

بررسی تجربی و عددی اتلاف عبور صوتی در یک صدا خفه کن با سیال ساکن

حسین معین^۱، محمد پسندیده فرد^{۱*}، علی فائزبان^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- موسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

*ایمیل مسئول مکاتبات: Mpfard@um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، روش‌های مختلف تعیین اتلاف عبور المان صوتی مافلر برای حالت بدون جریان مورد مطالعه قرار گرفت. محاسبه اتلاف عبور با دو رویکرد عددی و تجربی صورت گرفت که رویکرد عددی شامل روش لوله هرشل-کوئینک (رویکرد ۱) و روش شبیه‌سازی کامسول (رویکرد ۲) و انسیس (رویکرد ۳) بود. در رویکرد تجربی از روش ماتریس انتقال به کمک نرم افزار شرکت برول و کیار (رویکرد ۴) و کارت صدا به همراه نرم افزار متلب (رویکرد ۵) برای محاسبه اتلاف عبور استفاده شد. استقلال از شبکه روش‌های عددی و عدم قطعیت روش تجربی نیز بررسی شد. نتایج در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۱۹۰۰ هرتز مقایسه با یکدیگر مقایسه شده است که در اغلب پژوهش‌های مرتبط با مافلر رواج دارد. از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که اتلاف عبور معادل برای رویکردهای ۱ تا ۵ به ترتیب برابرست با ۵/۳۵، ۵/۲۱، ۴/۰۸ و ۳/۷۷ دسی بل. بررسی نتایج نشان می‌دهد که اتلاف عبور معادل روش‌های عددی انسیس و کامسول مشابه هستند و اتلاف عبور معادل شبیه‌سازی کامسول نسبت به روش عددی یک بعدی هرشل کوئینک ۰/۸٪ کمتر است. اتلاف عبور معادل روش‌های محاسباتی تجربی نیز نشان می‌دهد که اتلاف عبور معادل رویکرد ۲ نسبت به رویکرد ۴، ۷/۵٪ کمتر است.

کلمات کلیدی

آکوستیک، مافلر، صداخفه‌کن، مطالعه تجربی، شبیه‌سازی عددی

محیط‌های صنعتی همراه با نوفه و سروصدا هستند، خطوط انتقال گاز شامل ایستگاه‌های پمپاژ یا تقلیل فشار، شیرها، رگلاتورها و غیره از منابع مهم تولید نویز صنعت گاز محسوب می‌شوند. جت‌های تخلیه در صنایع پالایشگاهی و پتروشیمی، انواع اگزوزهای صنعتی و تجاری، فن‌ها، توربین‌ها، پمپ‌ها و کمپرسورها از جمله تجهیزاتی هستند که می‌توانند نوفه با شدت بالا و طیف فرکانسی وسیع تولید کنند. آلودگی صوتی می‌تواند با توجه به حجم صدا و یا مدت قرارگیری در مجاورت آن، در دراز مدت و یا حتی کوتاه مدت موجب آسیب به قدرت شنوایی و روان انسان‌ها شود. در صنایع مختلف روش‌های گوناگونی برای کاهش آلودگی صوتی به وجود آمده است. پوشش‌های آکوستیکی، اتاقک آکوستیک، صداگیرها^۱ و ... جهت کاهش صدا مورد استفاده قرار می‌گیرند. وظیفه اصلی یک صداگیر، کاهش میزان تراز فشار صوت^۲ در مسیر جریان و بین سمت داخلی و خارجی مجرای انتقال سیال است [۱]. صداگیرها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]: صداگیرهای غیرفعال^۳ که نوفه و صدای ناخواسته در آن‌ها با انعکاس و جذب انرژی آکوستیکی کاهش می‌یابد و صداگیرهای فعال^۴ که نوفه و صدای ناخواسته در آن‌ها با روش‌های الکتریکی کاهش می‌یابد. صداگیرهای غیرفعال که مافلر^۵ نام دارند، خود نیز به دو دسته واکنشی^۶ و جذبی^۷ تقسیم می‌شوند [۳].

پارامترهای کارایی آکوستیکی صداگیر مافلر [۴-۶] عبارتند از: (۱) کاهش نوفه^۸ که اختلاف تراز فشار صوت در ورودی و خروجی سیستم تعریف می‌شود، (۲) اتلاف نصب^۹ که به صورت اختلاف تراز فشار صوت با و بدون صداگیر در یک نقطه خارج از سیستم قرارداد شده است و (۳) اتلاف عبور^{۱۰} که شامل اختلاف تراز صوت بین موج ورودی و خروجی صداگیر است. لازم به توضیح است که اتلاف عبور خاصیت فیزیکی صداگیر بوده که به هندسه و جنس آن وابسته است. در رابطه با مافلرهای واکنشی که موضوع این تحقیق است، امواج صوتی به واسطه انبساط ناگهانی سطح، وادار به تغییر در امپدانس می‌شوند [۷]. محفظه انبساط ساده یکی از هندسه‌های پایه برای مافلر واکنشی است. چند بخش کردن محفظه انبساط، تغییر نسبت انبساط و طول لوله‌های ورودی و خروجی مافلر می‌تواند عملکرد صوتی مافلر را افزایش دهد [۸-۱۰]. مافلرهای انعکاسی در محدوده‌های فرکانس پایین که شکل انتشار صوت در آنها ممکن است بصورت امواج صفحه‌ای باشد به خوبی کار می‌کنند، اما مافلرهای جذبی (اتلافی) حاوی الیاف و مواد جاذب بوده و در محدوده فرکانس متوسط تا بالا کارایی مناسب تری دارند، هر چند مافلرهای اتلافی در فرکانس‌های پایین نیز به کار می‌روند.

دیکی و همکاران^{۱۱} [۱۱] روشی بر مبنای تفاضل محدود دامنه زمانی یک بعدی را برای ارزیابی اتلاف عبور صداگیرهای واکنشی بکار گرفته و اثرات استهلاک و پراکندگی عددی را بر پیش‌بینی‌های آکوستیکی این روش بررسی کردند. بروچ و همکاران^{۱۲} [۱۲] مطالعه را به شکل تطبیقی از عملکرد روش‌های عددی حل معادلات جریان گاز یک بعدی دنبال کردند. نتایج آن‌ها دستورالعمل‌هایی را برای انتخاب صحیح مدل عددی، با در نظر گرفتن ابعاد شبکه ارائه می‌دهد. بر مبنای آکوستیک سه بعدی و میدان جریان داخل صدا خفه‌کن، بروچ و همکاران^{۱۳} [۱۳] محاسبه اتلاف عبور مافلرهای واکنشی دارای محفظه انبساط و محفظه معکوس را با به کارگیری شبیه‌سازی عددی سه بعدی انجام دادند. پیش‌بینی‌های حاصل از محاسبات سیالاتی تحقیق مذکور به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی

¹ Silencer

² Sound Pressure Level (SPL)

³ Passive Silencer

⁴ Active Silencer

⁵ Muffler

⁶ Reactive

⁷ Absorptive

⁸ Noise Reduction (NR)

⁹ Insertion Loss (IL)

¹⁰ Transmission Loss (TL)

¹¹ Dickey et al

¹² Broatch et al

¹³ Broatch et al

های المان محدود بدون در نظر گرفتن جریان سیال (هوا) تطبیق داده شد. با این حال، اتلاف عبور محاسبه شده با این روش در جریان با عدد ماخ پایین با نتایج تجربی مطابقت نداشت. جی و همکاران^۱ [۱۴، ۱۵] از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی^۲ دامنه زمانی سه بعدی برای تعیین اتلاف عبور صدا خفه‌کن‌های لوله سوراخ‌دار با و بدون جریان سیال استفاده کردند و پیش‌بینی‌های آن‌ها به خوبی با اندازه‌گیری‌ها در محدوده فرکانس مد نظر تطبیق داده شد. برای تجزیه و تحلیل شبکه‌های صوتی پیچیده، تورگوسا و همکاران^۳ [۱۶] بر اساس خطی سازی روابط در روش حجم محدود، تحقیقاتی را ارائه کردند. در این روش، حجم محدود و روابط سه بعدی بر حسب روابط صفر بعدی معادل، باز تعریف شد. سپس این روش برای هندسه‌های سه بعدی ساده در حالت بدون جریان اعمال گردید که تطابق خوبی با نتایج تجربی و سایر نتایج محاسباتی دارد. برای شبیه‌سازی عددی صدا خفه‌کن‌های با هندسه پیچیده، مونته‌نگرو و همکاران^۴ [۱۷] رویکردهای یک تا سه بعدی و شبه سه بعدی یکپارچه را برای پیش‌بینی اتلاف عبور مافله‌های واکنشی و اتلافی پیشنهاد کردند. تکنیک‌های تجربی مختلفی برای اندازه‌گیری اتلاف عبور مافله با و بدون جریان پیشنهاد شد. با این حال، طراحی مافله جدید بر اساس رویکرد آزمایشگاهی، بسیار وقت گیر و غیراقتصادی است. از اینرو، راه‌حل‌های تحلیلی متعددی توسط بسیاری از محققین برای تخمین اتلاف عبور آکوستیک با مفروضات خاص ارائه شده است [۱۸].

رنجبر و کرمانی^۵ [۱۹] طراحی مافله را بر اساس بیشینه کردن اتلاف عبور در طیف وسیع فرکانسی انجام داده و سپس مطالعه تطبیقی بر مبنای بهینه‌سازی مافله با الگوریتم ژنتیک ارائه نمودند. در پژوهش مذکور، تأثیر تغییر ابعاد اجزا بر عملکرد کلی مافله با دامنه تغییرات بین ۵ تا ۳۰٪ به انجام رسیده است. سپس تمام نتایج با استفاده از الگوریتم عمومی ژنتیک مقایسه، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان می‌دهد که قطر ورودی نسبت به سایر متغیرها، مشخصه اصلی تری محسوب می‌شود. همچنین نتایج، افزایش اتلاف عبور را به میزان ۹ dB نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱]. کالیتا و سینگ^۶ [۲۲] روشی آزمایشی مبتنی بر اصول تاگوچی برای بهینه‌سازی طراحی و بهبود قابلیت مافله ارائه کردند. با استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار، موقعیت این بافل‌ها از لوله ورودی و خروجی و موقعیت فضای میانی آن‌ها به عنوان پارامترهای کنترل انتخاب شد و تجزیه و تحلیل دامنه فرکانس فشار آکوستیک بر روی آن‌ها انجام شد. تجزیه و تحلیل نسبت سیگنال به نویز برای این آزمایش‌های دنباله‌دار از طریق نرم‌افزار مینی‌تب^۷ مقدار بهینه ابعاد را برای دستیابی به حداکثر تلفات ارائه داد. آزمایش اتلاف عبور در راه اندازی لوله امیدانس، مقدار اتلاف عبور را برای مافله واکنشی بهینه شده تأیید می‌کند. در نهایت، نتایج به دست آمده برای مافله بهینه شده که از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار تجاری کامسول^۸ و آزمایش‌های فوق به دست آمد با مقدار اتلاف عبور مافله اولیه، مقایسه گردید. مافله‌های بهینه شده بهبود قابل توجهی را از نظر حداکثر اتلاف عبور و عملکرد بهتر در کل با گسترش باند فرکانسی نشان دادند. در مدل شبیه‌سازی شده، حداکثر اتلاف عبور از ۷۱/۰۴ dB به ۷۳/۳۳ ارتقا یافت که این مقدار بهبود در نتایج تجربی از ۶۹/۲۶ dB به ۷۲/۹۴ گزارش شده است.

گوپتا و تیواری^۹ [۲۳] اتلاف عبور ورودی و خروجی مرکزی مافله تک محفظه را با سه روش ماتریس انتقال، تحلیل اجزای محدود و روش تجربی مقایسه کردند. آنها تحقیقات آزمایشگاهی را بر اساس روش دو بار^{۱۰} به انجام رساندند. همچنین روش موج ریکاردو یک بعدی و روش تحلیل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای ارزیابی انتقال مافله انجام شد. تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که میرایی بیشتر را می‌توان با افزایش طول محفظه مافله بدست آورد. پژوهش آن‌ها نشان داد که نتایج تجربی تطابق خوبی با نتایج عددی

¹ Ji et al

² Computational Fluid Dynamic (CFD)

³ Torregrosa et al

⁴ Montenegro et al

⁵ Ranjbar & Kermani

⁶ Kalita & Singh

⁷ MINITAB

⁸ COMSOL

⁹ Gupta & Tiwari

¹⁰ Two Load Method

دارند. انحراف اندک در نتیجه آزمایشگاهی از نتایج عددی ممکن است به دلیل نشتی صدا، سطح پایین لوله امپدانس و مشکلات در ایجاد نویز سفید در محاسبات عملگر تبدیل سریع فوریه^۱ باشد که گاهی اوقات از دقت مناسبی برخوردار نیستند. گویت و وانی^۲ [۲۴] طی مطالعه مافلر واکنشی خودرو توانستند تداخل تولید شده توسط امواج صوتی خروجی موتور را تا حد زیادی حذف کنند. برای کاهش پیچیدگی طراحی، مدل سازی و تحلیل مهندسی به کمک کامپیوتر^۳ انجام شد و به دنبال آن تکنیک بهینه سازی برای به حداکثر رساندن اتلاف عبور مورد توجه قرار گرفت. اتلاف عبور نیز بصورت طیفی از توابع فرکانسی بر مبنای مقدار موثر^۴ کلی آن که به مقدار موثر اتلاف عبور^۵ معروف است در تحقیق مذکور لحاظ گردید. برای بهینه سازی متغیرها نیز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. همچنین ورودی و خروجی مخروطی برای اتصال دهانه های با قطرهای مختلف لوله خروجی موتور به مافلر طراحی و پیشنهاد شد. بهینه سازی انجام شده با در نظر گرفتن متغیر طراحی به عنوان طول و قطر ورودی - خروجی و محفظه مافلر در محدوده ۱۵- تا ۱۵+٪ ابعاد اصلی متغیر است. نتایج نشان می دهد در ابعاد بهینه سازی شده، مقدار اتلاف عبور حداکثر ۱۰/۲۴ dB افزایش می یابد. مقدار اتلاف عبور موثر به دست آمده برای مافلر بهینه شده ۲۳/۰۴ dB و برای مافلر اولیه ۲۰/۹ dB است. حداکثر اتلاف عبور در مافلر اولیه ۸۵ dB و در مافلر بهینه ۹۰/۰۵ dB است. سونکولا و همکاران^۶ [۲۵] روش های مختلف ارزیابی اتلاف عبوری مافلر واکنشی تک محفظه را به صورت تجزیه و تحلیل نظری، روش اجزای محدود و اعتبار سنجی تجربی با روش دو بار انجام دادند. در تحلیل نظری، نرم افزار متلب^۷ بر اساس رابطه تجربی اتلاف عبور استفاده شد. لازم به ذکر است که نتایج تحلیل عددی و تجربی آن ها هم خوانی مناسبی با یکدیگر دارند.

با توجه به پژوهش های پیشین انجام شده، نیاز به بررسی با رویکرد مقایسه ای میان روش های موجود احساس شده بود. هدف این مقاله، اندازه گیری و محاسبه اتلاف عبور در جریان ساکن به روش عددی و تجربی است. مافلر به دلیل کاربرد فراوان در صنعت برای اعتبار سنجی در این مقاله انتخاب شده است. استفاده از روش ترکیبی مبتنی بر کارت صدای رایانه برای پردازش اطلاعات آکوستیکی به جای استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی و انجام محاسبات در محیط نرم افزار متلب در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. به واسطه این روش، امکان انجام فعالیت های پژوهشی آزمایشگاهی با سهولت بیشتر و هزینه کمتر قابل اجرا خواهد بود. روش های عددی مختلف نیز در این پژوهش بررسی شده و در پایان، نرم افزار و روش شبیه سازی مناسب معرفی شده است.

۲- معادلات حاکم

روابط ارائه شده در این بخش در هر دو روش عددی و تجربی استفاده خواهند شد. در پژوهش حاضر از فرضیات ساده کننده زیر استفاده شده است:

- فرض گاز ایده آل برای سیال برقرار است.
- محیط سیال پیوسته، همگن و یکنواخت^۸ فرض می شود.
- سیال غیرلزج بوده و طبیعتاً آثار میرایی حاصل از لزجت و انتقال حرارت هدایت در آن وجود ندارد.
- انتشار امواج صوتی در محیط به صورت آدیاباتیک بازگشت پذیر به انجام می رسد.
- از آثار گرانشی صرف نظر می شود.
- دامنه نوسانات هر یک از کمیت ها کوچک فرض می شود (خطی بودن رفتار).

^۱ Fast Fourier Transform (FFT)

^۲ Gavitt & Wani

^۳ Computer Aided Engineering (CAE)

^۴ Root Mean Square (RMS)

^۵ Root Mean Square Transmission Loss (RMSTL)

^۶ Sonkule et al

^۷ MATLAB

^۸ homogeneous & isotropic

محاسبه اتلاف عبور:

برای محاسبه اتلاف عبور روش‌های عددی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی و روش‌های تجربی مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از روش عددی یک بعدی روش لوله هرشل - کوئینک^۱، روش عددی المان محدود در نرم افزارهای کامسول و انسیس^۲ و همچنین از روش ماتریس انتقال در محاسبه تجربی اتلاف عبور استفاده شده است.

۳- روش‌های عددی

۳-۱ روش لوله هرشل - کوئینک

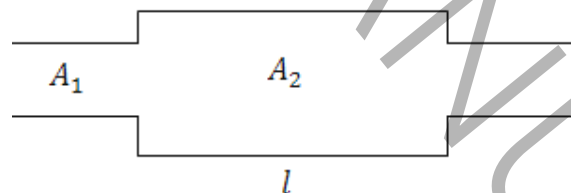
لوله هرشل - کوئینک شامل اتصال موازی دو لوله با طول و مقطع مشخص است. در این روش، حل یک بعدی با در نظر گرفتن موج صوتی صفحه‌ای انجام می‌شود و کلیه المان‌های صوتی به صورت لوله فرض می‌شوند و پیچیدگی هندسی آن‌ها به افزایش طول لوله می‌انجامد. معادلات مربوط به این هندسه، توسط هرشل و کوئینک در قرن نوزدهم حل شد. سپس استوارت و لیندسی^۳ حل هرشل و کوئینک را تصحیح نمودند. با نوشتن روابط بقای جرم و از برابری فشار صوتی و با فرض مساوی بودن طول دو لوله بین هر تقاطع می‌توان اتلاف عبور در یک مافلر ساده را به صورت زیر بدست آورد [۲۶]:

$$TL = 10 \log \left(1 + j \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m} \right) \sin kl \right)^2 \quad (1)$$

و یا:

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right) \quad (2)$$

متغیرهای رابطه فوق برای صدا خفه‌کن ساده یا همان مافلر، نسبت سطح مقطع $m = \frac{A_2}{A_1}$ ها و عدد موج $k = \frac{\omega}{c}$ صوتی است (شکل ۱).



شکل ۱: مدل مافلر در روش هرشل - کوئینک

Fig.1. Muffler model in the Herschel-Quincke method

۳-۲ روش المان محدود

از جمله روش‌های حل عددی می‌توان به روش‌های المان محدود^۴، المان مرزی^۵ و تفاضل محدود^۶ برای حل پدیده‌ها و تجهیزات صوتی از جمله مافلرها اشاره نمود. با وجود اینکه این روش‌ها برای هر هندسه‌ای قابل استفاده هستند اما اگر هندسه مافلر پیچیده باشد، تحلیل

¹ Herschel - Quincke tube method

² ANSYS

³ Stewart & Lindsay

⁴ Finite Element Method (FEM)

⁵ Boundary Element Method (BEM)

⁶ Finite Difference Method (FDM)

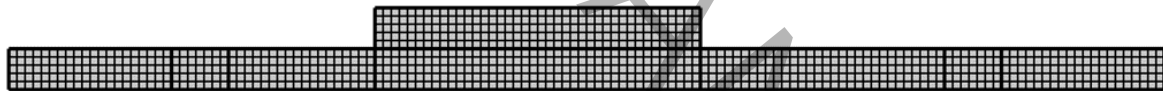
سه بعدی نیازمند گره‌های محاسباتی زیادی است که باعث می‌شود تعداد عملیات محاسبه و زمان مورد نیاز آن به طور تصاعدی افزایش یابد.

روش المان محدود اغلب هنگامی به کار می‌رود که حل میدان صوتی برای هندسه داخلی که در اینجا محفظه مافلر است، مورد نظر باشد. برای حل میدان‌های صوتی خارجی یا ترکیب میدان‌های داخل و خارج، باید محدوده گسترده‌ای با توجه به شرایط مرزی و گستردگی پدیده، شبیه‌سازی شود. بدیهی است در شبیه‌سازی‌های عددی پدیده‌های صوتی نیز موضوع همگرایی اهمیت خاصی دارد. باید دانست که در شبیه‌سازی عددی پدیده‌های صوتی، به منظور حصول هم‌گرایی و رعایت استقلال پاسخ از شبکه بندی، غالباً طول المان بین یک هشتم تا یک دهم مقدار کوچکترین طول موج انتخاب می‌گردد [۲۷].

روش حل استفاده شده در این مسئله به صورت همبستگی کامل^۱ و مستقیم^۲ حل شده است. رویکرد همبستگی کامل، مجهولات مسئله را به صورت یکجا و در یک تکرار حل می‌کند. این رویکرد برای حل میدان مناسب‌تر از رویکرد مجزا^۳ است. در صورتی که در این مسئله فقط زمان حل این دو رویکرد با یکدیگر متفاوت است. فارغ از نوع رویکرد حل برای مسئله، الگوریتم حل سیستم‌های معادلات خطی می‌تواند مستقیم یا تکراری^۴ باشد. حلگر مستقیم برای این مسئله به صورت پیش فرض نرم افزار در نظر گرفته شده است که با تغییرات به حالت تکراری، تفاوتی در محاسبات و همگرایی حاصل نشد. نوع مدل المان شبکه در شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس به صورت هرم مثلثاتی^۵ و در نرم افزار کامسول المان شبکه به صورت مربعی^۶ در نظر گرفته شد.

۱-۲-۳ نرم افزار کامسول

شبیه سازی عددی این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول بر اساس روش المان محدود به صورت دو بعدی انجام شده است. عملکرد صدا خفه کن در سه موقعیت مجزا بر اساس اشکال هندسی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. محدوده فرکانسی بین ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است. مدل شبکه بندی مافلر به صورت ساختار یافته انجام شده که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نحوه شبکه بندی عددی برای مافلر در نرم‌افزار کامسول (مدل به صورت دو بعدی با تقارن محوری)

Fig.2. Mesh structure for the muffler in COMSOL software (2D axisymmetric)

در این پژوهش، از ماژول دامنه فرکانسی^۷ و فشار آکوستیکی^۸ استفاده شده است. سرعت صوت در هوا ۳۴۳ m/s و چگالی هوا kg/m^3 ۱/۲۰ فرض شده است. مدل مافلر در دامنه فرکانسی با استفاده از ماژول فشار آکوستیکی در قسمت فیزیک آکوستیک در نرم افزار کامسول طراحی شده است. دیواره‌های مافلر کاملاً صلب در نظر گرفته شده و تنها ماده مورد استفاده در این شبیه سازی هوا است.

شکل ۳ شرایط مرزی مدل در این نرم افزار را نشان می‌دهد و شرایط مرزی و نحوه اعمال آن مطابق با تجربیات منابع [۲۸, ۲۹] انجام پذیرفته است. مدل دو بعدی تقارن محوری با شبکه‌بندی منظم و مربعی در این نرم افزار انجام شده و بیشینه اندازه طول هر المان شبکه

¹ Fully Coupled

² Direct

³ Segregated

⁴ Iterative

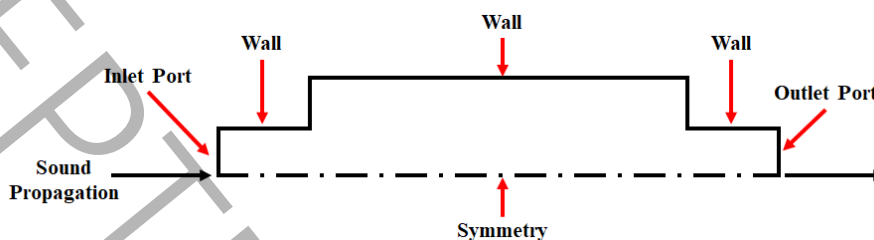
⁵ Tetrahedral

⁶ Quad

⁷ Frequency Domain

⁸ Pressure Acoustic

یک هشتم حداقل طول موج القایی در نظر گرفته شده است [۷]. آزمون استقلال از شبکه‌بندی نیز برای این شبیه‌سازی انجام شده که در جدول ۱ بیان شده است که در نهایت از شبکه‌بندی متوسط به عنوان شبکه‌بندی مطلوب استفاده شده است. شرط مرزی دهانه ورودی مافلر فشار آکوستیکی ۱ Pa یا معادل شدت فشار صوت ۹۴ dB، شرط مرزی دیواره صلب برای دیواره‌های مافلر و شرط مرزی دهانه خروجی برای خروجی مافلر انتخاب شده است. لازم به ذکر است این تنها شرط مرزی مناسب برای این حل این مسئله نیست و از شرط مرزی انتشار موج صفحه‌ای^۱ نیز می‌توان برای شرط مرزی ورودی و خروجی نیز استفاده کرد با این تفاوت که برای شرط مرزی ورودی بایستی دامنه موج القایی نیز تعیین شود.



شکل ۳: شرایط مرزی در مدل عددی نرم افزار کامسول برای مافلر

Fig.3. Boundary conditions in the numerical model for the muffler in COMSOL software

جدول ۱: استقلال از شبکه اتلاف عبور مافلر در نرم افزار کامسول

Table.1. Mesh independence of transmission loss for the muffler in COMSOL software

درصد تغییرات (%)	TL_{eq} (dB)	تعداد سلول‌ها	نوع شبکه
-	۸/۷۳	۲۴۶	درشت
٪ ۱۶/۹	۷/۲۵	۹۱۰	متوسط
٪ ۱/۵	۷/۱۶	۵۲۰۰	ریز

۳-۲-۲ نرم افزار انسیس

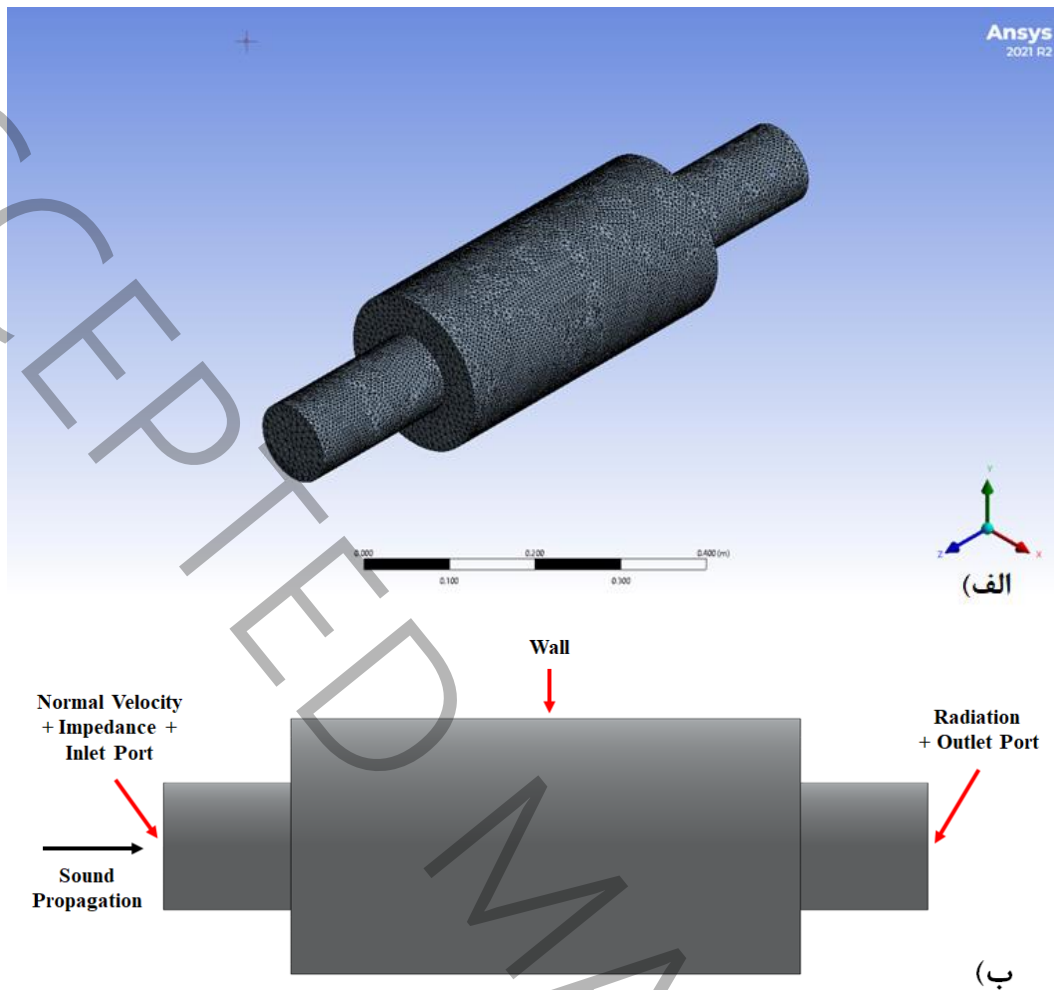
به منظور مقایسه گسترده‌تر نتایج و روش‌ها، شبیه‌سازی دیگری نیز با استفاده از نرم افزار انسیس با استفاده از ماژول هارمونی آکوستیک^۲ بر اساس روش المان محدود به صورت سه بعدی انجام شد. امیدانس صوتی برای لوله ورودی مافلر مقدار ثابتی فرض شده است و محدوده فرکانسی بررسی شده بین ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز است. مدل شبکه بندی مافلر به صورت غیر ساختار یافته^۳ انجام شده که در شکل ۴ نشان داده شده است.

مدل مافلر در دامنه فرکانسی با استفاده از ماژول فشار آکوستیکی در قسمت فیزیک آکوستیک در بخش هارمونی آکوستیک طراحی شده است. دیواره‌های مافلر کاملاً صلب در نظر گرفته شده و تنها ماده مورد استفاده در این شبیه سازی هوا است. شرط مرزی دیوار برای سطح بیرونی مافلر در نظر گرفته شده است. برای ورودی مافلر شرط مرزی سرعت عمودی که معادل $2/37 \text{ mm/s}$ ، امپدانس $\text{kg/mm}^2 \cdot \text{s}$ و دهانه ورودی و برای خروجی مافلر شرط مرزی دهانه خروجی و تشعشع (انتشار موج صوتی به صورت کروی) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴). لازم به ذکر است که انتشار موج صوتی در مافلر به صورت صفحه‌ای (یک بعدی) فرض شده است. استقلال از شبکه‌بندی در نرم افزار انسیس در جدول ۲ نشان داده شده است، که در نهایت از شبکه‌بندی متوسط به عنوان شبکه بندی مطلوب استفاده شده است.

¹ Plane wave radiation

² Harmonic Acoustic

³ Tetrahedral Unstructured Mesh



شکل ۴: نحوه شبکه بندی (الف) و شرایط مرزی (ب) در مدل عددی نرم افزار انسیس برای مافلر
Fig.4. (a) Meshing and (b) Boundary conditions in the numerical model for the muffler in ANSYS software

جدول ۲: استقلال از شبکه اتلاف عبور مافلر در نرم افزار انسیس

Table.2. Mesh independence of transmission loss for the muffler in ANSYS software

درصد تغییرات (%)	TL_{eq} (dB)	تعداد سلول‌ها	نوع شبکه
-	۸/۴۲	۳۴۶۴۸	درشت
٪ ۲۰/۶	۶/۶۸	۱۲۴۲۳۰	متوسط
٪ ۰/۴	۶/۶۵	۶۱۸۷۷۰	ریز

۴- روش ماتریس انتقال (چهار میکروفونی) برای اندازه گیری تجربی

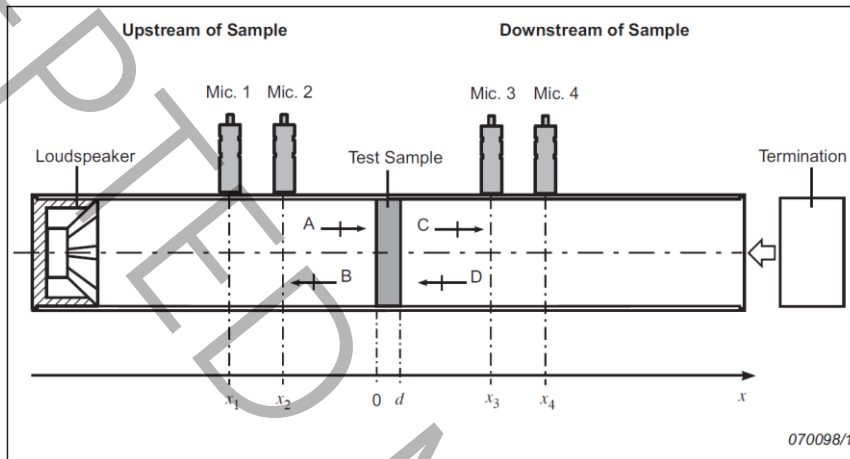
در این روش از دو جفت میکروفون در دو طرف تجهیز صوتی (مافلر) استفاده می‌شود. می‌توان از یک جفت میکروفون نیز در دو مرحله استفاده نمود و در هر مرحله میکروفون‌ها را روی یکی از لوله‌های ورودی و خروجی قرار داد (یکبار آزمایش برای جایگاه میکروفون‌های ۱ و ۲ و سپس یکبار برای جایگاه ۳ و ۴). نمای هندسی جایگاه میکروفون‌ها و محفظه انبساط در شکل ۵ دیده می‌شود. مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های تجربی، عدم نیاز به سخت افزار یا نرم افزار پیچیده است، هرچند با این روش فقط اتلاف عبور برای محفظه‌های

انبساط ساده قابل محاسبه خواهد بود. به عبارتی در این روش مقدار اتلاف عبور با محاسبات مستقیم از نتایج اندازه‌گیری قابل محاسبه است. به طور خلاصه در این روش، فرض می‌شود که میدان صوتی در بخش‌های بالا دست و پایین دست لوله را می‌توان به خوبی با برهم نهی امواج صفحه‌ای در جهت مثبت و منفی تقریب زد. لذا در حوزه فرکانس، میدان صوتی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳۰]:

$$P_{up} = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \quad (۳)$$

$$P_{down} = Ce^{-jkx} + De^{jkx} \quad (۴)$$

در روابط بالا k عدد موج در سیال را نشان می‌دهد.



شکل ۵: جایگاه میکروفون‌ها در روش چهار میکروفونی و سایر مشخصات مربوط به روش ماتریس انتقال [۳۱]

Fig.5. Positions of microphones in the four-microphone method and other specifications related to the transfer matrix method [31]

فشارهای صوتی P_{up} و P_{down} و ضرایب A تا D دامنه موج مختلط می‌باشند. تفکیک فشارهای صوتی مختلط در چهار مکان اندازه‌گیری x_1 تا x_4 داده‌های ورودی برای محاسبات ماتریس انتقال را فراهم می‌کند. در این صورت اثرات اتلاف حاصل از لزجت سیالاتی و حرارتی درون کانال قابل بررسی خواهد بود. در این پژوهش از فرمول نیمه تجربی ارائه شده توسط تمکین^۱ برای محاسبه قسمت‌های حقیقی و موهومی عدد موج استفاده شده است. نوسان دریافت شده توسط میکروفون‌های چهارگانه را می‌توان برای محاسبه فشار صوت و سرعت صوتی ذرات سیال استفاده و سپس بر اساس روابط ماتریس انتقال، اتلاف عبور المان یا تجهیز را محاسبه نمود. بنابراین، یک ماتریس انتقال برای ارتباط فشارهای صوت و سرعت ذرات آکوستیک در صفحات عمود بر محور، مابین دو انتهای المان که از $x = 0$ تا $x = d$ در نظر گرفته می‌شود، به شرح ذیل می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} P \\ v \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ v \end{bmatrix}_{x=d} \quad (۵)$$

در معادله (۵)، P فشار آکوستیکی و v سرعت ذرات آکوستیک در صفحات عمود بر محور جریان است. در فرم ماتریسی، نتیجه دو اندازه‌گیری مستقل (روش دو بار دو میکروفون) می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۳۰]:

$$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ V_1 & V_2 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ V_1 & V_2 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (۶)$$

^۱ Temkin

از آنجا که ضرایب ماتریس انتقال در پدیده‌های صوتی امواج صفحه‌ای، متقارن هستند، به راحتی ثابت می‌شود که ضرایب بازتاب موج صفحه‌ای از دو سطح متقابل، بصورت صفحات موازی (نسبت به محور جریان) است، اگر و فقط اگر دو شرط زیر برقرار باشند [۳۰]:

$$T_{11} = T_{22} \quad (7)$$

$$T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} = 1 \quad (8)$$

با فرض آنکه المان صوتی مورد پژوهش، طولی برابر با d داشته و انتهای آن کاملاً بدون پژواک در نظر گرفته شود، می‌توان فرض کرد که ضریب D رابطه (۴) در قسمت پایین دست صفر است. معادلات زیر به ترتیب ضرایب انتقال فشار صوتی القایی عمودی T_a و فشار صوتی انعکاسی R_a برای حالت انتهای بدون پژواک (انتهای باز) را ارائه می‌دهند [۳۰]:

$$T_a = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} - T_{22}} \quad (9)$$

$$R_a = \frac{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} - \rho_0 c T_{21} - T_{22}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_0 c} + \rho_0 c T_{21} - T_{22}} \quad (10)$$

با ارائه روابط بالا، می‌توان جمع بندی نمود که اتلاف عبور برای نمونه به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$TL = 10 \log \frac{1}{|T_a|^2} \quad (11)$$

لازم به ذکر است که استفاده از روش ماتریس انتقال نسبت به سایر روش‌های تجربی دیگر مانند روش دو بار^۱، روش دوبار - دو منبع^۲، روش سه قطبی دارای مزیت‌هایی همچون عدم قطعیت مناسب و دقت بالا و کاهش زمان محاسبات است، بنابراین در این پژوهش از این روش استفاده شده است [۳۰].

۴-۱ شرح آزمایش

در انجام مراحل تجربی این تحقیق از روش اندازه‌گیری لوله امپدانس پیروی شده است. لازم به ذکر است لوله امپدانس به جهت تبیین و تعیین مشخصات آکوستیکی المان‌ها و مواد مختلف کاربرد داشته و یکی از اجزای اصلی آزمایش‌های پایه آکوستیک است به نحوی که در خصوص انجام اغلب پژوهش‌های آکوستیکی، نتایج آزمون‌های مرتبط با این تجهیز به دلیل تعیین مشخصات ذاتی آکوستیکی المان مورد مطالعه، مورد توجه است. مواردی از قبیل اندازه‌گیری ضریب جذب صوتی، افت فشار آکوستیکی یا اتلاف عبور صوتی از جمله کمیات مهمی هستند که با استفاده از استانداردهای متعددی [۳۲-۳۵] در این شیوه قابل دستیابی است. به عبارتی این تجهیز توضیح کاملی از رفتار آکوستیکی ماده را در اختیار می‌گذارد تا در آزمون‌های بعدی (به عنوان مثال افزودن جریان سیال به شرایط) از این نتایج استفاده شوند، لذا برای بررسی رفتار مافلز نیز همین رویکرد در نظر گرفته شده است.

میکروفون‌های مورد استفاده در رابطه با آزمایش‌های انجام پذیرفته در این تحقیق، در شکل ۶ نمایش داده شده است. بایستی در نظر داشت که در هر آزمون تمام میکروفون‌ها از یک نوع استفاده شده است. همین طور قطر آن‌ها باید نسبت به فاصله بین هر دو میکروفون کوچک

¹ Two Load Method

² Two Load – Two Source Method

باشد. توصیه می‌شود قطر میکروفون کمتر از ۲۰٪ طول موج بالاترین فرکانس باشد [۳۶, ۳۷]. جدول ۳ بیشینه فرکانس برای برخی ابعاد رایج میکروفون در دمای اتاق نشان را می‌دهد. شکل ۷ نیز هندسه مافلر، موقعیت میکروفون‌ها و جهت جریان نویز آکوستیکی را نشان می‌دهد.

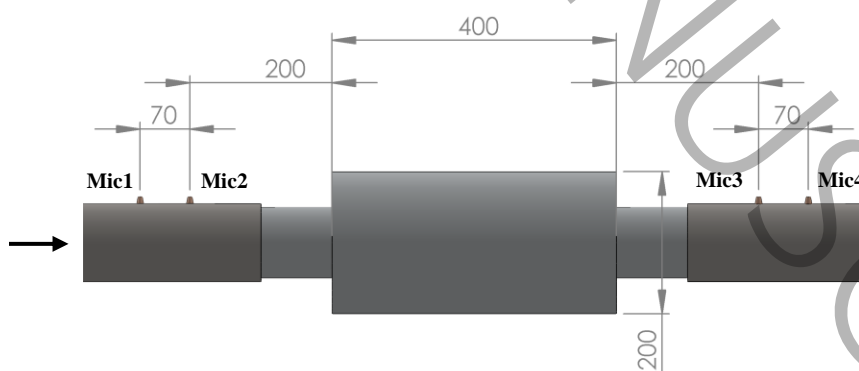
جدول ۳: بیشینه‌ی فرکانسی که برای هر قطر از میکروفون معتبر است [۳۴]
Table.3. Maximum frequency valid for each diameter of the microphone [34]

بیشینه فرکانس (Hz)	قطر دیافراگم (mm)	قطر نامی (in)
۳۰۰۰	۲۲/۷۰	۱
۵۶۰۰	۱۲/۲	۰/۵
۱۱۵۰۰	۵/۹۵	۰/۲۵



شکل ۶: نمونه‌ای از میکروفون‌های مورد استفاده در این پژوهش الف: نمونه میکروفون تجاری رایج. ب: میکروفون خازنی شرکت برول و کیار

Fig.6. Examples of microphones used in this study (a) A common commercial microphone (b) A condenser microphone from B&K



شکل ۷: هندسه مافلر (به میلی متر) و موقعیت‌های ۱ تا ۴ جهت قرارگیری میکروفون

Fig.7. Muffler geometry (in millimeters) and microphone positions 1 to 4

۴-۲ روش‌های تجزیه تحلیل اطلاعات تجربی اخذ شده در این پژوهش

اطلاعات آکوستیکی مطابق با شکل ۹ از نمونه آزمایش اخذ می‌گردد. دو شیوه یکی بر اساس سخت افزار و نرم افزار تجاری شرکت برول و کیار^۱ و دیگری شیوه پیشنهادی این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ذیل به صورت خلاصه به آن پرداخته شده است.

الف: نرم‌افزار شرکت برول و کیار

نرم افزار برول و کیار برای پدیده‌های مختلف آکوستیکی و ارتعاشی راه‌حلهایی ارائه می‌دهد، که در نرم‌افزار پالس^۲ گنجانده شده‌اند و کاربر بر اساس نیاز می‌تواند از آن استفاده کند. این راه‌حل‌ها (ماژول‌ها) اغلب بر اساس استانداردهای مرجع طرح ریزی شده و سادگی کار از ویژگی‌های بارز آن است. با استفاده از برنامه‌های تجزیه تحلیل باند درصد ثابت^۳ و تبدیل سریع فوری موجود در این نرم‌افزار، می‌توان تمام کمیت‌های اساسی لازم برای محاسبات آکوستیکی را استخراج نمود.

ب: کارت صدای رایانه و نرم افزار متلب

بر اساس تجارب پژوهشی انجام پذیرفته حین تحقیق فعلی، یک روش جایگزین نیز برای صوت سنجی در این پژوهش در نظر گرفته شده است. توجه به مواردی از قبیل قابلیت ویرایش سخت افزاری و نرم افزاری، امکان ویرایش و جایگزینی قسمت‌های مختلف، امکان بهبود مستمر و افزایش دقت، از جمله مزایای این روش می‌باشد [۳۸]. به طور خلاصه، روش پیشنهادی مبتنی بر ذخیره اطلاعات و سپس تجزیه تحلیل داده‌ها بوده و در حال حاضر امکان ارائه نتایج بطور همزمان با انجام آزمایش را دارا نمی‌باشد. این روش بر مبنای استفاده از کارت صدای رایانه (یا کارت صدای چندکاناله با قابلیت اتصال به رایانه) جهت ضبط گسترده دقیق فرکانسی هر میکروفون و سپس انتقال اطلاعات به یک نرم افزار واسطه جهت تجزیه تحلیل صوتی و نهایتاً محاسبه اطلاعاتی از قبیل شتاب، سرعت و یا فشار آکوستیکی و ترازهای آکوستیکی است. در اینجا نرم افزار متلب به علت توانمندی‌های بالا و دسترس پذیر بودن آن انتخاب شده است. لازم به ذکر است صحت سنجی و دقت سنجی که برای این روش در این پژوهش انجام پذیرفته نشان می‌دهد که نتایج این روش با دقت مطلوبی، قابل قبول می‌باشد. بدیهی است به منظور ارتقا، می‌توان به جای کارت صدای رایانه از کارت صدای حرفه‌ای چندکاناله با قابلیت پیش تقویت، رفع نویز الکتریکی، جداسازی و تفکیک سیگنال و اعمال گسترده شدت صوت بالاتر از ۱۰۰ dB بهره گرفت.

لازم به ذکر است که میزان نوفه پس زمینه^۴ مجاز برای این روش ابداعی در حدود ۲۰ dB اندازه‌گیری گردید. این سامانه با وجود سادگی، به خوبی کمیت‌های صوتی یک سامانه صوتی و رفتار آن را نمایش می‌دهد. آزمایش در حالت بدون جریان و با تحریک صوتی توسط یک بلندگوی عادی انجام شده است. برای تولید سیگنال مطلوب برای بلندگو نیز از نرم افزار تولید صدای تجاری^۵ نصب شده روی یک کامپیوتر شخصی استفاده شده است. شکل ۸ نیز فلوجارت روند محاسباتی به وسیله رویکرد کارت صدا و نرم افزار متلب را نشان می‌دهد و شکل ۱۰ تجهیزات بستر تجربی، اندازه‌گیری تراز فشار آکوستیکی و محاسبه اتلاف عبور مافلر را نشان می‌دهد.

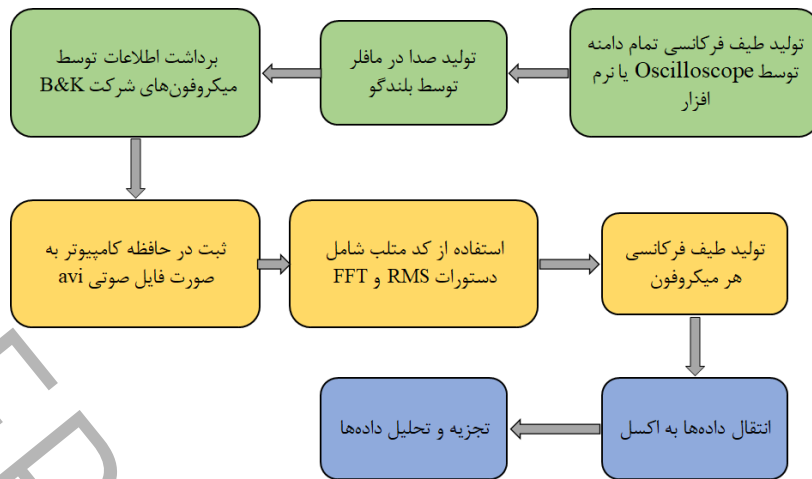
¹ Bruel and Kjaer (B&K)

² PULSE

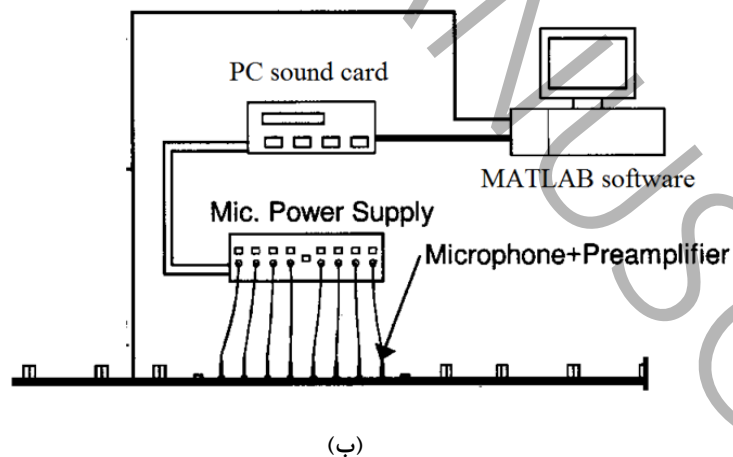
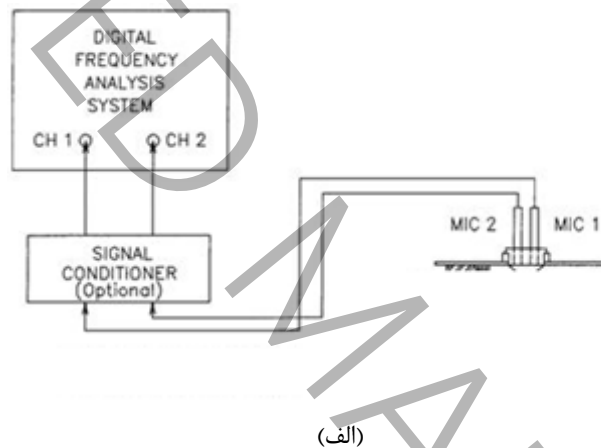
³ Constant Percentage Bond (CPB)

⁴ Background noise

⁵ NCH Tone Generator



شکل ۸: نمودار روند محاسباتی در رویکرد کارت صدا و نرم افزار متلب
 Fig.8. Process flow diagram for the sound card approach and MATLAB software



شکل ۹: چیدمان تجهیزات اندازه گیری صوت، الف) روش دستگاه صوت سنج برول و کیار (۲ کاناله)
 ب) روش ابداعی با استفاده از کارت صدا و نرم افزار متلب (با قابلیت گسترش نامحدود تعداد کانال)

Fig.9. Acoustic measurement equipment setup

(a) B&K Sound Level Meter Method (2-channel)

(b) Innovative Method using a Sound Card and MATLAB Software



شکل ۱۰: بستر تجربی (۱- لوله امیدانس ۲- مافلر ۳- کامپیوتر (شامل کارت صدا و نرم افزار متلب) ۴- لپتاب و کارت داده شرکت برول و کیار ۵- آمپلی فایر ۶- بلندگو تمام دامنه ۷- پردازنده اطلاعات ۳۵۶۰ شرکت برول و کیار ۸- میکروفون ۴۹۳۵ شرکت برول و کیار)

Fig.10. Experimental setup (1. Impedance Tube 2. Muffler 3. Computer (Including Sound Card and MATLAB Software) 4. Laptop and B&K PC Card 5. Amplifier 6. Full-Range Speaker 7. B&K 3560 Data Processor 8. B&K 4935 Microphone)

۴-۳ بررسی عدم قطعیت

عدم قطعیت نشان می‌دهد که کیفیت اندازه‌گیری در چه درجه‌ای است. در این مطالعه، عدم قطعیت وسایل اندازه‌گیری داده‌ها، عدم قطعیتی ناشی از تکرار آزمایش‌ها، عدم قطعیت ابزار و عدم قطعیت کلی محاسبه شده است. لازم به ذکر است برای محاسبه عدم قطعیت اتلاف عبور در مافلر برای شیوه ابداعی و شیوه برول و کیار، آزمایش‌ها سه بار تکرار شده‌اند. محاسبات عدم قطعیت برای متغیرهای اندازه‌گیری،

شامل شدت فشار صورت میکروفون‌های ۱ تا ۴، انجام شده و مقدار بیشینه بین تمام حالات گزارش شده است. انحراف از معیار استاندارد و میانگین حسابی برای هر کدام از متغیرها به ترتیب از روابط زیر محاسبه شده که n تعداد تکرار آزمایش‌ها است.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

برای محاسبه عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری از رابطه‌ی (۱۴) استفاده شده است [۳۹، ۴۰] که در آن a برابر نصف دقت اندازه‌گیری می‌باشد و نتیجه‌ی آن در جدول ۴ گزارش شده است. برای محاسبه عدم قطعیت استاندارد در اثر تکرار آزمایش، از رابطه (۱۵) استفاده شده که از تقسیم انحراف معیار استاندارد بر جذر تعداد آزمایش‌ها بدست می‌آید [۳۹، ۴۱] عدم قطعیت کلی با استفاده از عدم قطعیت ابزار و عدم قطعیت در اثر تکرار آزمایش طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود [۴۰]:

$$u_{tools} = \frac{a}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

$$u_{repetitions} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

$$u_{total} = \sqrt{(u_{tools})^2 + (u_{repetitions})^2} \quad (16)$$

جدول ۴: وسیله اندازه‌گیری، دقت و عدم قطعیت ابزار

Table.4. Measuring instrument, accuracy, and uncertainty of the tool

وسيله اندازه‌گیری	متغیر اندازه‌گیری	دقت ابزار	عدم قطعیت وسیله
میکروفون ۴۹۳۵ برول و کیار	شدت فشار صوت نقطه ۱	۰/۱ dB	۰/۰۲۸۸ dB
میکروفون ۴۹۳۵ برول و کیار	شدت فشار صوت نقطه ۲	۰/۱ dB	۰/۰۲۸۸ dB
میکروفون ۴۹۳۵ برول و کیار	شدت فشار صوت نقطه ۳	۰/۱ dB	۰/۰۲۸۸ dB
میکروفون ۴۹۳۵ برول و کیار	شدت فشار صوت نقطه ۴	۰/۱ dB	۰/۰۲۸۸ dB

جدول ۵: عدم قطعیت‌های ناشی از تکرار آزمایش، عدم قطعیت ابزار و عدم قطعیت کل

Table.5. Uncertainties due to test repetition, instrument uncertainty, and total uncertainty

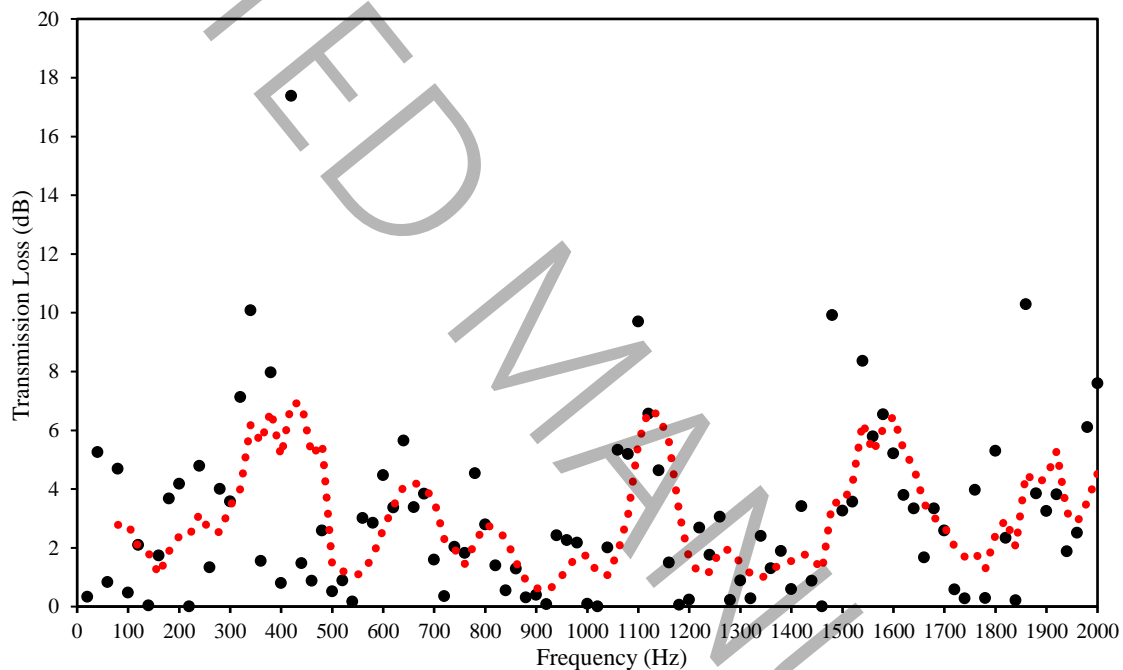
متغیر	عدم قطعیت در اثر تکرار آزمایش	عدم قطعیت وسیله	عدم قطعیت کل
شدت فشار صوت نقطه ۱	۰/۰۸۸۳	۰/۰۲۸۸	۰/۰۹۲۹
شدت فشار صوت نقطه ۲	۰/۱۴۴۹	۰/۰۲۸۸	۰/۱۴۷۷
شدت فشار صوت نقطه ۳	۰/۱۲۰۲	۰/۰۲۸۸	۰/۱۲۳۵
شدت فشار صوت نقطه ۴	۰/۱۶۰۵	۰/۰۲۸۸	۰/۱۶۳۹

همانگونه که از نتایج محاسبات عدم قطعیت در جدول ۵ ملاحظه می‌شود کیفیت اندازه‌گیری و دقت میکروفون در موقعیت ۱ بیشترین و در موقعیت ۴ کمترین است. به عبارت دیگر، دقت اندازه‌گیری شدت فشار صوت در میکروفون ۱ با دقت ۰/۱ dB به میزان ۹۱٪ قابل اطمینان است.

در این بخش با در نظر گرفتن دقت و صحت روش‌ها و ابزارهای بیان شده در بخش‌های قبل (عددی و تجربی) از هندسه رایج و پرکاربرد مافلر به منظور مقایسه نتایج و بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک از روش‌ها استفاده می‌شود. هرچند در هر دو روش تشریح شده، امکان بدست آوردن نتایج در فرکانس‌های یک سوم اکتاوا^۱ وجود دارد، لیکن به منظور بررسی مطلوب‌تر و دقیق‌تر، در کلیه آزمایش‌ها و روش‌ها، نتایج در گستره کامل^۲ فرکانس‌ها بدست آمده است. همچنین تراز فشار صوت منبع چشمه صوتی، معادل ۱۰۰ dB انتخاب شده است.

۵-۱ نتایج تجربی دستگاه ۳۵۶۰L برول و کیار

مطابق با شیوه‌های تجربی ارائه شده در بخش قبل، بررسی مشخصات آکوستیکی نمونه مافلر انتخابی از جمله اتلاف عبور آن با استفاده از تجهیزات سخت افزاری و نرم افزاری با نام تجاری برول و کیار اندازه‌گیری و محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱: نمودار اتلاف عبور مافلر (توسط دستگاه ۳۵۶۰L برول و کیار)

نقاط قرمز: اطلاعات همبسته به روش تبدیل سریع فوریه

نقاط مشکی: اطلاعات اندازه‌گیری شده

Fig.11. Muffler Transmission Loss diagram (using B&K 3560L device)

Reds: Correlated data from FFT method

Blacks: Measured data

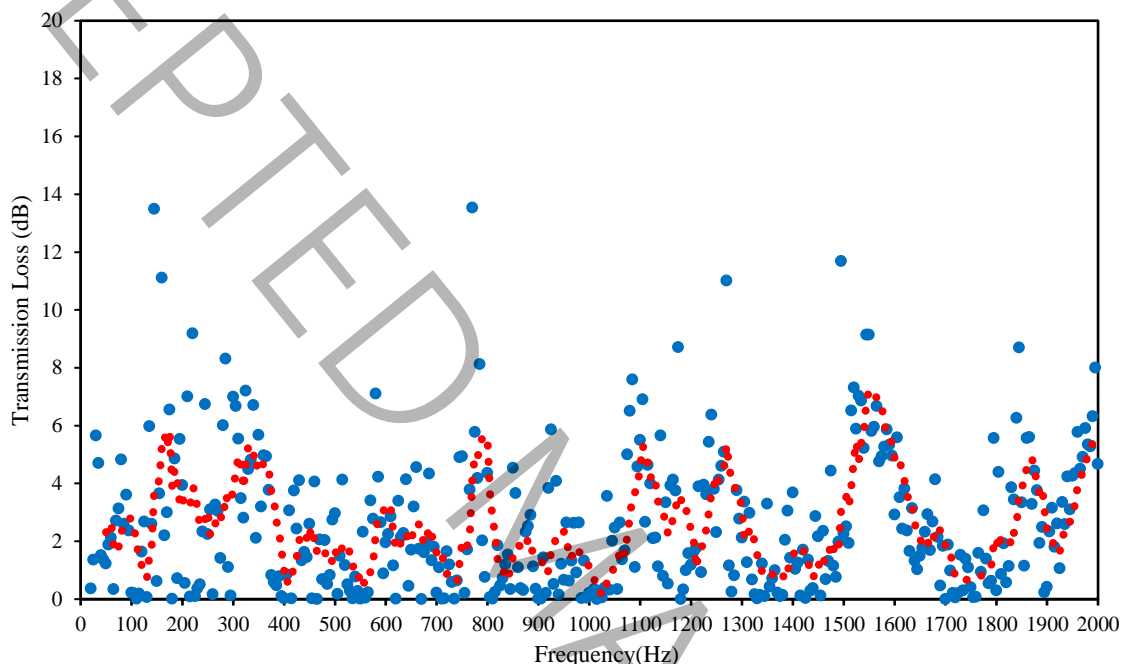
در این شکل، رفتار نوسانی کلی (در مقابل رفتار نوسانی نقطه‌ای) در فرکانس‌های محدوده تقریبی ۴۰۰، ۶۵۰، ۱۱۰۰، ۱۶۰۰ و ۱۹۰۰ هرتز باعث ایجاد ۵ قله بیشینه با شدت تقریبی ۶ تا ۷ dB شده است. این رفتار در سایر روش‌ها نیز با اندکی اختلاف قابل مشاهده است.

¹ 1/3 Octave

² wide range

۲-۵ نتایج تجربی با استفاده از کارت صدا و میکروفون خازنی

با استفاده از کارت صدای رایانه و میکروفون خازنی برول و کیار، اطلاعات تمام اکتاو یا گستره کامل اتلافات برای مافلر مفروض اخذ گردیده که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این نمودار در مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده قبلی، دارای رفتار تناوبی منظم‌تری است. ولی همچنان همان ۵ قله در محدوده فرکانسی و با همان شدت قابل مشاهده است. هرچند رفتار نوسانی در گستره فرکانسی ۵۰۰ الی ۱۰۰۰ هرتز دارای افت و خیز کمتری است. لیکن نحوه رفتار، مشابهت زیادی با سایر روش‌ها دارد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از میکروفون با کیفیت به همراه کارت صدای رایانه جهت ثبت اطلاعات و همچنین استفاده از نرم افزار متلب به منظور تجزیه تحلیل و استخراج نتایج جایگزین مناسبی نسبت به روش معرفی شده در بخش ۶-۱ می‌باشد.



شکل ۱۲: نمودار اتلاف عبور مافلر (توسط کارت صدای رایانه و میکروفون خازنی برول و کیار)

نقاط قرمز: اطلاعات همبسته به روش تبدیل سریع فوریه

نقاط آبی: اطلاعات اندازه گیری شده

Fig.12. Muffler Transmission Loss diagram (using computer sound card and B&K capacitor microphone)

Reds: Correlated data from FFT method

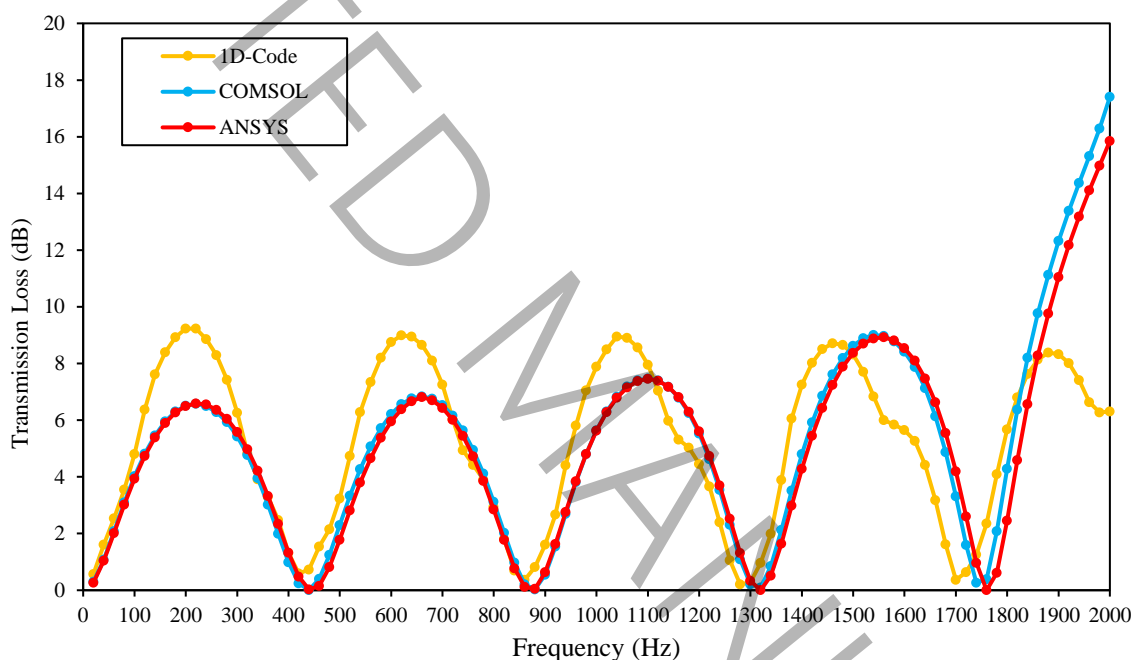
Blues: Measured data

۲-۳ نتایج روش محاسباتی یک بعدی و نرم افزارهای تجاری کامسول و انسیس

به منظور تکمیل تحقیق و مقایسه کیفی و کمی نتایج تجربی اخذ شده، از سه روش عددی نیز برای شبیه‌سازی مافلر استفاده شده است. رویکرد اول بر مبنای کد عددی حل یک بعدی معادلات نویراستوکس و حل لوله هرشل-کوئینک است که در بخش‌های پیشین به طور مفصل توضیح داده شده است. رویکرد دوم و سوم شبیه‌سازی عددی نیز استفاده از نرم افزارهای تجاری کامسول و انسیس است. سعی گردیده در هر یک از شبیه‌سازی‌ها، برخی پارامترهای تاثیر گذار حل عددی از جمله نحوه مدل‌سازی و شبکه‌بندی مورد توجه قرار گیرد. نمودار اتلاف عبوری صدا خفه‌کن بر اساس طیف فرکانس با روش یک بعدی و شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همانطور که پیشتر نیز بیان گردید نوسان نسبتاً منظم منحنی، نشان دهنده رفتار صحیح این شبیه‌سازی است. در کلیه شبیه‌سازی‌های این تحقیق، از رفتار آکوستیکی بدنه و تأثیر جسم جامد صرف نظر گردیده است، که قطعاً این موضوع در رفتار نوسانی منظم‌تر نسبت

به نتایج تجربی بی تأثیر نبوده است. هرچند در روش یک بعدی و با توجه به کاهش مرتبه اتلاف عبور، میزان شدت قله‌های نوسانی به ۹ رسیده است.

مقادیر شبیه‌سازی در کامسول و انسیس نیز نمودار اتلاف بر اساس طیف فرکانسی تمام اکتاو در شکل ۱۳ تطابق رفتار نوسانی منظم مشابه با نتایج سایر مراجع را نشان می‌دهد [۴۲, ۴۳] تعداد ۵ قله نوسانی بدون نوسانات نقطه‌ای و با شدت اندکی کمتر از حالت یک بعدی (حدود بیشینه کمتر از ۸ dB) و نوسانات بیشینه در فرکانس نهایی، از مشخصات این شبیه‌سازی است. هرچند روند نتایج در فرکانس نهایی دارای روند افزایشی بوده و در قله نوسان نیز اندکی روند صعودی مشاهده می‌شود به نحوی که بیشینه قله اول (در گستره ۲۰۰ هرتز) با قله پنجم (در گستره ۱۶۰۰ هرتز) حدود ۲ dB افزایش نشان می‌دهد. اختلاف اندک میان شبیه‌سازی‌های کامسول و انسیس به دلیل استخراج اطلاعات است. بایستی خاطر نشان نمود بازه فرکانسی رایج در اغلب پژوهش‌های مرتبط با مافلر، تا محدوده ۲۰۰۰ هرتز است که رفتار کلی کدها دارای تطابق مناسب با یکدیگر می‌باشند. با مشاهده رفتار نتایج آزمایشگاهی و روش یک بعدی عددی می‌توان انتظار داشت که رفتار فوق در نزدیکی فرکانس ۲۰۰۰ هرتز قطعاً ریشه خطای عددی دارد و بایستی مورد توجه قرار گیرد.

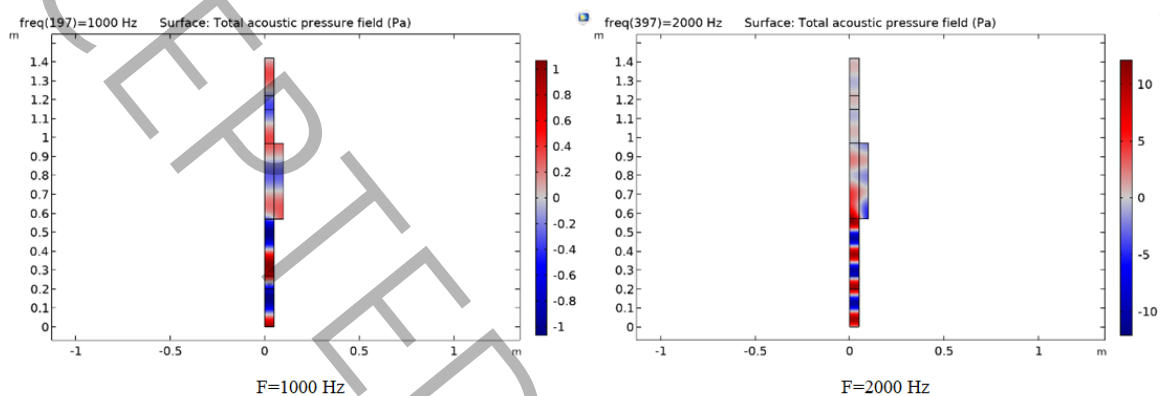


شکل ۱۳: نمودار طیفی اتلاف عبور مافلر روش یک بعدی، شبیه‌سازی کامسول و انسیس

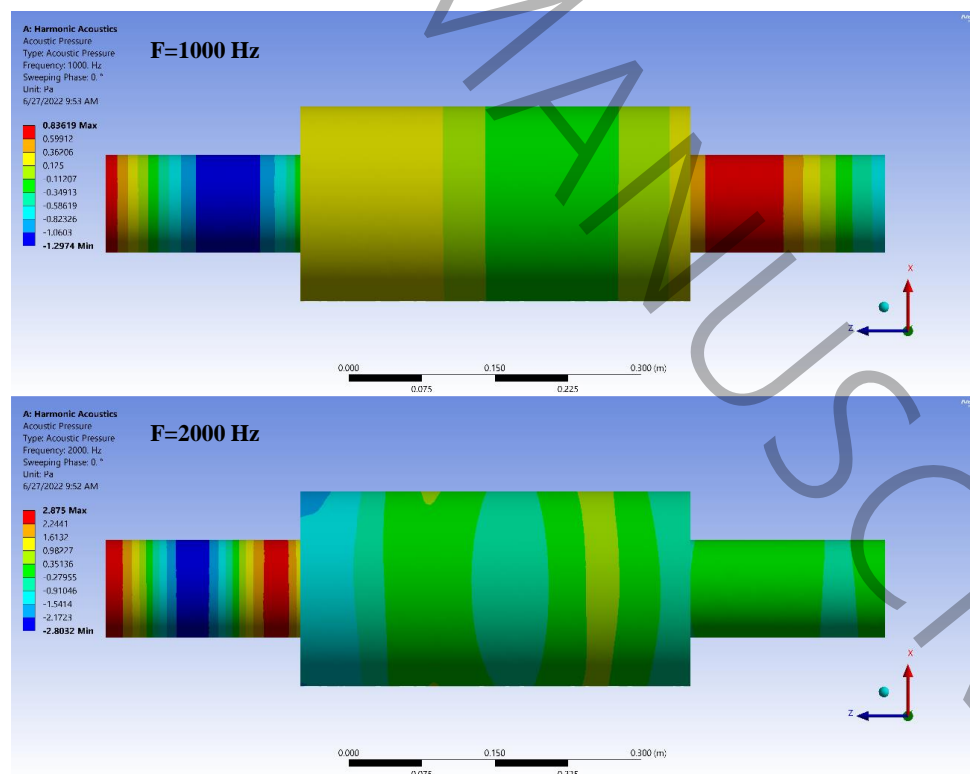
Fig.13. Spectral diagram of muffler Transmission Loss for one-dimensional method, COMSOL and ANSYS simulations

شکل ۱۴ نیز توزیع فشار آکوستیکی در دو فرکانس‌های منتخب (۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز) بر اساس شبیه‌سازی انجام شده در نرم افزار کامسول برای مافلر به عنوان نمونه به نمایش در آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، توزیع فشار آکوستیکی به صورت صفحه‌ای و تناوبی بوده و این موضوع نشان دهنده انطباق فرضیات انجام پذیرفته و نتایج شبیه‌سازی است. کاهش شدت نوسان موج صوتی و نزدیک شدن آن به صفر پس از ورود به مافلر و تشدید و ادامه این روند در خروجی نیز نشان دهنده عملکرد صحیح مافلر و به نوعی تطبیق شبیه‌سازی با واقعیت است. به طور مشابه، کانتور تراز شدت صوت و سایر کمیات در شبیه‌سازی هر دو نرم افزار به طریق عددی قابل محاسبه و ارائه بوده که برای تخلیص در اینجا آورده نشده است. در شکل ۱۵ نیز کانتور فشار آکوستیکی در ۲ فرکانس منتخب (۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز) برای نتایج صداخفه‌کن شبیه‌سازی شده در نرم افزار انسیس نمایش داده شده است. مشابه با شبیه‌سازی نرم افزار کامسول در اینجا نیز کاهش دامنه نوسان مقادیر در محدوده بدنه اصلی مافلر و لوله خروجی قابل مشاهده است.

در این پژوهش انتشار صوت به صورت طیف فرکانسی تمام دامنه بوده است و تغییرات فشار آکوستیکی به صورت تک فرکانسی مورد مطالعه قرار نگرفته است، لازم به ذکر است تغییرات فشار آکوستیکی در هر مقطع از مافلر از ماهیت فیزیک آکوستیک و انتشار صوت نشأت می‌گیرد و دلیل افزایش یا کاهش فشار آکوستیکی در دهانه خروجی مافلر به صورت مستقیم تابع فرکانس است. شاید به توان به عنوان مثالی رایج از موضوع حل‌های تحلیلی انجام شده بر روی تار مرتعش بعنوان یکی از پایه‌های ترین مثال‌های علم آکوستیک و ارتعاشات بهره‌گرفت، در شرایط تار مرتعش و از منظر حل دقیق نیز، دامنه نوسان (مشابه فشار آکوستیکی) در فرکانس‌های مختلف در یک نقطه مشخص از تار، متفاوت است و این یک موضوع ذاتی بوده و مرتبط با فیزیک پدیده است.

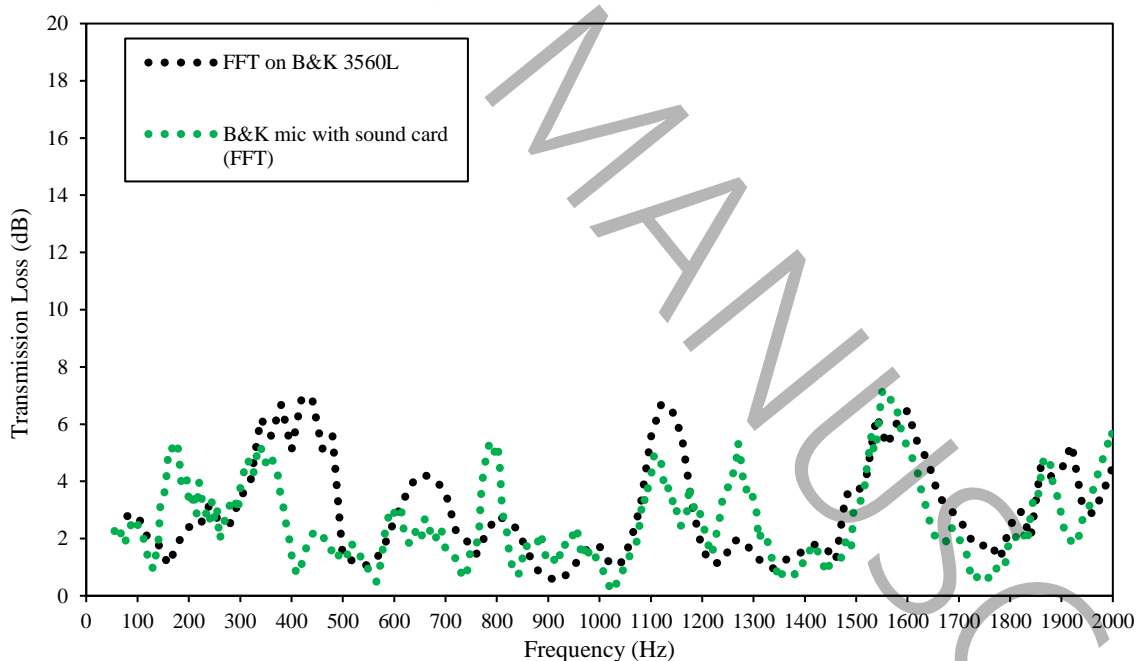


شکل ۱۴: کانتور فشار آکوستیکی در فرکانس‌های مختلف نرم افزار کامسول برای صدا خفه کن (چشمه صوتی واقع در ورودی پایین)
Fig.14. Acoustic pressure contour at different frequencies in COMSOL for muffler (sound source located at the bottom)



شکل ۱۵: کانتور فشار آکوستیکی در فرکانس‌های مختلف نرم افزار انسیس برای مافلر (چشمه صوتی واقع در سمت چپ)
Fig.15. Acoustic pressure contour at different frequencies in ANSYS for muffler (sound source located on the left)

شکل ۱۶ به مقایسه مقادیر اتلاف در نتایج تجربی برای مافلر پرداخته است که این نتایج بهترین رفتار منطبق بر اطلاعات تجربی حاصل از میکروفون برول و کیار و کارت صدای رایانه را دارا بوده و پیشنهاد می‌گردد از این شیوه تلفیقی برای تحقیقات تجربی مشابه سود جسته شود. بدیهی است ارتقا و بهبود بایستی همواره مد نظر قرار گیرد. علت اختلاف فاز بین قله‌های نتایج تجربی نسبت به نتایج عددی دلایل مختلفی دارد که مهم‌ترین آن‌ها تاثیر آکوستیک بدنه جامد مافلر، شرایط واقعی انتشار صوت در محیط آزمایشگاه، گرادیان حرارتی هوای آزمایشگاه (در صورت وجود)، مدهای ارتعاشی بدنه و سایر عوامل تاثیرگذار آکوستیکی که در شبیه‌سازی لحاظ نگردیده است، می‌باشد. امری که در شبیه‌سازی عددی به علت عدم مدل‌سازی پوسته به عنوان جسم جامد و محیط واقعی انتشار صوت اطراف مافلر مورد توجه نبوده و بایستی ضمن تحلیل مودال به منظور لحاظ نمودن فرکانس‌های طبیعی پوسته، شبیه‌سازی‌های تکمیلی با هدف کاهش اختلاف پاسخ‌ها نیز در تحقیقات آتی گنجانده شود. جدول ۶ و ۷ اتلاف عبور معادل^۱ را برای روش‌های مختلف محاسبه اتلاف عبور مافلر به صورت خلاصه بیان می‌کند. اتلاف عبور معادل برای شبیه‌سازی یک بعدی و شبیه‌سازی در کامسول و انسیس به ترتیب برابر ۵/۸۱ dB، ۵/۳۵ و ۵/۲۱ می‌باشد. شبیه‌سازی کامسول نسبت به شبیه‌سازی یک بعدی ۸٪ کاهش در مقدار اتلاف عبور معادل دارد. همچنین مقدار اتلاف عبور معادل به دست آمده در شبیه‌سازی انسیس نسبت به کامسول ۲/۶٪ کمتر است. اتلاف عبور معادل رویکرد نرم افزار برول و کیار و رویکرد کارت صدا به ترتیب ۴/۰۸ dB و ۳/۷۷ بدست آمده است که اتلاف عبور معادل رویکرد کارت صدا نسبت به رویکرد نرم افزار برول و کیار ۷/۵٪ کمتر است. در آخر مقایسه رویکردهای تجربی و شبیه‌سازی کامسول نشان می‌دهد که اتلاف عبور معادل رویکردهای نرم افزار برول و کیار و کارت صدا به ترتیب ۲۳٪ و ۳۰٪ کمتر از شبیه‌سازی کامسول است.



شکل ۱۶: مقایسه نتایج تجربی نمودار اتلاف عبور فرکانس‌های مختلف در مافلر

Fig.16. Comparison of experimental results of Transmission Loss diagram at different frequencies in muffler

¹ Equivalent Transmission Loss

جدول ۶: اتلاف عبور معادل رویکردهای مختلف و درصد تغییرات آنها

Table.6. Equivalent Transmission Loss of different approaches and their percentage changes

رویکرد	توضیحات	TL_{eq} (dB)	درصد تغییرات (%)
رویکرد ۱	شبیه‌سازی یک بعدی	۵/۸۱	-
رویکرد ۲	شبیه‌سازی در کامسول	۵/۳۵	۸
رویکرد ۳	شبیه‌سازی در انسیس	۵/۲۱	۱۰

جدول ۷: اتلاف عبور معادل رویکردهای مختلف و درصد تغییرات آنها

Table.7. Equivalent Transmission Loss of different approaches and their percentage changes

رویکرد	توضیحات	TL_{eq} (dB)	درصد تغییرات (%)
رویکرد ۲	شبیه‌سازی در کامسول	۵/۳۵	-
رویکرد ۴	نرم‌افزار شرکت برول و کیار	۴/۰۸	۲۳
رویکرد ۵	کارت صدای رایانه و نرم افزار متلب	۳/۷۷	۳۰

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق برای اطمینان از صحت دو روش تجربی و سه روش عددی برای محاسبه اتلاف عبور المان آکوستیکی مافلر مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به پرهزینه بودن تجهیزات آکوستیکی، هدف این تحقیق دستیابی و معرفی روشی تلفیقی با حفظ دقت و صحت مورد انتظار، با در نظر گرفتن هزینه اقتصادی و دسترس پذیری تجهیزات بوده است. علت اختلاف بین اتلاف عبور معادل در روش‌های عددی و تجربی به دلیل فرضیات و نوع رویکرد حل مسئله است که با توجه به شرایط مسئله جهت سهولت در محاسبات لحاظ شده است. در رویکرد ۱ که روش یک بعدی هرشل - کوئینک است با توجه به فرضیات انتشار موج به صورت صفحه‌ای، سرعت ثابت درون لوله و انتهای بدون پژواک و استفاده از طول لوله برای معادل سازی المان‌های صوتی مختلف است. در روش عددی شبیه‌سازی (رویکرد ۲ و ۳) فرضیات حل مسئله شامل نادیده گرفتن گرادیان دما، انتشار صفحه‌ای موج صوتی (در واقعیت انتشار کروی)، محیط بی‌نهایت و بدون پژواک اطراف مافلر، نادیده گرفتن جنس، ضخامت بدنه و زبری سطح داخلی مافلر، عایق بودن بدنه مافلر از نظر صوتی، عدم بازگشت و انتشار موج از منبع صوتی و استخراج داده‌ها به صورت تمام فرکانسی و پیوسته است. این فرضیات موجب اختلاف اتلاف عبور معادل بدست آمده از روش‌های عددی با تجربی است. با توجه به مقایسه سه روش عددی انجام شده، رویکرد ۲ (شبیه‌سازی در کامسول) به عنوان رویکرد مناسب با دقت بالا و زمان کم انتخاب می‌شود. به عبارتی از آنجا که نرم افزار المان محدود کامسول در مقایسه با انسیس قابلیت تطابق پذیری بسیار بهتری با شبکه‌بندی‌های مختلف و نامنظم داشته و محیط مناسب این نرم افزار برای حل چند فیزیکی و ترکیب آکوستیک با جریان سیال است که با استفاده از معادلات ناور-استوکس خطی‌سازی شده^۱ معادلات صوت و سیال را به صورت همزمان حل می‌کند، باعث گردید تا این نرم افزار در مقاله به عنوان روش عددی منتخب، توصیه گردد. رویکرد ۵ (کارت صدا رایانه و نرم افزار متلب) نیز به عنوان روش تجربی مناسب و کم هزینه برای استخراج و پردازش داده‌های آکوستیکی انتخاب می‌شود.

¹ Linearized Navier-Stokes (LNS)

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	سطح مقطع (m^2)
a_0	سرعت صوت (m/s)
c	سرعت صوت (m/s)
C	فشار صوت (Pa)
f	فرکانس (Hz)
k	عدد موج
m	نسبت سطح
P	فشار (Pa)
P_{rms}	فشار موضعی (Pa)
P_0	فشار آستانه شنوایی (Pa)
P_{up}	فشار بالادست (Pa)
P_{down}	فشار پایین دست (Pa)
s	انحراف معیار داده‌ها
t	زمان (s)
u_{tools}	عدم قطعیت ابزار
$u_{repetition}$	عدم قطعیت تکرار
u_{total}	عدم قطعیت کلی
u	سرعت موج (m/s)
V	سرعت ذرات (m/s)
n	تعداد داده‌ها
x	موقعیت میکروفون (m)
x_i	داده
\bar{x}	میانگین داده‌ها
z	جهت طولی لوله (m)
SPL	تراز شدت صوت (dB)
TL	اتلاف عبور (dB)
R_a	ضریب انعکاس موج
T_a	ضریب عبور
علائم یونانی	
λ	طول موج (m)
ω	سرعت دورانی (m/s)
ρ	چگالی (kg/m^3)

پیوست

موج صفحه‌ای: یک موج صوتی منتشر شده در محیط وقتی تخت یا صفحه‌ای خوانده می‌شود که فشار صوتی و سرعت ذره‌ای به طور همزمان به بیشینه یا کمینه خود برسند. در این حالت نیز به آن‌ها هم فاز گفته می‌شوند.

تراز فشار صوت: ارتعاشات ذرات محیط که در گوش حس می‌شود، یک فشار موضعی در محیط ایجاد می‌کند که به عنوان فشار صوتی شناخته می‌شود. به علت کوچک بودن اندازه این فشار موضعی، نمایش آن به صورت نمایش لگاریتمی نسبت فشار موضعی به فشار آستانه شنوایی ($P_0 = 0.00002 \text{ Pa}$) در نظر گرفته می‌شود:

$$SPL = 10 \log \frac{P_{rms}^2}{P_0^2} \text{ (dB)} \quad (17)$$

در روش حل تئوری از ترکیب معادلات پایه‌ای مکانیک سیالات با معادله موج استفاده می‌شود. در حل تئوری سعی بر آن است که معادلات خطی سازی شده و موج در حال انتشار، تخت یا صفحه‌ای در نظر گرفته شود. برای بدست آوردن معادلات حاکم بر میدان صوتی یک سامانه صوتی در حالت کلی، معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و حالت ترکیب می‌شوند. براساس فرضیات این پژوهش معادلات ساده سازی شده و نیازی به استفاده از معادله انرژی نمی‌باشد و موج صوتی به شکل تخت یا صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

معادله موج صفحه‌ای در سیال غیرلزج بدون جریان

در یک حالت ایده‌آل که مجرا دارای دیواره صلب بوده و شامل یک سیال غیر لزج و ساکن باشد، امواج صوتی منتشر شده با دامنه کوچک در مجرا را می‌توان یک موج تخت^۱ در نظر گرفت. یک موج صوتی وقتی تخت یا صفحه‌ای خوانده می‌شود که در یک مقطع عمود بر انتشار، پارامترهای فشار و سرعت ذره^۲ تغییر نکند. همچنین در یک موج تخت، فشار و سرعت ذره هم‌فاز هستند. با استفاده از معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی، برای یک موج خطی رابطه زیر قابل استخراج است [۴۴]:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] P = 0 \quad (18)$$

معادله (۱۸) معادله خطی، یک بعدی، شامل مشتقات جزئی فشار با ضریب ثابت سرعت صوت است، که حل آن منجر به معادله (۱۹) می‌شود:

$$P(z, t) = c_1 e^{j\omega(t - \frac{z}{a_0})} + c_2 e^{j\omega(t + \frac{z}{a_0})} \quad (19)$$

بخش اول معادله (۱۹) موج پیشرو^۳ بدون افت را که با سرعت صوت a_0 در حال گسترش است، نمایش می‌دهد. بخش دوم معادله نیز موج بازتابی^۴ را که در جهت مخالف موج پیشرو حرکت می‌کند را نشان می‌دهد. شکل دیگر معادله (۱۹) به صورت زیر است:

$$P(z, t) = \left[c_1 e^{-jkz} + c_2 e^{jkz} \right] e^{j\omega t} \quad (20)$$

در معادله فوق k ثابت انتشار موج یا عدد موج^۵ نامیده می‌شود و از رابطه (۲۱) بدست می‌آید:

$$k = \frac{\omega}{a_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$

¹ Plane wave
² Particle velocity
³ Incident wave
⁴ Reflected wave
⁵ Wave number

برای تحلیل سه بعدی موج، سه معادله‌ی بقای جرم، مومنتوم و انرژی به مانند موج خطی نوشته می‌شوند و به طور خلاصه به شکل زیر نوشته می‌شوند. در مختصات کارتزین برای مجراهای مستطیلی، معادله سه بعدی موج به صورت زیر است [۴۴]

$$P(x, y, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{m\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{h} (c_{1,m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + c_{2,m,n} e^{jk_{z,m,n}z}) e^{j\omega t} \quad (۲۲)$$

در مختصات استوانه‌ای برای کانال‌های استوانه‌ای معادله سه بعدی موج به شکل زیر در می‌آید:

$$P(r, \theta, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} J_m(K_{r,m,n}) e^{jm\theta} e^{j\omega t} (c_{1,m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + c_{2,m,n} e^{jk_{z,m,n}z}) \quad (۲۳)$$

۸- مراجع

- [1] M.J. Crocker, Handbook of noise and vibration control, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [2] M.L. Munjal, Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [3] R.F. Barron, Industrial noise control and acoustics, CRC Press, 2002.
- [4] D. Davis Jr, Acoustical filters and mufflers, McGraw-Hill New York, 1957.
- [5] P.N. Morse, Handbook of noise and vibration, McGraw-Hill, New York, 1983.
- [6] F.J. Fahy, Foundations of engineering acoustics, Elsevier, 2000.
- [7] F. Rafique, J.H. Wu, C.R. Liu, F. Ma, Transmission Loss analysis of a simple expansion chamber muffler with extended inlet and outlet combined with inhomogeneous micro-perforated panel (iMPP), Journal of Applied Acoustics, 194 (2022) 108808.
- [8] J. Middelberg, T. Barber, S. Leong, K. Byrne, E. Leonardi, Computational fluid dynamics analysis of the acoustic performance of various simple expansion chamber mufflers, in: Proceedings of Acoustics, 2004, pp. 123-127.
- [9] A. Selamet, F. Denia, A. Besa, Acoustic behavior of circular dual-chamber mufflers, Journal of Sound and Vibration, 265(5) (2003) 967-985.
- [10] A. Selamet, Z. Ji, Acoustic attenuation performance of circular expansion chambers with extended inlet/outlet, Journal of Sound and Vibration, 223(2) (1999) 197-212.
- [11] N. Dickey, A. Selamet, K. Tallio, Effects of numerical dissipation and dispersion on acoustic predictions from a time-domain finite difference technique for non-linear wave dynamics, Journal of Sound and Vibration, 259(1) (2003) 193-208.
- [12] A. Broatch, J. Serrano, F. Arnau, D. Moya, Time-domain computation of muffler frequency response: comparison of different numerical schemes, Journal of Sound and Vibration, 305(1-2) (2007) 333-347.
- [13] A. Broatch, X. Margot, A. Gil, F. Denia, A CFD approach to the computation of the acoustic response of exhaust mufflers, Journal of Computational Acoustics, 13(02) (2005) 301-316.
- [14] Z. Ji, H. Xu, Z. Kang, Influence of mean flow on acoustic attenuation performance of straight-through perforated tube reactive silencers and resonators, Noise Control Engineering Journal, 58(1) (2010) 12-17.
- [15] C. Liu, Z. Ji, Computational fluid dynamics-based numerical analysis of acoustic attenuation and flow resistance characteristics of perforated tube silencers, Journal of Vibration and Acoustics, 136(2) (2014) 021006.
- [16] A. Torregrosa, A. Broatch, A. Gil, D. Moreno, Analysis of acoustic networks including cavities by means of a linear finite volume method, Journal of Sound and Vibration, 331(20) (2012) 4575-4586.
- [17] G. Montenegro, A. Onorati, A. Della Torre, The prediction of silencer acoustical performances by 1D, 1D-3D and quasi-3D non-linear approaches, Computers & Fluids, 71 (2013) 208-223.
- [18] M. Munjal, Recent advances in muffler acoustics, International Journal of Acoustics and Vibration, 18(2) (2013) 71-85.
- [19] M.K. ORAK, On sound transmission loss maximization of a multi-chamber exhaust system, in, OTECON, 2018.
- [20] M. Kermani, Muffler design by noise transmission loss maximization, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ), 2015.
- [21] M. Ranjbar, M. Kermani, A comparative study on design optimization of mufflers by genetic algorithm and random search method, Journal of Robotic and Mechatronic Systems, 1(2) (2016) 7-12.

- [22] U. Kalita, M. Singh, Optimization of reactive muffler through pressure acoustic analysis and Taguchi approach, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(2) (2023) 98.
- [23] A.K. Gupta, A. Tiwari, Enhancement on sound transmission loss for various positioning of inlet and outlet duct of the muffler, *International Journal of Engineering and Manufacturing (Hong Kong)*, 4 (2015) 2015.
- [24] R. Gavitt, K. Wani, Muffler Transmission Loss optimization for a Vehicle using Genetic Algorithm, in: *Smart Sensors Measurement and Instrumentation*, Springer, 2023, pp. 1-17.
- [25] T. Sonkule, S. Dhadve, A. Shahane, Y. Malpani, M. Kulkarni, Design and Analysis of reactive muffler for enhancement in transmission loss, *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 8(2) (2021) 870-876.
- [26] I.L. Vér, L.L. Beranek, *Noise and vibration control engineering: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [27] S. Gerges, R. Jordan, F. Thieme, J. Bento Coelho, J. Arenas, Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 27 (2005) 132-140.
- [28] N. Atalla, R. Bernhard, Review of numerical solutions for low-frequency structural-acoustic problems, *Journal of Applied Acoustics*, 43(3) (1994) 271-294.
- [29] C.K. Tam, Z. Dong, Wall boundary conditions for high-order finite-difference schemes in computational aeroacoustics, *Journal of Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 6(5) (1994) 303-322.
- [30] J.S. Bolton, T. Yoo, O. Olivieri, Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube, *Brüel & Kjør Technical Review*, 1 (2007) 1-44.
- [31] L. Zhang, H.-M. Shi, X.-H. Zeng, Z. Zhuang, Theoretical and experimental study on the transmission loss of a side outlet muffler, *Journal of Shock and Vibration*, 2020(1) (2020) 6927574.
- [32] A. Standard, Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method, in, RWTH Aachen University, 1990.
- [33] M. Vercammen, On the revision of ISO 354, measurement of the sound absorption in the reverberation room, in, RWTH Aachen University, 2019.
- [34] b.o. standards, Standard test method for impedance and absorption of acoustic materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system, in: *ASTM E1050-98*, 2017.
- [35] A. Standard, Acoustics—Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes—Part 2: Transfer-function method, in: *ISO 10534-2*, International Organization for Standardization Geneva, Switzerland, 1998.
- [36] M.P. Norton, D.G. Karczub, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*, Cambridge University Press, 2003.
- [37] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, *Fundamentals of acoustics*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [38] S. Sack, M. Åbom, Investigation of orifice aeroacoustics by means of multi-port methods, *Journal of Sound and Vibration*, 407 (2017) 32-45.
- [39] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian, M. Passandideh-Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, *Journal of Energy*, 138 (2017) 682-695.
- [40] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, S.Z. Heris, Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units), *Journal of Energy*, 66 (2014) 264-272.
- [41] A. Farzanehnia, M. Khatibi, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Experimental investigation of multiwall carbon nanotube/paraffin based heat sink for electronic device thermal management, *Journal of Energy Conversion and Management*, 179 (2019) 314-325.
- [42] A. Faezian, M.R. Modares Razavi, A. Onorati, Design of Mufflers in the Intake and Exhaust Systems of Internal Combustion Engines, in: *The Third International Conference on Internal Combustion Engines*, Tehran, 2003 (In Persian).
- [43] A. Faezian, M.R. Modares Razavi, A. Onorati, Modeling of Mufflers in the Exhaust System of Internal Combustion Engines, *Amirkabir Journal of Science and Research*, 31(2) (2004) 11-11 (In Persian).
- [44] P. Shirode, A. Lokhande, A. Shete, D. Mohite, M. Kulkarni, Effect of Baffle Placement on Transmission Loss of Single Expansion Chamber Reactive Muffler, *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, 9 (2022) 24-34.

Experimental and numerical investigation of transmission loss in a zero-flow silencer

Hossein Moein¹, Mohammad Passandideh-Fard^{1,1}, Ali Faezian²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Department of Food Machinery Design, Research Institute of Food Science, Mashhad, Iran

ABSTRACT

To evaluate the acoustic performance of the muffler at zero-flow, different methods of determining transmission loss (TL) were studied. Numerical and experimental approaches were used to calculate TL . The numerical method employed was the Herschel-Quincke tube method (case 1) COMSOL simulation (case 2) and ANSYS simulation (case 3). The experimental approach utilized the transfer matrix method with the aid of software developed by the B&K software (case 4) and the sound card with MATLAB software (case 5) was used to calculate TL . Furthermore, the mesh independence of numerical methods and the uncertainty of the experimental method were examined. Results were evaluated between 20 and 1900 Hz, which is an appropriate frequency range for TL calculations. According to the results, the equivalent TL for cases 1 to 5 is approximately 5.81 dB, 5.35 dB, 5.21 dB, 4.08 dB, and 3.77 dB, respectively. Based on the findings, it can be concluded that the equivalent TL of ANSYS and COMSOL simulations was similar, and COMSOL simulation results in a 8% lower equivalent TL than the case 1 approach. Similarly, the equivalent TL of experimental calculation methods indicates that the case 5 approach has a 7.5% lower equivalent TL than the case 4 approach.

KEYWORDS

Acoustic, Muffler, Silencer, Experimental Study, Simulation

* Corresponding Author: Email: Mpfard@um.ac.ir