواج صدا، از نمودار کاهش انتقال صوت^۵ (STL) استفاده شده است. کاهش انتقال (TL) که واحد آن دسیبل (dB) است، یک پارامتر مهم در تجزیه و تحلیل صوتی است و نشان‌دهنده میزان تضعیف صدا در حین انتشار موج از طریق یک ماده یا ساختار است و از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$TL = 10 \log \frac{W_{in}}{W_{out}} \quad (2)$$

که W_{out} و W_{in} به ترتیب توان صوت ورودی و خروجی است و از رابطه $W = AI$ به دست می‌آید. $I = p^2 / (2\rho_0 c)$ شدت صوت است و واحد آن W/m^2 می‌باشد.

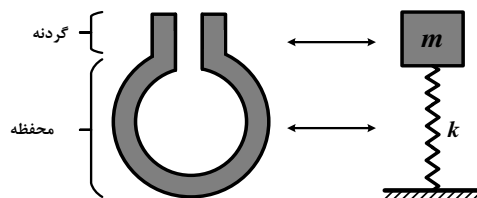
در مکانیزم تشدید موضعی، ساختارهایی که در مسیر انتشار موج قرار می‌گیرند، رفتاری معادل جرم و فنر دارند. یکی از ساختارهایی که در بسیاری از مطالعات، مورد توجه قرار گرفته است، ساختار تشدیدکننده هلمهولتر است. این ساختار، از گردنه‌ای معادل با جرم و محفظه‌ای معادل با فنر تشکیل شده است (شکل ۱). با توجه به اینکه در این ساختارها، از جرم اضافی استفاده نشده است، ساختارهایی سبک هستند. فرکانس تشدید در تشدیدکننده‌های هلمهولتر از رابطه (۳) پیروی می‌کند [۶]:

$$f_h = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL_{eff}}} \quad (3)$$

در این رابطه، A سطح مقطع گردنه و V حجم محفظه است. L_{eff} طول تصحیح شده گردنه است و از رابطه (۴) به دست می‌آید [7]:

$$L_{eff} = l + 0.3D \quad (4)$$

l طول واقعی گردنه و D قطر هیدرولیکی آن است. برای گردنه با سطح مقطع یکنواخت $D = 4A/P$ که A مساحت سطح مقطع کانال و P محیط سطح مقطع کانال است.



شکل ۱. شماتیکی از تشدیدکننده هلمهولتر و معادل آن.

۳- شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود کامسول

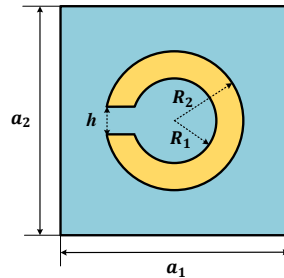
مطالعات بر روی ساختارهای مورد نظر، با شبیه‌سازی نمونه‌ها در نرم‌افزار کامسول و در ماژول آکوستیک آن انجام شده است. با توجه به اینکه مقاومت صوتی^۶ مواد مورد استفاده، نسبت به هوا بسیار بیشتر است، شرایط مرزی مرزها صلب^۷ در نظر گرفته شد. در آکوستیک، حداکثر طول المان باید بین $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{10}$ طول موج باشد [۵]. امواج تابیده شده تخت فرض شده‌اند (در نواحی دور از منبع صوت، می‌توان امواج را تخت در نظر گرفت). برای اعتبار سنجی نتایج، هم نمونه‌ای با ابعاد مشابه با مرجع [۴]، بررسی شد و هم نتایج تجربی یک نمونه با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

^۵ Sound Transmission Loss

^۶ Acoustic impedance

^۷ Sound-hard boundaries

ابعاد مهم برای ترسیم ساختار C-شکل، در شکل ۲ مشخص شده است. برای ایجاد نمودار کاهش انتقال، آرایه محدودی از سلول‌های واحد (مجموعاً ۹ عدد در هر ردیف) در راستای انتشار صوت قرار داده شد. یک منبع نویز افزایشی در سمت چپ آرایه سلول‌ها تعبیه شد تا امواج را با فشار ۱ پاسکال و دامنه فرکانس ۰ تا ۲۵۰۰۰ هرتز به سمت سلول‌ها روانه کند. در انتهای راست سلول‌ها، ناحیه‌ای برای استخراج فشار امواج انتقال یافته ایجاد شده است. علاوه بر این، لایه‌های جاذب مصنوعی^۸ (PML) در دو انتهای این پیکربندی قرار داده شده است تا از بازتاب امواج پس از برخورد به دیواره‌های انتهایی جلوگیری شود (شکل ۳).



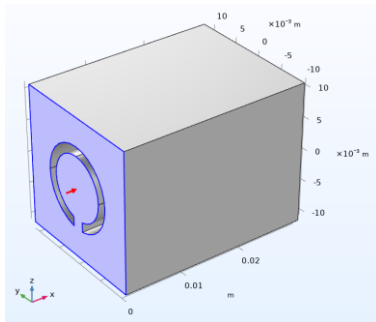
شکل ۲. شماتیکی از تشدیدکننده هلمهولتر و معادل آن.



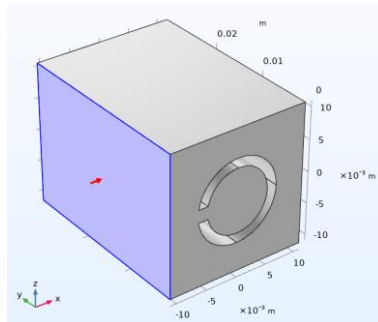
شکل ۳. پیکربندی آرایه محدود سلول‌های C-شکل.

۳-۱ ساختار C-شکل در سه بعد

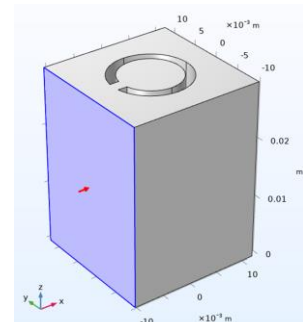
ابتدا، جهت‌گیری ساختار C-شکل، در سه راستای X، Y و Z بررسی شد (شکل ۴). ابعاد استفاده شده، مشابه مرجع [۴] است. برای کاهش زمان حل، فقط یک ردیف سلول در مقابل امواج قرار داده شد.



الف) شکل C-شکل در راستای انتشار موج



الف) شکل افقی C-شکل



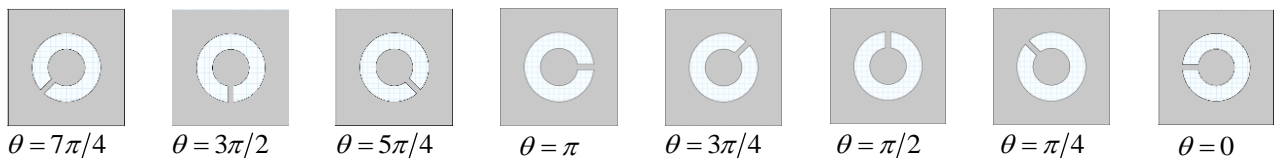
الف) شکل عمودی C-شکل

شکل ۴. انواع جهت‌گیری ساختار C-شکل در سه بعد و جهت تابش امواج.

۳-۲ ساختار C-شکل دو بعدی در زوایای مختلف

در بررسی دیگر، ساختار C-شکل دوبعدی با ابعاد جدول ۱، از زاویه $\theta = 0$ تا $\theta = 2\pi$ با گام $\frac{\pi}{4}$ دوران داده شد (شکل ۵) تا اثر تغییر جهت موج تابیده شده به این ساختار مشاهده شود.

^۸ Perfectly Matched Layer



شکل ۵. نواع جهت‌گیری ساختار C-شکل در دو بعد

جدول ۱. ابعاد هندسی ساختار C-شکل

پارامتر هندسی	مرجع [۴]	مقاله حاضر
a : ثابت شبکه	۲۲ mm	۲۲ mm
R_1 : شعاع بیرونی	۶.۵ mm	۶.۵ mm
R_2 : شعاع داخلی	۵.۰ mm	۳.۵ mm
h : عرض گردنه	۲ mm	۱ mm

۳-۳ انواع شکل گردنه‌ها در ساختار C-شکل

در ادامه، تاثیر انواع شکل گردنه‌ها بر روی کاهش انتقال صوت در ساختار C-شکل، بررسی شده است. بدین منظور، ساختار C-شکل، با ابعاد مرجع [۴]، در حالت‌های C-شکل با فیلت، گردنه اضافه رو به بیرون، گردنه اضافه رو به داخل، گردنه دارای لبه کناری، گردنه دارای لبه مربعی و گردنه دارای لبه دایروی مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۶). ابعاد لبه‌ها و گردنه‌های اضافی به گونه‌ای است که مساحت یکسانی در همه شکل‌ها دارد (جهت مقایسه بهتر).



شکل ۶. شکل گردنه‌ها در ساختار C-شکل

۴- تست تجربی

در کنار شبیه‌سازی‌های انجام شده، یک نمونه ساختار C-شکل با ابعاد مرجع [۴] توسط پرینتر سه بعدی ایجاد شد (شکل ۷) و در دستگاه لوله امپدانس تست شد (شکل ۸). جنس قطعه از نوع اسید پلی لاکتیک (PLA) است و به روش پرینت FDM ساخته شده است. هدف از این تست، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی بوده است.



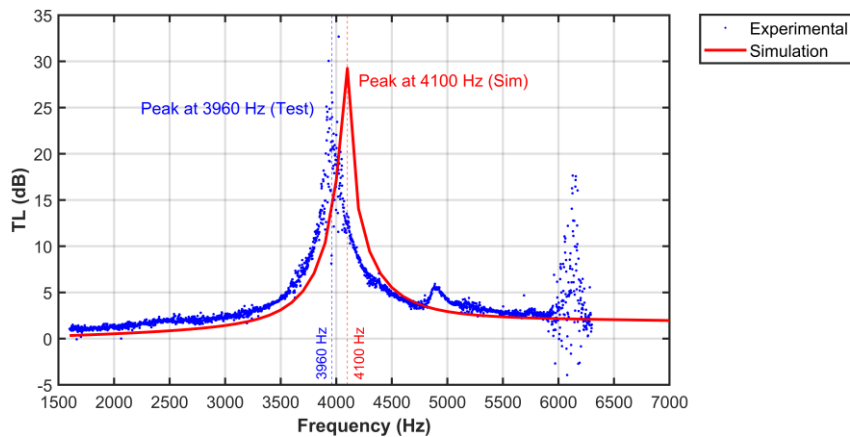
شکل ۸. ستاپ تست لوله امپدانس



شکل ۷. نمونه C-شکل پرینت شده

۵- نتایج و بحث

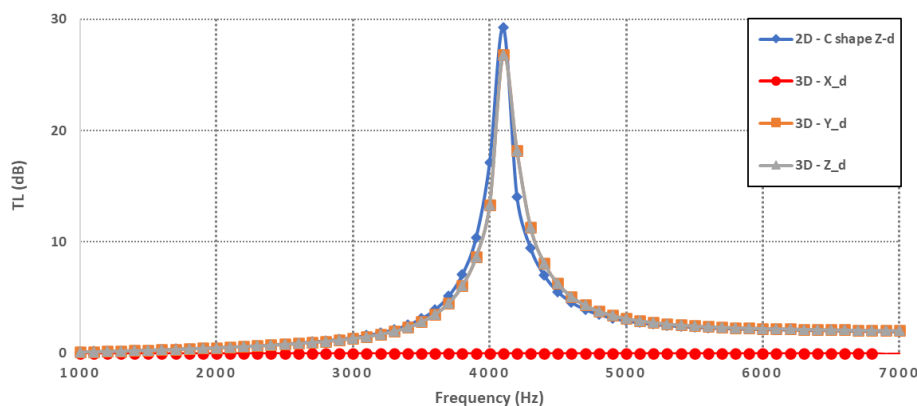
نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی در نمودار شکل ۹ ارائه شده است. همانگونه که قابل مشاهده است، این دو نتایج، اختلاف کمی دارند و درصد خطا در حدود ۳ درصد است؛ که مقدار قابل قبولی است. اختلاف موجود در نتایج، می‌تواند ناشی از خطای ساخت و تلفات ناشی از زبری سطح باشد.



شکل ۹. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی.

۵-۱ ساختار C-شکل در سه بعد

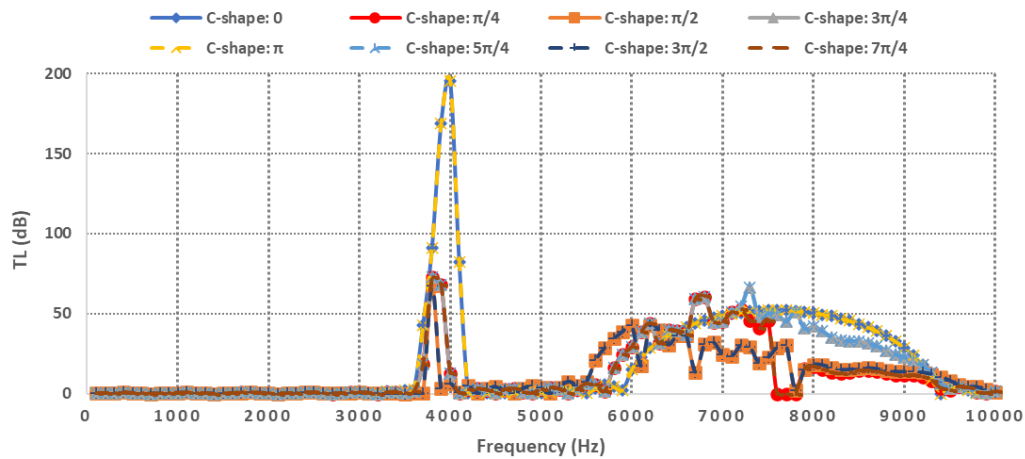
با توجه به بخش ۳-۱، نتایج حاصل نشان می‌دهد که قرارگیری سلول در جهت عمودی و افقی (Z و Y)، تاثیری بر نتایج ندارد. اما، در جهت هم‌راستا با موج (X)، اثر تشدید حذف می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. اثر جهت قرارگیری سلول C-شکل در سه بعد.

۵-۲ ساختار C-شکل دو بعدی در زوایای مختلف

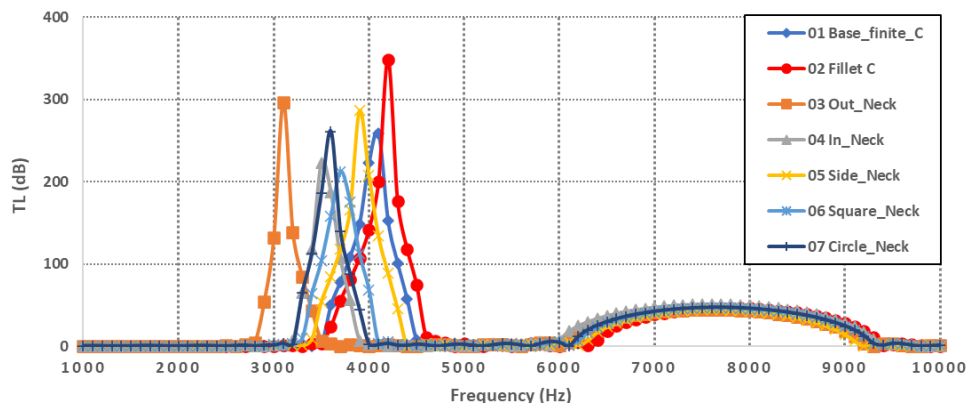
مطابق با شکل ۵، نتایج حاصل از انواع چرخش ساختار C-شکل به دست آمده است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که زاویه تابش امواج به ساختار C-شکل تغییر کند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد، جهت‌گیری ساختار تنها شدت کاهش انتقال صوت را تغییر می‌دهد و تاثیری بر فرکانس کاهش انتقال ندارد.



شکل ۱۱. تاثیر زاویه تابش امواج بر ساختار C-شکل.

۵-۳ انواع شکل گردنه‌ها در ساختار C-شکل

شکل ۱۲، نتایج به دست آمده از انواع شکل گردنه‌ها (شکل ۶) را نشان داده است. فیلت زدن C-شکل، محدوده فرکانس را افزایش می‌دهد. ایجاد گردنه اضافی، چه رو به بیرون و چه رو به داخل، فرکانس کاهش انتقال را کاهش می‌دهد و گردنه رو به بیرون، کاهش بیشتری را نشان داده است. ایجاد لبه کناری، مربعی و دایروی، فرکانس کاهش را پایین‌تر آورده است؛ در این بین لبه دایروی عملکرد بهتری داشته است.



شکل ۱۲. مقایسه انواع شکل گردنه‌ها در کاهش انتقال صوت.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر پارامترهایی نظیر جهت‌گیری سه بعدی، زاویه تابش و انواع شکل‌های گردنه در فراماده صوتی با سلول واحد C-شکل، بر کاهش انتقال صوت بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد جهت‌گیری در راستای عمودی و افقی، تاثیری بر کاهش انتقال صوت ندارد. دوران ساختار C-شکل، حول مرکز آن که در واقع معادل است با تغییر زاویه تابش موج صوتی به فراماده C-شکل نیز تاثیری بر فرکانس کاهش انتقال صوت ندارد و فراماده می‌تواند در همان فرکانس مانع عبور صدا شود؛ اما شدت کاهش انتقال صوت در زوایای مختلف، متفاوت است. بیشترین شدت کاهش در زوایای $\theta = 0$ و $\theta = \pi$ اتفاق می‌افتد و کمترین میزان کاهش، در حالتی است که راستای معادل جرم-فنر در تشدیدکننده هلمهولتز، عمود بر راستای انتشار موج باشد. مقایسه انواع شکل گردنه‌ها نیز نشان داده است که شکل گردنه، رابطه مستقیمی با فرکانس کاهش انتقال صوت دارد و می‌توان با تغییر شکل گردنه، به ساختارهایی با عملکرد بهینه‌تر از نظر فرکانس و میزان کاهش انتقال صدا و در نتیجه کارآمدتر در کاهش آلودگی صوتی، دست یافت.

مراجع

1. <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
2. Kumar, S., Lee, H.P.: The Present and Future Role of Acoustic Metamaterials for Architectural and Urban Noise Mitigations. *Acoustics*. 1, 590–607 (2019). <https://doi.org/10.3390/acoustics1030035>
3. Wu, L., Wang, Y., Chuang, K., Wu, F., Wang, Q., Lin, W., Jiang, H.: A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation. *Mater. Today*. 44, 168–193 (2021)
4. Elford, D.P., Chalmers, L., Kusmartsev, F.V., Swallowe, G.M.: Matryoshka locally resonant sonic crystal. *J. Acoust. Soc. Am.* 130, 2746–2755 (2011). <https://doi.org/10.1121/1.3643818>
5. <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>.
6. Kumar, S., Lee, H.P.: Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances. *Crystals*. 10, 686 (2020)
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance