



# ISAV2024

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



## بررسی اثر تغییر موقعیت خروجی بر اتلاف عبوری در صدا خفه کن‌ها

علی زینل بیک<sup>ا</sup>، روح‌اله حسینی<sup>ب\*</sup>، محمدجواد زینل بیک<sup>پ</sup>

<sup>ا</sup> ایران، تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک

<sup>ب</sup> ایران، تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشیار گروه مهندسی مکانیک

<sup>پ</sup> ایران، تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی دکتری رشته مهندسی مکانیک

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [R.Hosseini.mech@gmail.com](mailto:R.Hosseini.mech@gmail.com)

### چکیده

آلودگی صوتی در دستگاه‌ها، همواره از چالش‌های فراگیر در صنعت بوده است. یکی از دستگاه‌های تولیدکننده ی آلودگی صوتی در صنایع، موتورهای احتراق داخلی هستند. برای مهار آلودگی صوتی تولید شده توسط این موتورها، از صدا خفه کن‌ها استفاده می‌شود. از رایج‌ترین انواع صدا خفه کن‌ها، صدا خفه کن‌های انبساطی هستند. با تغییر هندسه و جابجایی موقعیت لوله خروجی در صدا خفه کن‌های انبساطی می‌توان میزان اتلاف عبوری را افزایش داد. صدا خفه کن‌های خروجی جانبی، می‌توانند با ابعاد مشابه، اثرگذاری بیشتری در مقایسه با صدا خفه کن‌های انبساطی رایج داشته باشند. در این پژوهش، ابتدا اتلاف عبوری برای صدا خفه کن معمولی و صدا خفه کن خروجی جانبی از طریق حل تحلیلی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول محاسبه شده و سپس این نتایج با یک کار تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و صحت‌سنجی می‌شود.

کلمات کلیدی: صدا خفه کن؛ صدا خفه کن خروجی جانبی؛ اتلاف عبوری؛ نرم‌افزار کامسول.

## ۱- مقدمه

فناوری کاهش ارتعاش و نویز موضوع تحقیقات مهمی در بسیاری از صنایع است. با نصب دستگاه‌های کاهش آلودگی صوتی می‌توان انتقال آلودگی صوتی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. یکی از پرستفاده‌ترین دستگاه‌های کاهش آلودگی صوتی، صدا خفه‌کن<sup>۱</sup> هستند. صدا خفه‌کن‌ها به طور گسترده‌ای در صنعت برای کاهش انتقال آلودگی صوتی و لرزش استفاده می‌شوند [۱، ۲]. صدا خفه‌کن‌ها به طور ویژه برای کاهش آلودگی‌های صوتی موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دستگاه‌ها علاوه بر کاهش آلودگی‌های صوتی، باید میزان افت توان مطلوبی داشته باشند. افت توان بیش از حد در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند منجر به گرادپان فشار نامساعد و پیدایش پدیده‌ی فشار برگشتی شود. در این پژوهش، یک صدا خفه‌کن با خروجی جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای محاسبه اتلاف عبوری صدا خفه‌کن، از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های انجام شده توسط ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران، تطبیق داده شده است [۲، ۳]. در آزمایش‌های تجربی، اتلاف عبوری صدا خفه‌کن با استفاده از روش بارگذاری با دو بار و تغییر شرایط مرزی در انتهای لوله امیدانس به دست می‌آید [۲، ۴، ۵].

## ۲- بررسی و تحلیل نظری اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن با خروجی جانبی

در روش نظری، با استفاده از ماتریس انتقال، پارامترهای چهارگانه صدا خفه‌کن محاسبه شده و سپس رابطه محاسبه اتلاف عبوری بر حسب موقعیت مکانی خروجی صدا خفه‌کن استخراج می‌شود.

## ۲-۱ روش محاسبه تلفات عبوری

در این بخش تلاش می‌شود تا اتلاف عبوری به شکل رابطه‌ای بر حسب پارامترهای چهارقطبی بیان شود. رابطه (۱) ماتریس پارامترهای چهارقطبی را به عنوان بخشی از یک معادله ماتریسی نشان می‌دهد [۲، ۶].

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \zeta & \eta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که  $p_1$  و  $p_2$  فشار صدا در ورودی و خروجی صدا خفه‌کن را نشان می‌دهند. به طور مشابه  $v_1$  و  $v_2$  نیز بیانگر سرعت ارتعاش در ورودی و خروجی صدا خفه‌کن هستند. اگر دما و سطح مقطع ورودی و خروجی صدا خفه‌کن برابر باشند، میزان اتلاف عبوری صدا خفه‌کن بر اساس ماتریس انتقال چهارقطبی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$TL = 20 \log \left\{ \frac{1}{2} \left| \alpha + \beta \left( \frac{S_1}{c} \right) + \zeta \left( \frac{c}{S_1} \right) + \eta \right| \right\} \quad (2)$$

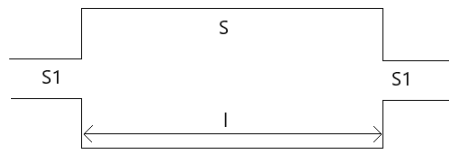
که  $S_1$  بیانگر مساحت سطح مقطع ورودی و خروجی و  $c$  نشان دهنده‌ی سرعت صوت در هوا هستند.

## ۳- اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن‌های انبساطی

صدا خفه‌کن‌های انبساطی از یک لوله‌ی ورودی، یک لوله‌ی خروجی و یک محفظه انبساط تشکیل می‌شوند. همانطور که در (شکل ۱) نشان داده شده است، لوله‌های ورودی و خروجی در دو طرف محفظه و بر روی یک محور قرار گرفته‌اند. امواج صوتی با ورود به محفظه انبساط، دچار کاهش افت فشار می‌شوند [۲، ۳].

<sup>1</sup> Muffler

<sup>2</sup> Zhang



شکل ۱ ساختار صدا خفه‌کن معمولی

برای صدا خفه‌کن انبساطی اصلی، ماتریس انتقال چهارقطبی با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos(kl) & j\frac{c}{S}\sin(kl) \\ j\frac{S}{c}\sin(kl) & \cos(kl) \end{pmatrix} \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۲) اتلاف عبوری صدا خفه‌کن انبساطی به شکل رابطه (۵) تعریف می‌شود. با ساده‌سازی رابطه (۳) می‌توان به رابطه (۴) رسید.

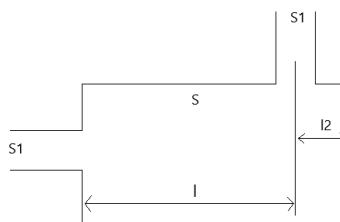
$$TL_1 = 10 \log \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \gamma - \frac{1}{\gamma} \right)^2 \sin^2(kl) \right\} \quad (4)$$

که  $\gamma = \frac{S}{S_1}$  نسبت انبساط صدا خفه‌کن را نشان می‌دهد. اتلاف عبوری صدا خفه‌کن انبساطی تابعی از فرکانس، طول محفظه

و نسبت انبساط صدا خفه‌کن است. اتلاف عبوری صدا خفه‌کن‌های انبساطی متداول دارای یک بازه فرکانس عبور است که در آن، اتلاف عبوری برابر با صفر است. در این پژوهش، یک صدا خفه‌کن با خروجی جانبی برای بهبود عملکرد صدا خفه‌کن‌های انبساطی مورد بررسی قرار گرفته است [۲، ۳].

### ۳-۱ اتلاف عبوری صدا خفه‌کن با خروجی جانبی

صدا خفه‌کن با خروجی جانبی، همانند صدا خفه‌کن‌های انبساطی شامل لوله‌ی ورودی و لوله‌ی خروجی و محفظه انبساط است. با این تفاوت که در صدا خفه‌کن با خروجی جانبی، راستای لوله‌ی ورودی و خروجی عمود بر هم است. در (شکل ۲) تصویری از صدا خفه‌کن با خروجی جانبی نمایش داده شده است.



شکل ۲ ساختار صدا خفه‌کن خروجی جانبی

رابطه (۵) ماتریس انتقال صدا خفه‌کن خروجی جانبی را نشان می‌دهد که در آن  $l_1 = l - l_2$  می‌باشد. [۲، ۳].

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos(kl_1) - \sin(kl_1) \tan(kl_2) & j\frac{S}{c}\sin(kl_1) \\ j\frac{S}{c}(\sin(kl_1) + \cos(kl_1) \tan(kl_2)) & \cos(kl_1) \end{pmatrix} \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۲) می‌توان اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن خروجی جانبی را به دست آورد. اتلاف عبوری این صدا خفه‌کن در رابطه (۶) نشان داده شده است [۲].

$$TL_2 = 20 \log \left\{ \frac{1}{2} \left| (\cos(kl_1) - \sin(kl_1) \tan(kl_2)) + j \frac{1}{\gamma} \sin(kl_1) + j\gamma (\sin(kl_1) + \cos(kl_1) \tan(kl_2)) + \cos(kl_1) \right| \right\} \quad (6)$$

اتلاف عبوری صدا خفه‌کن جانبی تابعی از فرکانس، طول محفظه انبساط، موقعیت مکانی خروجی و نسبت انبساط است. در بخش بعدی به توصیف مولفه‌های ابعادی صدا خفه‌کن خروجی جانبی پرداخته می‌شود. (جدول ۱) ابعاد صدا خفه‌کن خروجی جانبی را نشان می‌دهد.

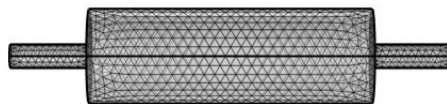
جدول ۱ ابعاد صدا خفه‌کن خروجی جانبی

مقدار	نماد	مولفه
۱۸۰	$l$	طول محفظه انبساط (میلی‌متر)
۳۰	$l_2$	فاصله‌ی بین محور خروجی تا انتهای محفظه انبساط (میلی‌متر)
۱۵	$d_1$	قطر ورودی (میلی‌متر)
۱۵	$d_2$	قطر خروجی (میلی‌متر)
۶۰	$D$	قطر محفظه انبساط (میلی‌متر)

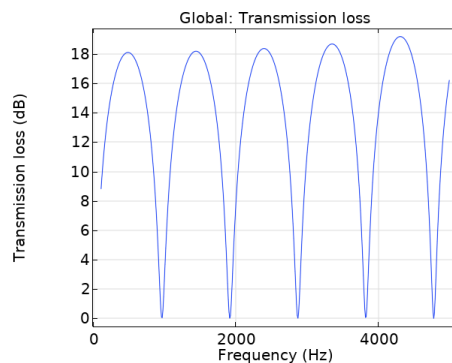
#### ۴- شبیه‌سازی و مقایسه اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن معمولی و خروجی جانبی

با استفاده از نرم‌افزار کامسول، میزان اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن معمولی و صدا خفه‌کن خروجی جانبی بررسی و در نهایت نتایج این شبیه‌سازی با نتایج محاسبات نظری و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. با استفاده از (شکل ۱) و داده‌های (جدول ۱)، هندسه‌ی صدا خفه‌کن معمولی را در محیط نرم‌افزار کامسول ایجاد شده است. (شکل ۳)، نمایی از شبکه‌بندی صدا خفه‌کن معمولی را نشان می‌دهد.

مسئله، تحت مطالعه‌ی فرکانسی در بازه فرکانس ۵۰۰۰-۱۰۰ حل شده است. در (شکل ۴) تصویری از نمودار اتلاف عبوری صدا خفه‌کن معمولی مشاهده می‌شود.

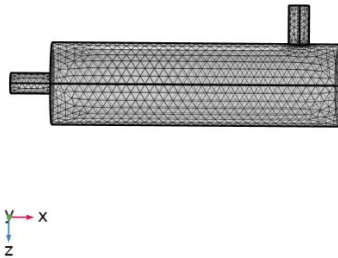


شکل ۳ شبکه‌بندی صدا خفه‌کن معمولی در نرم‌افزار کامسول



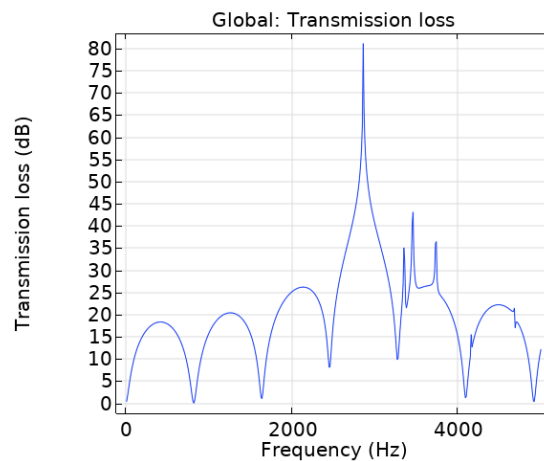
شکل ۴ نمودار اتلاف عبوری برای صدا خفه‌کن معمولی

در مرحله‌ی بعد، تحلیل برای صدا خفه‌کن خروجی جانبی تکرار می‌شود. به طور مشابه با رجوع به داده‌های (جدول ۱) و (شکل ۲)، هندسه‌ی صدا خفه‌کن خروجی جانبی را در نرم‌افزار کامسول تشکیل داده می‌شود. (شکل ۵) تصویری از شبکه‌بندی صدا خفه‌کن خروجی جانبی در نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد.



شکل ۵ شبکه‌بندی صدا خفه‌کن خروجی جانبی در نرم‌افزار کامسول

نوع مطالعه‌ی مساله، مطالعه‌ی فرکانسی در بازه ۵۰۰۰-۱۰ هرتز در نظر گرفته شده است. شکل ۶، اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی را در شرایط تعریف شده نشان می‌دهد.



شکل ۶ اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی

با مقایسه (شکل ۴) و (شکل ۶)، بهبود عملکرد صدا خفه‌کن خروجی جانبی، نسبت به صدا خفه‌کن معمولی در اتلاف عبوری قابل مشاهده است. با تغییر موقعیت خروجی صدا خفه‌کن می‌توان بیشینه اتلاف عبوری را با ساختار و ابعاد کلی یکسان، به طور تقریبی ۶۰ دسی‌بل افزایش داد.

## ۵- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل، از کار تجربی و نظری آقای ژانگ و همکاران استفاده شده است. اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی با استفاده از لوله امپدانس در یک آزمایش تجربی، محاسبه و صحت‌سنجی می‌شود [۲، ۴].

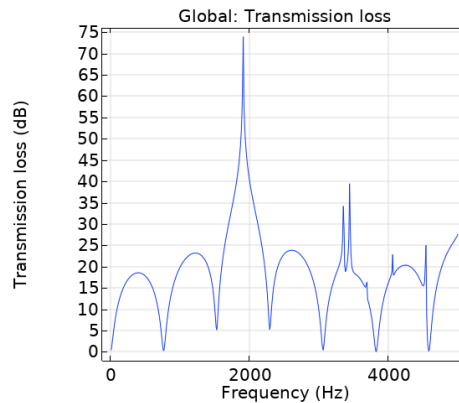
### ۱-۵ تطبیق نتایج شبیه‌سازی با نتایج نظری و تجربی

در این مطالعه، دو صدا خفه‌کن خروجی جانبی با استفاده از پارامترهای ذکر شده در (جدول ۱) طراحی شده اند. فاصله بین محور خروجی و سمت انتهایی صدا خفه‌کن به ترتیب ۴۵ میلی‌متر و ۹۰ میلی‌متر است. از لوله امپدانس برای اندازه‌گیری اتلاف عبوری دو صدا خفه‌کن استفاده می‌شود. [۲، ۸].

(شکل ۷)، نتایج شبیه‌سازی با فاصله‌ی ۴۵ میلی‌متری بین محور لوله‌ی خروجی و انتهایی صدا خفه‌کن را نشان می‌دهد. در

(جدول ۲) نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با نتایج نظری و کار تجربی آقای ژانگ مقایسه شده است. در (

جدول ۲) نقاط مختلف از نمودار اتلاف عبوری تجربی و نظری با نمودار اتلاف عبوری شبیه‌سازی مقایسه و درصد خطای آن‌ها استخراج شده است. بیشترین درصد خطا در نقطه پیک به ثبت رسیده است. دلیل این خطا، آرمانی بودن شرایط مرزی در شبیه‌سازی است. همچنین انتشار امواج صوتی جذب نشده در انتهای صدا خفه‌کن در محیط آزمایش نیز می‌تواند خطای بزرگی را ایجاد کند [۷].

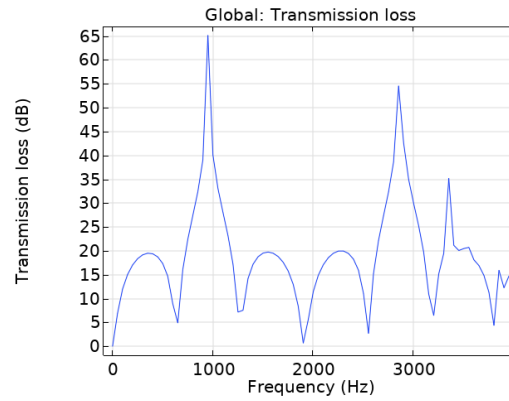


شکل ۷ نمودار اتلاف عبوری به دست آمده از شبیه‌سازی ( $l_2 = 0.25l$ )

جدول ۲ مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج کار تجربی آقای ژانگ ( $l_2 = 0.25l$ )

درصد خطا شبیه‌سازی به نظری (درصد)	درصد خطا شبیه‌سازی به تجربی (درصد)	اتلاف عبوری شبیه‌سازی (db)	اتلاف عبوری نظری (db)	اتلاف عبوری تجربی (db)	فرکانس (Hz)
۰	۰	۱۸	۱۸	۱۸	۵۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰۰
۴	۷/۶	۲۴	۲۵	۲۶	۱۵۰۰
۰	۴	۲۴	۲۴	۲۵	۲۵۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۳۰۰۰
۱۵	۱۵	۱۵	۱۳	۱۳	۴۰۰۰

در (شکل ۸)، نمودار اتلاف عبوری شبیه‌سازی برای فاصله ۹۰ میلی‌متری محور خروجی از انتهای صدا خفه‌کن نشان داده شده است. اولین پیک اتلاف عبوری صدا خفه‌کن در فرکانس ۹۵۰ هرتز در نتایج تجربی رخ می‌دهد که با فرکانس پیک نتایج شبیه‌سازی و نظری مطابقت دارد. در (جدول ۳) نتایج شبیه‌سازی با نتایج کار تجربی و نظری مقایسه شده است. بیشترین درصد خطا، مانند مقایسه قبل، در پیک اتلاف عبوری مشاهده می‌شود. دلایل این خطا، در مقایسه‌ی قبلی توضیح داده شده است. با بررسی درصد خطاها مشخص می‌شود که نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتایج کار تجربی و نظری دارند.

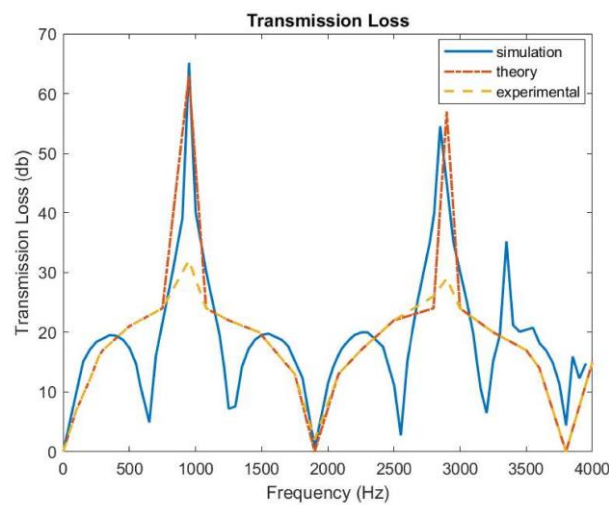


شکل ۸ نمودار اتلاف عبوری برای شبیه‌سازی ( $l_2 = 0.5l$ )

جدول ۳ مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج کار تجربی آقای ژانگ ( $l_2 = 0.5l$ )

درصد خطای شبیه‌سازی نسبت به نظری	درصد خطای شبیه‌سازی نسبت به تجربی	اتلاف عبوری شبیه‌سازی (db)	اتلاف عبوری نظری (db)	اتلاف عبوری تجربی (db)	فرکانس (Hz)
۷/۸	۷/۸	۱۹/۵	۱۸	۱۸	۳۵۰
۱۵	۱۵	۱۷	۲۰	۲۰	۵۰۰
۴	۵۳	۶۵	۶۲/۴	۳۰/۲	۹۵۰
۰	۰	۲۰	۲۰	۲۰	۱۵۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۰۰
۱۵	۲۰	۲۰	۱۷	۱۶	۳۵۰۰

در شکل ۹ نتایج اتلاف عبوری برای هر سه حالت شبیه‌سازی، نظری و تجربی برای فاصله‌ی ۹۰ میلی‌متری محور خروجی از انتهای صدا خفه‌کن، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اگر چه نتایج شبیه‌سازی کمی با نتایج تجربی و نظری متفاوت است، اما تطابق نتایج به صورت کلی مطلوب است و می‌تواند اطلاعات قابل اعتمادی را برای تعیین سازوکار تأثیر اتلاف عبوری صدا خفه‌کن‌های پیچیده در مطالعات آینده ارائه دهد.



شکل ۹ مقایسه اتلاف عبوری در سه حالت شبیه‌سازی، نظری و تجربی ( $l_2 = 0.5l$ )

## ۶- جمع‌بندی

در این پژوهش، تحلیل نظری بر روی سازوکار اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی انجام شد و رفتار صدا خفه‌کن در مهار امواج صوتی توسط شبیه‌سازی به دست آمد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی، محاسبات نظری و کار تجربی اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی مقایسه شدند.

در پایان، با بررسی نتایج اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی، نتایج زیر حاصل گردید:

(۱) اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی تابعی از فرکانس، طول محفظه انبساط، موقعیت لوله خروجی و نسبت انبساط است.

(۲) میزان اتلاف عبوری در صدا خفه‌کن‌ها رابطه‌ی مستقیمی با افت توان خروجی آن‌ها خواهد داشت. اتلاف عبوری نیز به صورت معناداری با تغییر فرکانس دست‌خوش تغییر خواهد شد. برای عملکرد بهتر صدا خفه‌کن، با اتلاف عبوری و توان خروجی بهینه، باید فرکانس بهینه‌ی صدا خفه‌کن مورد بررسی قرار گیرد.

(۳) با تغییر موقعیت خروجی صدا خفه‌کن انبساطی رایج، می‌توان با همان ساختار و ابعاد، اتلاف عبوری را به شکل چشمگیری افزایش داد.

(۴) نتایج شبیه‌سازی اتلاف عبوری صدا خفه‌کن خروجی جانبی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشت، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای تعیین سازوکار اتلاف عبوری صدا خفه‌کن‌های پیچیده در مطالعات آینده مناسب است.

## منابع

- [1] L. C. Can Wu, Jing Ni and Jing Xu, "Modeling and experimental verification of a new muffler based on the theory of quarter-wavelength tube and the Helmholtz muffler," 2016.
- [2] H.-M. S. Liang Zhang , Xiao-Hui Zeng, and Zhuo Zhuang, "Theoretical and Experimental Study on the Transmission Loss of a Side Outlet Muffler," *Shock and Vibration*, 2020.
- [3] M. S. Ujjal Kalita, "Optimization of a reactive muffler used in four-cylinder petrol engine into hybrid muffler by using CFD analysis," 2021.
- [4] Z. M. R. Wei-Hong Tan, "Analysis of exhaust muffler with micro-perforated panel," 2013.
- [5] V. C. A. Sahil S Ambavan, Mrunal R Khandebharad, Pratik A Kulkarni, "Design and Thermal Analysis of Vehicle Exhaust Muffler," 2021.
- [6] D. M. S. Ujjal Kalita, "PREDICTION OF TRANSMISSION LOSS ON A SIMPLE EXPANSION CHAMBER MUFFLER," *JETIR*, 2018.
- [7] M. P.-F. Hossein Moein, Ali Faezian, "Experimental and numerical investigation of transmission loss in a zero-flow silencer," 2024.
- [8] M. V. B. Lokireddi Venkata Venu Gopala Rao, "Muffler Design, Development and Validation Methods," 2016.