

Original Research Paper

Design of Reflective-Type Muffler for Acoustic Noise Control in Space Missions: Numerical and Analytical Approach

Iman Bahman Jahromi* 

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 19 January 2025

Revised 01 February 2025

Accepted 08 February 2025

Available Online 26 February 2025

Keywords:

Reflective muffler

extended-tube

Spacecraft acoustic

Transfer matrix

Acoustic isosurface

ABSTRACT

One of the most significant challenges in space missions is controlling the noise level within the cabin. Mufflers or silencers are employed to mitigate noise. In the present study, the performance of a basic reflective silencer is first investigated analytically and numerically in its simplest configuration. Based on the analytical evaluation of the base muffler, maximum performance occurs at odd multiples of $\pi/2$, while minimum performance is observed at integer multiples of π . Following the analytical analysis, extensions in the form of expanded tubes, designed based on the analytical findings, are added to the muffler. The performance of the reflective muffler is calculated using the sound transmission loss parameter and transfer matrix method, and the results are compared with numerical simulations. The findings reveal that while the numerical results generally align with the analytical predictions, discrepancies exist. Specifically, at frequencies above 1370 Hz, non-ideal effects are observed in the numerical results. As frequency increases, the acoustic wavefront inside the chamber deviates from a planar state, leading to reduced muffler efficiency at higher frequencies. Non-planar waves between the two extended tubes (with lengths $L/2$ and $L/4$) form at resonant frequencies of 1026 Hz and 1371 Hz. Although the emergence of non-planar waves disrupts muffler performance, the muffler with a single $L/2$ extension still outperforms the base muffler. Moreover, the configuration with two extended tubes ($L/2$ and $L/4$) exhibits the best performance among all tested mufflers.

* Corresponding Author's E-mail: bahman@ari.ac.ir**How to Cite this Article:**I. Bahman Jahromi, "Design of reflective-type muffler for acoustic noise control in space missions: numerical and analytical approach," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 41-50, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1523>.**COPYRIGHTS**© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

طراحی مافلر انعکاسی جهت کنترل نوفه آکوستیک در مأموریت‌های فضایی: رویکرد تحلیلی-عددی

ایمان بهمن جهرمی* 

استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مأموریت‌های فضایی کنترل سطح صوت درون محفظه می‌باشد. جهت کنترل نویز از مافلرها یا صدا خفه‌کن‌ها استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، در ابتدا کارایی یک صداخفه‌کن انعکاسی در ساده‌ترین حالت به صورت تحلیلی و عددی بررسی می‌شود. با توجه به بررسی تحلیلی مافلر پایه، بیشینه عملکرد در ضرائب فرد $\pi/2$ و کمینه عملکرد در ضرائب صحیح عدد π اتفاق می‌افتد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده افزونه‌هایی از نوع لوله‌های گسترش یافته با طراحی به دست آمده در قسمت تحلیلی به آن افزوده می‌شود. کارایی مافلر انعکاسی با توجه به پارامتر اتلاف عبوری صوت و به کارگیری ماتریس انتقال محاسبه و با حل عددی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد به دست آمده از حل عددی، علی‌رغم تطابق کلی با نتایج تحلیلی، تفاوت‌هایی با آن دارد. به طور مشخص در فرکانس‌های بیشتر از ۱۳۷۰ هرتز، اثرات غیر ایده‌آل در نتایج عددی دیده می‌شوند. با افزایش فرکانس، جبهه موج آکوستیک درون محفظه از حالت صفحه‌ای خارج می‌شود و این موضوع باعث اختلال در عملکرد مافلر با افزایش فرکانس می‌شود. امواج غیر صفحه‌ای مابین دو لوله مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/2$ و $L/4$ در فرکانس تشدید ۱۰۲۶ هرتز و ۱۳۷۱ تشکیل شده‌اند. هرچند تشکیل امواج غیر صفحه‌ای در عملکرد مافلر اختلال ایجاد می‌کند، ولی با این وجود کماکان مافلر با یک لوله توسعه یافته $L/2$ ، عملکرد بهتری از مافلر پایه و مافلر با دو لوله توسعه یافته $L/2$ و $L/4$ ، بهترین عملکرد از بین مافلرهای بررسی شده را دارد.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۳۰ دی ۱۴۰۳
بازنگری ۱۳ بهمن ۱۴۰۳
پذیرش ۲۰ بهمن ۱۴۰۳
اولین انتشار ۰۸ اسفند ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

مافلر انعکاسی
لوله‌ی گسترش یافته
آکوستیک فضایی
ماتریس انتقال
سطح هم‌فشار آکوستیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: bahman@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

I. Bahman Jahromi, "Design of reflective-type muffler for acoustic noise control in space missions: numerical and analytical approach," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 41-50, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1523>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



علائم و اختصارات

D	قطر محفظه مافلر
d_1	قطر لوله ورودی به محفظه
d_2	قطر لوله خروجی از محفظه
L	طول محفظه مافلر
m	مجدور نسبت قطر محفظه به قطر لوله
f_{res}	فرکانس تشدید
Y_0	امپدانس مشخصه لوله
Y_c	امپدانس مشخصه محفظه
S_c	سطح مقطع محفظه
S_p	سطح مقطع لوله
k	عدد موج
p	فشار آکوستیک
v	سرعت جرمی آکوستیک
TL	اتلاف عبوری
c_0	سرعت صوت
Z	امپدانس آکوستیک

مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مأموریت‌های فضایی، کنترل صوت درون محفظه می‌باشد [۱،۲]. منابع متعدد تولید نوفه آکوستیک درون و بیرون فضاپیما وجود داشته و روش کنترل صوت هر کدام از این منابع متفاوت می‌باشد. یکی از راه‌های کنترل برخی از این منابع تولید صوت - مانند فن هواساز - مافلرها یا صدا خفه‌کن‌ها می‌باشد [۳]. کنترل نویز توسط مافلرها در انواع فضاپیماهای مداری و زیر مداری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. شکل ۱ مافلر طراحی شده جهت استفاده در ایستگاه فضایی بین‌المللی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - مافلر جهت استفاده در ورودی و خروجی فن هواساز ایستگاه فضایی بین‌المللی [۵].

Fig. 1. Muffler or silencer used at the Inter-Module Ventilation (IMV) fan inlet and outlet in the ISS [5].

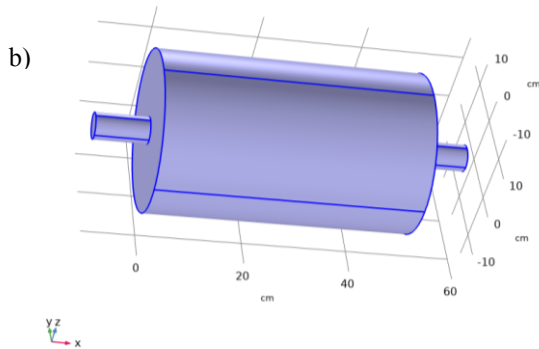
مافلرهای جذبی^۱ با استفاده از مواد جاذب صوت در بدنه خود باعث اتلاف انرژی صوت در فرکانس‌های نسبتاً بیشتر می‌شوند. مافلرهای انعکاسی^۲ با تغییر هندسه مافلر و در نتیجه تغییر امپدانس آکوستیکی از عبور امواج آکوستیک در فرکانس‌های مشخص و معمولاً کم جلوگیری می‌کنند. این قابلیت مافلرهای انعکاسی، آنها را گزینه مناسبی جهت استفاده در صنایع مختلف می‌کند [۶]. جهت بهبود عملکرد مافلرهای انعکاسی از روش‌های متنوعی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی عملکرد مافلرها، پارامتر "اتلاف عبوری"^۳ است [۷]. اتلاف عبوری نشان‌دهنده میزان کاهش توان صوت در عبور از مافلر می‌باشد [۸].

از ترکیب مافلرهای جذبی و انعکاسی، مافلرهای ترکیبی به وجود می‌آیند که عملکرد مناسبی در بازه فرکانسی گسترده‌تر از مافلرهای انعکاسی و جذبی به‌تنهایی دارند [۹]. در کاربرد مافلرهای جذبی در مأموریت‌های فضایی محدودیت‌هایی وجود دارد. این محدودیت‌ها شامل امکان از دست دادن قابلیت‌ها با گذر زمان و در محیط با ارتعاشات احتمالی متناوب و همچنین عدم عملکرد مناسب در فرکانس‌های صوتی کم می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده تمرکز پژوهش حاضر بر طراحی مافلرهای انعکاسی می‌باشد [۱۰].

با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات گسترده‌ای بر روی پارامترهای مؤثر در عملکرد بهینه مافلرهای انعکاسی صورت گرفته‌است. آموکو^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۹ و با استفاده از نرم‌افزار کامسول تحقیقات گسترده‌ای را در مورد اثر هندسه مافلر انعکاسی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی شامل قطر لوله ورودی و خروجی، قطر محفظه اصلی مافلر و همچنین استفاده از صفحات سوراخ‌دار انجام دادند [۱۱]. در تحقیقات آموکو مشخص شد که استفاده از صفحات عمود بر جریان صوت و امواج آکوستیک درون مافلرها اثری دوگانه دارند. بدین معنی که در کنار اثر مثبت بر عملکرد آکوستیکی مافلر - با اتلافات فشار در عبور جریان سیال از درون مافلر - در عملکرد سیالاتی مافلر اختلال ایجاد می‌کنند.

یک دسته از تحقیقات بر روی بهینه‌سازی پارامترهای هندسی اصلی یک مافلر کلاسیک متمرکز هستند. گویت^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از بهینه‌سازی هندسی، عملکرد مافلر خودرو را بهبود دادند. در پژوهش گویت پارامترهای بهینه‌سازی محدود بودند [۱۲]. با افزایش پارامترهای بهینه‌سازی مانند صفحات سوراخ‌دار نیاز به مدل‌های پیشرفته‌تر بهینه‌سازی و همچنین بهره‌گیری از قابلیت‌های

1. Absorbent
2. Reflective
3. Transmission loss
4. Amuaku
5. Gavit



شکل ۲- هندسه مافلر بدون هرگونه فضای افزایشی درون محفظه الف) نمای دو بعدی ب) نمای سه بعدی.

Fig. 2. Schematic of muffler without any extension in the chamber a) 2D view b) 3D view.

با فرض انتشار موج آکوستیک درون مافلر شکل ۲ به صورت صفحه‌ای و با استفاده از ماتریس انتقال، رابطه بین فشار و سرعت جرمی آکوستیک در ورودی محفظه - نقطه ۱ - و فشار و سرعت جرمی آکوستیک در خروجی محفظه - نقطه ۴ - به صورت رابطه ۱ خواهد بود [۱۰].

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & j \cdot \sin kl \cdot Y_C \\ \frac{j \cdot \sin kl}{Y_C} & \cos kl \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه ۱ پارامتر k عدد موج و $Y_C = \frac{c_0}{S_C}$ امپدانس مشخصه^۳ محفظه در حالت سیال غیرلزج می‌باشد ($S_C = \pi D^2$). اتلاف عبوری با فرض خروجی ایده‌آل و بدون انعکاس، از نسبت توان موج آکوستیک در ورودی مافلر به توان موج آکوستیک در خروجی مافلر مطابق رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{A_{in}}{A_{trans}} \right|^2 \quad (2)$$

در رابطه ۲، A_{in} دامنه موج ورودی به محفظه مافلر و A_{trans} دامنه موج در لوله خروجی مافلر می‌باشد. با استفاده از ماتریس انتقال رابطه ۱، ضریب اتلاف عبوری مافلر یک - برای زمانی که قطر لوله ورودی و خروجی یکسان باشند - به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$TL = 20 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right\} \quad (3)$$

در رابطه ۳ ضریب m به صورت $m = \left(\frac{D}{d} \right)^2$ می‌باشد. در ادامه، با استفاده از رابطه ۳، اثر تغییر پارامترهای اصلی مافلر کلاسیک بررسی شده است. جدول ۱ ابعاد هندسی مافلر شکل ۲ که شامل لوله

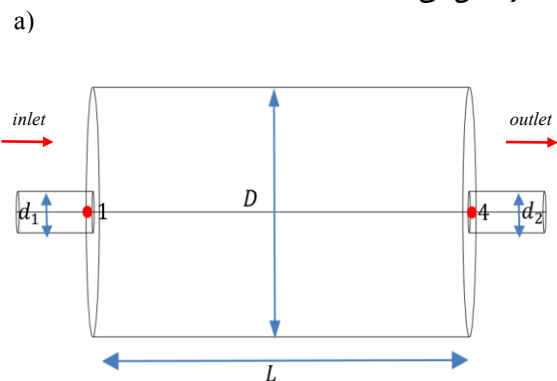
یادگیری ماشین احساس می‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۲۴ ستونگ و همکاران از مدل‌های یادگیری ماشین در طراحی هندسه بهینه درون محفظه بهره بردند [۱۴] با توجه به غیر قابل تبیین و تعمیم بودن هندسه به دست آمده با روش‌های هوش مصنوعی، مطالعات تحلیلی بیشتر بر روی المان‌های اصلی کاهشده صوت درون محفظه مانند لوله‌های توسعه یافته ضروری به نظر می‌رسد.

چانگ در سال ۲۰۱۸ به بررسی عددی اثر استفاده از لوله‌های توسعه یافته درون مافلرها با استفاده از روش FEM پرداخت [۱۵] در مطالعه چانگ تبیین تحلیلی مناسبی از فیزیک مسأله صورت نپذیرفت. تحلیل فضاهای توسعه یافته ساده مانند لوله‌های افزایشی در ورودی و خروجی‌های محفظه، فرصت مناسبی جهت بینش عمیق‌تر نسبت به فیزیک مسأله پدید می‌آورد [۱۶].

با توجه به نیاز به طراحی و توسعه مافلرهای انعکاسی و به خصوص مافلرهای با فضاهای توسعه یافته درون محفظه، در پژوهش حاضر در ابتدا یک مافلر کلاسیک بدون فضای توسعه یافته درون محفظه به صورت تحلیلی و سپس عددی با استفاده از روش FEM در نرم افزار کامسول^۱ بررسی و مقایسه می‌شوند. در ادامه لوله‌های افزایشی جهت بهبود عملکرد مافلر کلاسیک اضافه شده و اثرات آن‌ها بر پارامتر اتلاف عبوری کلی به صورت تحلیلی و عددی بررسی و مقایسه می‌شوند. در انتها با استفاده از روش ماتریس انتقال [۱۷، ۱۸] اتلاف عبوری کلی مافلر محاسبه می‌شود.

استخراج مدل تحلیلی

در این بخش در ابتدا یک مافلر ساده‌سازی شده و بدون فضای افزایشی درون محفظه که تنها با تغییر سطح مقطع و در نتیجه تغییر امپدانس آکوستیک کار می‌کند مورد بررسی تحلیلی و عددی قرار گرفته است. شکل ۲ هندسه مافلر بدون هرگونه فضای افزایشی درون محفظه را نشان می‌دهد.



1. Comsol Multiphysics
2. Transfer Matrix

3. Characteristic Impedance

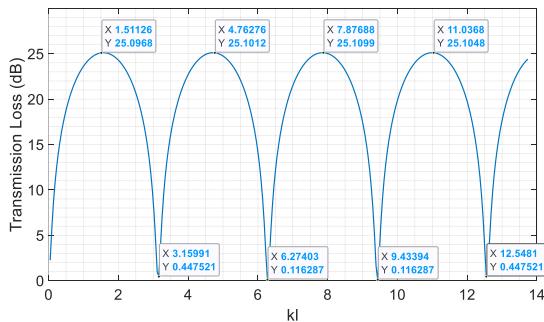
افزایش قطر لوله‌های ورودی و خروجی سبب کاهش بیشینه ضریب اتلاف عبوری از ۲۵ دسی‌بل به ۱۳ دسی‌بل شده است. شکل ۴ اتلاف عبوری مافلر بدون حجم افزایشی پایه در فرکانس بی‌بعد شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، بیشینه عملکرد در ضرائب فرد $\frac{\pi}{2}$ و کمینه عملکرد در ضرائب صحیح عدد π اتفاق افتاده است.

با توجه به رابطه شماره ۳ و شکل ۴ مقادیر بیشینه اتلاف عبوری در $\sin(kl) = 1$ و مقادیر کمینه در $\sin(kl) = 0$ اتفاق می‌افتد. به دیگر سخن، مقادیر بیشینه در عدد بدون بعد $kl = (2n + 1)\frac{\pi}{2}$ و مقادیر کمینه اتلاف عبوری در $kl = n\pi$ برای $n = 1, 2, 3, \dots$ اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه $k = 2\pi f/c_0$ ، مقدار بیشینه اتلاف عبوری برای یک محفظه به طول L در فرکانس ارائه شده در رابطه ۴ اتفاق می‌افتد:

$$f_{max} = \frac{(2n + 1)c_0}{4L} \quad (4)$$

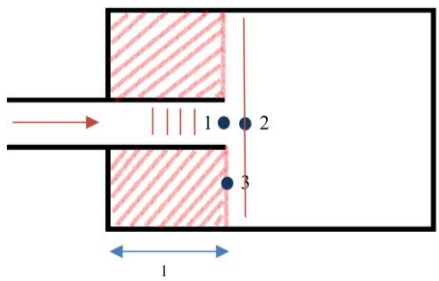
و مقدار کمینه اتلاف عبوری برای یک محفظه به طول L در فرکانس ارائه شده در رابطه ۴ اتفاق می‌افتد:

$$f_{min} = \frac{nc_0}{2L} \quad (5)$$



شکل ۴- حل تحلیلی اتلاف عبوری مافلر بدون حجم افزایشی پایه در فرکانس بی‌بعد شده.

Fig. 4. Transmission loss of reference mufflers according to nondimensionalized frequency.



شکل ۵- شماتیک فضای ایجاد شده درون محفظه مافلر توسط لوله گسترش یافته.

Fig. 5. The generated space in muffler by extended-tube.

هدف کلی از ایجاد فضاهای افزایشی درون محفظه مافلر، بهبود پارامتر اتلاف عبوری در فرکانس‌های مورد نظر (رابطه ۵) از طریق ایجاد

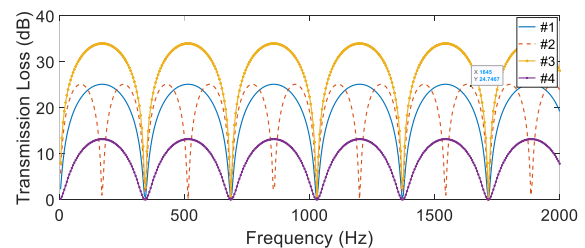
ورودی صوت، لوله خروجی و محفظه مافلر می‌باشد را در چهار حالت مختلف نشان می‌دهد. مافلر نوع یک به عنوان مافلر پایه انتخاب شده است. در مافلر پایه، سعی شده است که هندسه‌ای پرسامد در کاربرد صنعتی و متون پژوهشی انتخاب شود. به همین دلیل $m = 36$ که نسبتی بسیار پرکاربرد - به خصوص در مافلر خودرو است - انتخاب شده است. در سه نوع دیگر یک پارامتر نسبت به مافلر پایه به صورت محسوس تغییر کرده است تا اثر آن پارامتر بر عملکرد مافلر بررسی شود. در مافلر شماره ۲ طول محفظه دوبرابر شده است. در مافلر شماره ۳ قطر محفظه از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر افزایش یافته است. در مافلر شماره ۴ قطر لوله ورودی و خروجی از ۵ سانتی‌متر به ۱۰ سانتی‌متر افزایش یافته است.

جدول ۱- ابعاد هندسی مافلر بدون فضای افزایشی.

Table 1. Geometrical characteristics of the simplified muffler.

نوع مافلر	L (cm)	(cm)D	(cm)d ₁	(cm)d ₂
1	50	30	5	5
2	100	30	5	5
3	50	50	5	5
4	50	30	10	10

شکل ۳ تأثیر تغییر پارامترهای هندسی مطابق جدول ۱ را در عملکرد یک مافلر بدون فضای گسترش یافته درون محفظه را نشان می‌دهد. به طوری که مشخص است عملکرد مافلر بسیار به ابعاد هندسی آن وابسته است. در پژوهش حاضر ابعاد مافلر پایه مطابق با مافلر شماره یک در جدول ۱ می‌باشد. بر اساس شکل ۳ دوبرابر کردن طول محفظه باعث ایجاد دره کمینه ضریب اتلاف عبوری در فرکانس‌هایی شده است که در مافلر پایه، بیشینه عملکرد مافلر در آن فرکانس‌ها بود (فرکانس‌های ۱۷۰ هرتز، ۵۱۰ هرتز و غیره). افزایش قطر محفظه از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر باعث شده است که بیشینه ضریب اتلاف از ۲۵ دسی‌بل به ۳۴ دسی‌بل افزایش یابد.



شکل ۳- حل تحلیلی اتلاف عبوری مافلر بدون حجم افزایشی با پارامترهای جدول ۱.

Fig. 3. Transmission loss of simplified mufflers according to Table 1.

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ann1}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos kl & j \sin kl Y_c \\ j \sin kl & \cos kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{ann2}} & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_6 \\ v_6 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

رابطه ۱۰ را می‌توان به صورت رابطه ۱۱ بازنویسی کرد:

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_6 \\ v_6 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

که در آن:

$$T_{11} = \cos(kl3) - \sin(kl3)(m - 1)/(m \cot(kl2)) \quad (12)$$

$$T_{12} = Y_0 \sin(kl3) I / m \quad (13)$$

$$T_{21} = (m - 1) \cos(kl3) \frac{I}{Y_0 \cot(kl1)} + m \sin(k3) \frac{I}{Y_0} + (-m - 1) \frac{\sin(kl3)}{\cot(kl1) m} + \cos(kl3)(m - 1) I / (Y_0 \cot(kl2)) \quad (14)$$

$$T_{22} = -(m - 1) \sin(kl3) / (\cot(kl1) m) + \cos(kl3) \quad (15)$$

با استفاده از رابطه ۲، رابطه ۱۶ جهت محاسبه اتلاف عبوری مافلری با هندسه شکل ۶ به دست می‌آید:

$$TL = 20 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2} \left(T_{11} + T_{22} + \frac{T_{12}}{Y_0} + T_{21} Y_0 \right) \right\} \quad (16)$$

بررسی و تحلیل نتایج

همانطور که در بخش طراحی به دست آمد (روابط شماره ۸ و ۹) و جهت بهبود عملکرد مافلر پایه به دو لوله با طول‌های $l_1 = \frac{L}{2}$ و $l_2 = \frac{L}{4}$ نیاز می‌باشد. قطر لوله‌ها همان قطر لوله ورودی و خروجی خواهد بود. در این بخش نتایج حل تحلیلی و عددی برای سه حالت:

(۱) محفظه بدون فضای گسترش یافته،

(۲) محفظه با فضای گسترش یافته به طول $l_1 = \frac{L}{2}$ ،

(۳) محفظه با فضاهای گسترش یافته توسط لوله به طول

$$l_2 = \frac{L}{4} \text{ و } l_1 = \frac{L}{2}$$

مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بررسی مافلر بدون فضای گسترش یافته

در این بخش، هندسه مافلر مطابق شکل ۲ به صورت عددی بررسی شده است. در این مافلر از لوله‌های گسترش یافته استفاده نشده است. شکل ۷ اتلاف عبوری مافلر پایه در حل تحلیلی و عددی را نشان می‌دهد. تطابق بسیار مناسبی بین حل تحلیلی و عددی تا فرکانس ۱۳۷۱ هرتز وجود دارد. این موضوع صحت نتایج عددی را تأیید می‌کند. به نظر می‌رسد در حل

تشدید آکوستیک در همان فرکانس است. در ابتدا امیدانس فضای ایجاد شده درون محفظه توسط لوله گسترش یافته محاسبه شده است.

شکل ۵ شماتیک فضای ایجاد شده درون محفظه مافلر توسط لوله گسترش یافته را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، امیدانس فضای حلقوی^۱ ایجاد شده در ناحیه مشخص شده (با توجه به اینکه $p_1 = p_2 = p_3$ و $v_1 = v_2 + v_3$) مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$Z_{ann} = \frac{p_3}{v_3} = -j Y_{ann} \cot(kl) \quad (6)$$

$$Y_{ann} = \frac{c_0}{S_c - S_p}$$

برای ایجاد تشدید در ناحیه حلقوی، قسمت موهومی Z_{ann} مساوی صفر قرار می‌گیرد. فرکانس تشدید ناحیه توسعه یافته از رابطه ۷ به دست می‌آید:

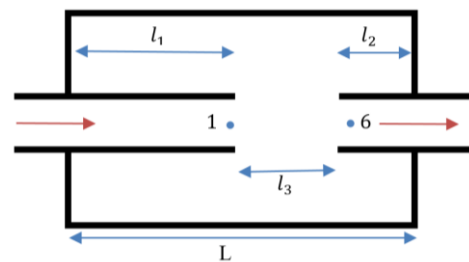
$$f_{res.} = \frac{(2n + 1)c_0}{4l} \quad (7)$$

با استفاده از رابطه ۵ و ۷ طول بهینه لوله افزایشی- برای اینکه کاهش ناگهانی اتلاف عبوری محفظه در $kl = \pi$ از بین برود و تشدید در فضای مشخص شده دقیقاً در فرکانس مورد نظر اتفاق افتد به دست می‌آید. برای این منظور باید:

$$\frac{c_0}{4l} = \frac{c_0}{2L} \quad (8)$$

بنابراین باید طول لوله توسعه یافته ورودی نصف طول محفظه یعنی $l_1 = \frac{L}{2}$ قرار گیرد. برای حذف نقطه کمینه دوم در شکل ۴ ($kl = 2\pi$) از رابطه ۹ استفاده می‌شود:

$$\frac{c_0}{4l} = \frac{c_0}{L} \quad (9)$$

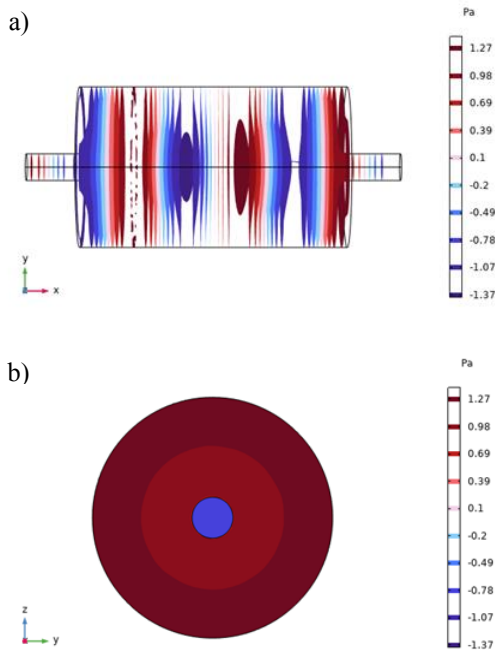


شکل ۶- شماتیک فضای ایجاد شده درون محفظه مافلر توسط دو لوله گسترش یافته.

Fig. 6. The generated space in muffler by two extended-tubes.

بنابراین باید طول لوله توسعه یافته خروجی ربع طول محفظه یعنی $l_2 = \frac{L}{4}$ قرار گیرد. شکل ۶ شماتیک فضای ایجاد شده درون محفظه مافلر توسط دو لوله گسترش یافته در ورودی و خروجی محفظه را نشان می‌دهد. ماتریس انتقال بین نقطه ۱ و ۶ در شکل ۶ از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

شکل ۹ سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر پایه در فرکانس ۱۳۷۱ هرتز در دو صفحه XY و صفحه YZ نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، سطوح هم‌فشار آکوستیک در این فرکانس ماهیت صفحه‌ای خود را از دست داده‌اند. در صفحه YZ هم تشکیل مود شعاعی امواج آکوستیک مشهود است.

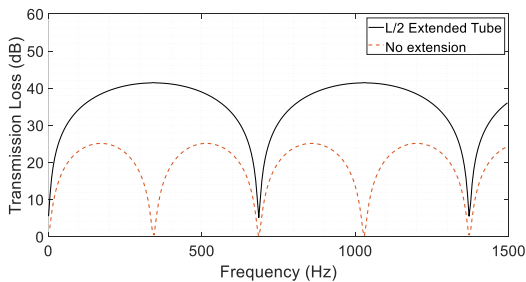


شکل ۹- سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر پایه در فرکانس ۱۳۷۱ هرتز الف) صفحه XY ب) صفحه YZ.

Fig. 9. Acoustic isosurfaces in base muffler at 1371 Hz a) xy view b) yz view.

بررسی مافلر با لوله‌ی گسترش یافته $L/2$

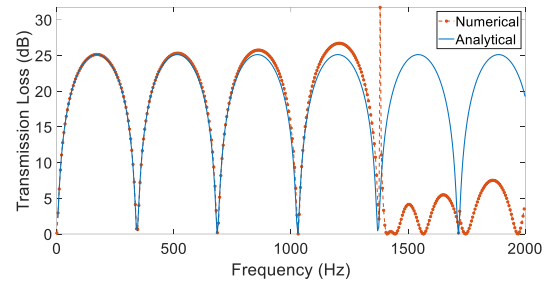
در شکل ۱۰ حل تحلیلی اتلاف عبوری مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی با مافلر پایه مقایسه شده است. همانطور که در بخش تحلیلی پیش‌بینی شده بود افت ضریب تلفات عبوری در $kl = n\pi$ جبران شده است



شکل ۱۰- مقایسه حل تحلیلی اتلاف عبوری مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی با مافلر پایه.

Fig. 10. Comparison of transmission loss of muffler with one extended tube ($l_1=L/2$) with base muffler.

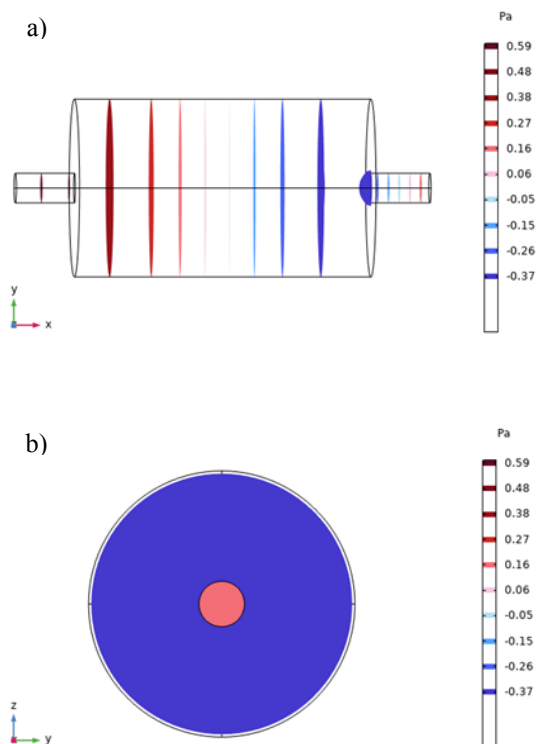
عددی پس از فرکانس ۱۳۷۱ هرتز، امواج آکوستیک از حالت امواج صفحه‌ای خارج شده‌اند. جهت بررسی دقیق‌تر موضوع جبهه‌های موج آکوستیک درون محفظه در فرکانس‌های تشدید ترسیم شده‌اند.



شکل ۷- مقایسه اتلاف عبوری مافلر پایه در حل تحلیلی و عددی.

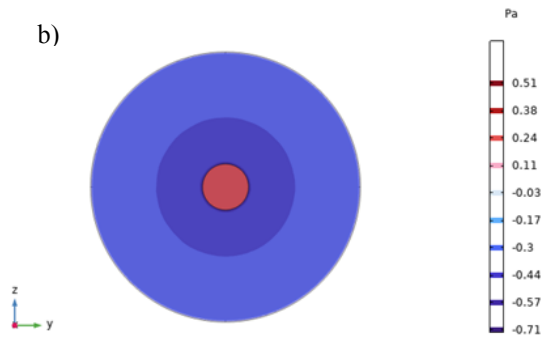
Fig. 7. Comparison of the transmission loss of the base muffler according to analytical and numerical solutions.

شکل ۸ سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر پایه در فرکانس ۳۴۶ هرتز در دو صفحه XY و صفحه YZ نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، سطوح هم‌فشار آکوستیک در این فرکانس صفحه‌ای هستند



شکل ۸- سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر پایه در فرکانس ۳۴۶ هرتز الف) صفحه XY ب) صفحه YZ.

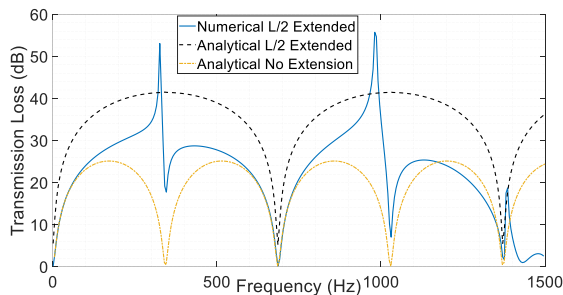
Fig. 8. Acoustic isosurfaces in base muffler at 346 Hz a) xy view b) yz view.



شکل ۱۲- سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی در فرکانس تشدید ۱۳۷۱ هرتز (الف صفحه xy (ب صفحه yz).

Fig. 12. Acoustic isosurfaces in muffler with one extended tube ($l_1=L/2$) at 1371 Hz a) xy view b) yz view.

شکل ۱۳ حل تحلیلی و عددی برای اتلاف عبوری مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی و مافلر پایه را مقایسه کرده است. مافلر در واقعیت هم تا حدود زیادی به اهداف طراحی رسیده است. حل عددی نشان می‌دهد که لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی، عملکرد کلی مافلر را نسبت به حالت پایه بهبود بخشیده است ولی به دلیل وجود امواج غیر صفحه‌ای، از حالت ایده‌آل طراحی در حل تحلیلی مقداری فاصله دارد.



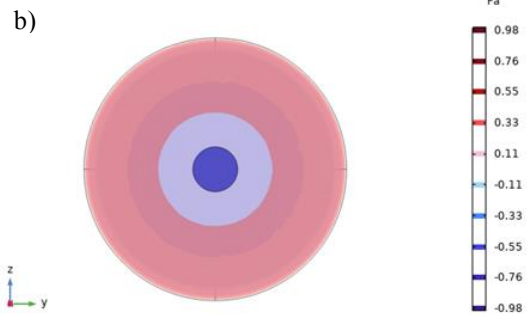
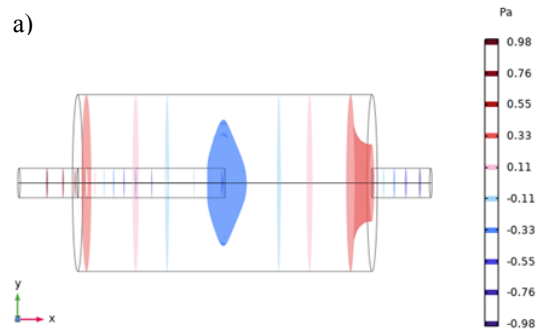
شکل ۱۳- مقایسه حل تحلیلی و عددی برای اتلاف عبوری مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی و مافلر پایه.

Fig. 13. Comparison of analytical and numerical solutions for transmission loss of muffler with one extended tube ($l_1=L/2$) and base muffler.

بررسی مافلر با لوله‌ی گسترش یافته $L/2$ و $L/4$

در این بخش مافلر با دو لوله گسترش یافته به طول‌های گسترش یافته $L/4$ و $L/2$ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۴ سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/4$ و $L/2$ در فرکانس تشدید ۱۰۲۶ هرتز و ۱۳۷۱ هرتز نشان می‌دهد. مابین دو لوله امواج غیر صفحه‌ای تشکیل شده‌اند.

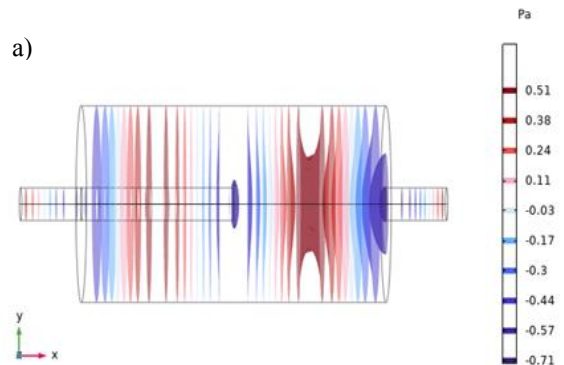
شکل ۱۱ سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در فرکانس تشدید ۶۸۶ هرتز در صفحه xy و صفحه yz نشان می‌دهد. در این حالت امواج غیر صفحه‌ای در خروجی لوله توسعه یافته مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۱- سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در ورودی در فرکانس تشدید ۶۸۶ هرتز (الف صفحه xy (ب صفحه yz).

Fig. 11. Acoustic isosurfaces in muffler with one extended tube ($l_1=L/2$) at 686 Hz a) xy view b) yz view.

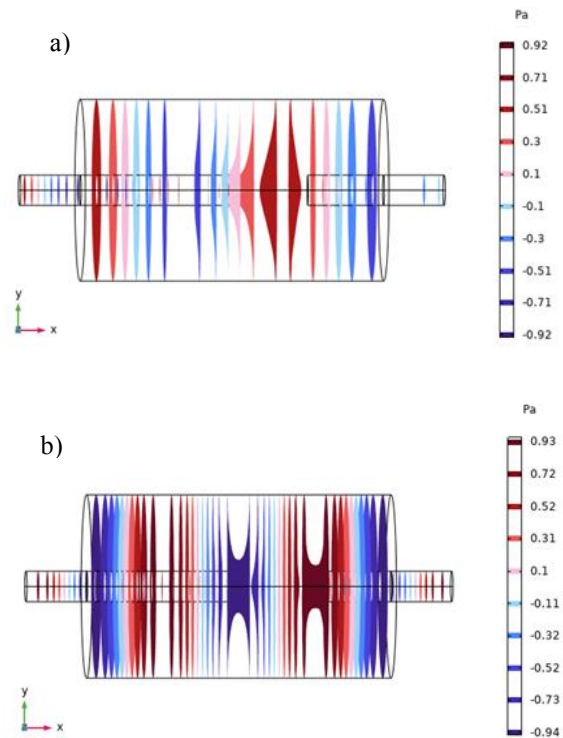
شکل ۱۲ سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با یک لوله افزایشی به طول $L/2$ در فرکانس تشدید ۱۳۷۱ هرتز در صفحه xy و صفحه yz نشان می‌دهد. در این حالت امواج غیر صفحه‌ای درون محفظه تشدید شده‌اند.



نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر در ابتدا کارایی یک مافلر انعکاسی در حالت پایه بدون فضای افزایش درون محفظه، به صورت تحلیلی به دست آمده است. با تغییر در پارامترهای هندسی مافلر دیده شد که عملکرد مافلر بسیار به ابعاد هندسی آن وابسته است. دو برابر کردن طول محفظه در مافلر پایه باعث ایجاد دره کمینه ضریب اتلاف عبوری در فرکانس‌هایی شده است که در مافلر پایه، بیشینه عملکرد مافلر در آن فرکانس‌ها بود (فرکانس‌های ۱۷۰ هرتز، ۵۱۰ هرتز و غیره). افزایش قطر محفظه مافلر از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر باعث می‌شود که بیشینه ضریب اتلاف از ۲۵ دسی‌بل به ۳۴ دسی‌بل افزایش یابد. افزایش قطر لوله‌های ورودی و خروجی سبب کاهش بیشینه ضریب اتلاف عبوری از ۲۵ دسی‌بل به ۱۳ دسی‌بل شده است. با توجه به بررسی تحلیلی مافلر پایه، بیشینه عملکرد در ضرایب فرد $\frac{\pi}{2}$ و کمینه عملکرد در ضرایب صحیح عدد π اتفاق می‌افتد.

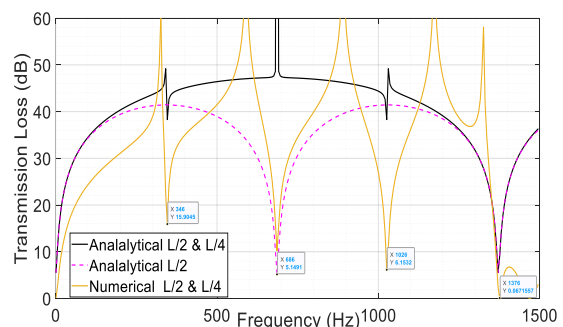
با مقایسه حل عددی و تحلیلی مافلر پایه نشان داده شد که تا فرکانس بدون بعد $kl = 4\pi$ (یا فرکانس معادل ۱۳۷۱ هرتز در مافلر پایه)، حل عددی تطابق بسیار خوبی با حل تحلیلی مافلر در حالت پایه دارد. اما پس از این فرکانس، عملکرد مافلر در حل عددی به شدت مختل می‌شود. جهت بررسی علت این موضوع، سطوح هم‌فشار آکوستیک درون محفظه ترسیم شد. دیده شد که با افزایش فرکانس، جبهه موج آکوستیک از حالت صفحه‌ای خارج می‌شود و این موضوع باعث اختلال در عملکرد مافلر با افزایش فرکانس می‌شود. سپس با توجه به تحلیل‌های انجام شده، افزونه‌هایی از نوع لوله‌های گسترش یافته با طراحی به دست آمده در قسمت تحلیلی به آن افزوده شده است. کارایی مافلر انعکاسی با توجه به پارامتر اتلاف عبوری صوت و به کارگیری ماتریس انتقال محاسبه و با حل عددی مقایسه شد. مقایسه نتایج حل عددی و تحلیلی نشان داد که رویکرد تحلیلی دید مناسبی را به طراح ارائه می‌کند که روابط بین پارامترهای طراحی و میزان تأثیر آن‌ها در افزایش راندمان کلی مافلر با افزودن فضای گسترش یافته را تبیین می‌کند. با افزایش پیچیدگی هندسه، اثرات غیرایده‌آل بیشتری (تشکیل امواج آکوستیک به صورت غیر صفحه‌ای) در نتایج عددی مشاهده می‌شود. امواج غیر صفحه‌ای مابین دو لوله مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/4$ و $L/2$ در فرکانس تشدید ۱۰۲۶ هرتز و ۱۳۷۱ هرتز تشکیل شده‌اند. هرچند تشکیل امواج غیر صفحه‌ای در عملکرد مافلر اختلال ایجاد می‌کنند، ولی با این وجود کماکان مافلر با یک لوله توسعه یافته $L/2$ ، عملکرد بهتری از مافلر پایه و مافلر با دو لوله توسعه یافته $L/4$ و $L/2$ ، بهترین عملکرد از بین مافلرهای بررسی شده را دارد.



شکل ۱۴ - سطوح هم‌فشار آکوستیک درون مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/2$ و $L/4$ در فرکانس تشدید الف) ۱۰۲۶ هرتز ب) ۱۳۷۱ هرتز.

Fig. 14. Acoustic isosurfaces in muffler with two extended tube $l_1=L/2$ and $l_2=L/4$ at a) 1026 Hz b) 1371 Hz.

شکل ۱۵ حل تحلیلی و عددی برای اتلاف عبوری مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/4$ و $L/2$ و مافلر پایه را مقایسه کرده است. حل عددی نشان می‌دهد که لوله افزایشی به طول $L/4$ و $L/2$ ، عملکرد کلی مافلر را نسبت به حالت پایه بهبود بخشیده است ولی به دلیل وجود امواج غیر صفحه‌ای، از حالت ایده‌آل طراحی در حل تحلیلی مقداری فاصله دارد.



شکل ۱۵ - مقایسه حل تحلیلی و عددی برای اتلاف عبوری مافلر با دو لوله افزایشی به طول $L/4$ ، $L/2$ و مافلر پایه.

Fig. 15. Comparison of analytical and numerical solutions for transmission loss of muffler with two extended tubes of $l_1=L/2$, $l_2=L/4$ and base muffler.

vol. 45, 2023, Art. no. 98,
<https://doi.org/10.1007/s40430-023-04023-1>.

- [10] M. L. Munjal, *Acoustic of Ducts and Mufflers*, 2nd Ed., Jhon wiley Sons, 2014.
- [11] R. Amuaku, E. A. Asante, A. Edward, and G. B. Gyamfi, "Effects of chamber perforations, inlet and outlet pipe diameter variations on transmission loss characteristics of a muffler using Comsol multiphysics," *Advances in Applied Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 104-109, 2019, <https://doi.org/10.11648/j.aas.20190406.11>.
- [12] R. Gavit and K. Wani, "Muffler transmission loss optimization for a vehicle using genetic algorithm," in *Smart Sensors Measurement and Instrumentation: Select Proceedings of CISCON 2021*, S. Chokkadi and R. Bandyopadhyay, Eds. Springer Singapore, 2023, pp. 1-17, https://doi.org/10.1007/978-981-19-6913-3_1.
- [13] B. Mohamad, J. Karoly, A. Zelentsov, and S. Amroune, "Investigation of perforated tube configuration effect on the performance of exhaust mufflers with mean flow based on three-dimensional analysis," *Archives of Acoustic*, vol. 46, no. 3, pp. 561-566, 2021, <https://doi.org/10.24425/aoa.2021.138148>.
- [14] K. S. Oh, H. Chung, and J. H. Oh, "Topology optimization using reinforcement learning for designing the inside layout of a muffler," *Available at SSRN*, 2024, Art. no. 4953398, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4953398>.
- [15] Y. C. Chang, M. C. Chiu, and M. R. Wu, "Acoustical simulation of a muffler internally inserted with an extended tube using the FEM," *Journal of Information and Optimization Sciences*, vol. 40, no. 1, pp. 47-62, 2019, <https://doi.org/10.1080/02522667.2017.1413042>.
- [16] F. Rafique, J. H. Wu, C. R. Liu, and F. Ma, "Transmission loss analysis of a simple expansion chamber muffler with extended inlet and outlet combined with inhomogeneous micro-perforated panel (iMPP)," *Applied Acoustics*, vol. 194, 2022, Art. no. 108808, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108808>.
- [17] E. Dokumaci, "Effect of sheared grazing mean flow on acoustic transmission in perforated pipe mufflers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 283, no. 3-5, pp. 645-663, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.018>.
- [18] N. K. Vijayasree and M. L. Munjal, "On an integrated transfer matrix method for multiply connected mufflers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 8, pp. 1926-1938, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.12.003>.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.

مراجع

- [1] I. Dandaroy, S. R. Chu, J. Dornak, and C. S. Allen, "Development of acoustic mufflers for cabin noise reduction in Orion spacecraft," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Washington, D.C., USA, 2021, pp. 568-576, <https://doi.org/10.3397/IN-2021-1568>.
- [2] C. S. Allen, "Internal acoustics of the ISS and other spacecraft," in *The Annual Conference of the Australian Acoustical Society*, Perth, Australia, 2017, Paper JSC-CN-40479.
- [3] C. Allen, "Quiet spacecraft cabin ventilation fan development: Motivation and context," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Grand Rapids, Michigan, 2023, pp. 426-434, https://doi.org/10.3397/NC_2023_0065.
- [4] J. R. Goodman, "Acoustics inside the space shuttle orbiter and the International Space Station," SAE, Tech. Rep. 2009-01-2247, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-2247>.
- [5] J. R. Goodman and F. W. Grosveld, "Acoustics and noise control in space crew compartments," NASA, Rep. SP-2015-624, 2015.
- [6] Z. Hu, C. Zhang, and L. Chen, "Simulation analysis of flow and acoustic characteristics of exhaust muffler of rolling rotor compressor," in *Journal of Physics: Conference Series, 6th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing*, Wuhan, China, vol. 2862, 2024, Art. no. 12026, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2862/1/012026>.
- [7] D. Suwandi, J. Middelberg, K. P. Byrne, and N. J. Kessissoglou, "Predicting the acoustic performance of mufflers using transmission line theory," in *ACOUSTICS 2005*, Busselton, Australia, 2005, pp. 181-187.
- [8] Y. Bai, Y. Chen, and J. Zheng, "Experimental study and acoustic characteristics analysis of defective-state Helmholtz-ring phononic crystal muffler," PREPRINT (Version 1) available at Research Square, 2024, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4963361/v1>.
- [9] U. Kalita and M. Singh, "Optimization of reactive muffler through pressure acoustic analysis and Taguchi approach," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*,