

بررسی اثر تغییر موقعیت خروجی بر اتلاف عبوری در

صداخفه‌کن‌ها

| | | |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| محمدجواد زینل‌بیک | روح‌اله حسینی* | علی زینل‌بیک |
| دانشجوی دکتری | دانشیار گروه مهندسی مکانیک | دانشجوی کارشناسی ارشد |
| گروه مهندسی مکانیک | دانشگاه جامع امام حسین(ع) | گروه مهندسی مکانیک |
| دانشگاه جامع امام حسین(ع) | | دانشگاه جامع امام حسین(ع) |
| M.Zeinalbeik@ihu.ac.ir | R.Hosseini.mech@gmail.com | Zeynalbeykali@gmail.com |

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۶/۱۸

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

چکیده

آلودگی صوتی در دستگاه‌ها، همواره از چالش‌های فراگیر در صنعت بوده است. یکی از دستگاه‌های تولیدکننده آلودگی صوتی در صنایع، موتورهای احتراق داخلی هستند. برای مهار آلودگی صوتی تولیدشده توسط این موتورها، از صداخفه‌کن‌ها^۱ استفاده می‌شود. از رایج‌ترین انواع صداخفه‌کن‌ها، صداخفه‌کن‌های انبساطی هستند. با تغییر هندسه و جابه‌جایی موقعیت لوله خروجی در صداخفه‌کن‌های انبساطی می‌توان میزان اتلاف عبوری را افزایش داد. صداخفه‌کن‌های خروجی جانبی، می‌توانند با ابعاد مشابه، اثرگذاری بیشتری در مقایسه با صداخفه‌کن‌های انبساطی رایج داشته باشند. در این پژوهش، ابتدا اتلاف عبوری برای صداخفه‌کن معمولی و صداخفه‌کن خروجی جانبی از طریق حل تحلیلی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول محاسبه گردیده و سپس این نتایج با یک کار تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و صحت‌سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن می‌توان بیشینه اتلاف عبوری را تا حداکثر ۶۰ دسی‌بل افزایش داد. همچنین مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن خروجی از وجه انتهایی صداخفه‌کن می‌توان عملکرد بهتری در بازه‌های فرکانسی بالا گزارش کرد. نتایج نشان می‌دهد صداخفه‌کن با موقعیت خروجی دورتر نسبت به وجه انتهایی، می‌تواند میزان اتلاف عبوری بیشینه را در بازه فرکانسی ۲۰۰۰-۵۰۰۰ هرتز به میزان ۱۵ دسی‌بل افزایش دهد.

واژگان کلیدی: آلودگی صوتی؛ صداخفه‌کن 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 [۱]. یکی از پرستفاده‌ترین دستگاه‌های کاهش آلودگی صوتی، صداخفه‌کن‌ها هستند [۲]. صداخفه‌کن‌ها به‌طور گسترده‌ای در صنعت

* نویسنده مسنول

برای کاهش انتقال آلودگی صوتی و لرزش استفاده می‌شوند [۳، ۴].

صداخفه‌کن‌ها به‌طور ویژه برای کاهش آلودگی‌های صوتی موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. این دستگاه‌ها علاوه بر کاهش آلودگی‌های صوتی، باید میزان افت توان مطلوبی داشته باشند [۶، ۷]. افت توان بیش از حد در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند منجر به گرادیان فشار نامساعد و پیدایش پدیده‌ی فشار برگشتی شود [۸، ۹].

تا به امروز پژوهشگران زیادی در زمینه افزایش اتلاف عبوری صداخفه‌کن‌ها مطالعه و بررسی داشته‌اند. رفیق^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۲ اثر موج‌گیر ریزحفره ناهمگن^۳ با ورودی و خروجی طویل را بر اتلاف عبوری مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از شبیه‌سازی و کار تجربی برای بررسی این اثر استفاده کرده‌اند. برای شبیه‌سازی‌ها از روش اجزا محدود و برای آزمایش‌ها از روش دو بار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با اضافه کردن موج‌گیر ریزحفره ناهمگن میزان اتلاف عبوری در فرکانس‌های پایین تا متوسط بین ۲۵ تا ۳۰ دسی‌بل افزایش می‌یابد. سپس اثر فضای خالی پشت این موج‌گیر و طول محفظه‌ی انبساط مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ی این بررسی‌ها روشن می‌کند که هر چقدر فضای پشت این موج‌گیرها کمتر باشد مقدار بیشینه‌ی اتلاف عبوری کاهش پیدا می‌کند. همچنین با کاهش طول محفظه انبساط، اتلاف عبوری به‌طور تدریجی کاهش پیدا می‌کند [۱۰].

سئونگ^۴ و همکاران توانسته‌اند با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی به کمک هوش مصنوعی طرحی برای چیدمان داخلی صداخفه‌کن را در سال ۲۰۲۴ ارائه

دهند. آن‌ها تلاش کردند جنبه‌های آکوستیکی را نیز در بهینه‌سازی توپولوژی با استفاده از الگوریتم تقویت یادگیری^۵ در نظر بگیرند. بهینه‌سازی صورت گرفته نتایج بسیار بهتری نسبت به بهینه‌سازی‌های گذشته نشان می‌دهد [۱۱].

گویت^۶ و وانی^۷ در سال ۲۰۲۴ با استفاده از بهینه‌سازی‌ها توانستند تداخل امواج صوتی در صداخفه‌کن خودرو را حذف کنند. بهینه‌سازی‌ها با هدف بیشینه کردن اتلاف عبوری صداخفه‌کن به انجام رسیده است. به این منظور، قطر ورودی، خروجی و محفظه انبساط صدا خفه‌کن و طول محفظه انبساط صداخفه‌کن به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. الگوریتم ژنتیک برای بیشینه‌سازی اتلاف عبوری محاسبه شده به کمک کامپیوتر^۸ در بازه‌ی تغییر ۱۵- تا ۱۵+ درصدی نسبت به ابعاد اصلی استفاده شده است. نتایج بهینه‌سازی، افزایش ۱۰/۲۴ درصدی در اتلاف عبوری را نشان می‌دهد [۱۲].

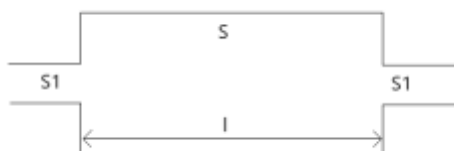
در این پژوهش، تاثیر تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن بر اتلاف عبوری آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای محاسبه اتلاف عبوری صداخفه‌کن، از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. در ادامه نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های انجام شده توسط ژانگ^۹ و همکاران، تطبیق داده شده است [۴]. در آزمایش‌های تجربی، اتلاف عبوری صداخفه‌کن با استفاده از روش بارگذاری با دو بار و تغییر شرایط مرزی در انتهای لوله امپدانس به دست می‌آید [۴، ۱۳، ۱۴].

۲. بررسی و تحلیل نظری اتلاف عبوری در صداخفه‌کن با خروجی جانبی

۳. اتلاف عبوری در صداخفه‌کن‌های

انبساطی

صداخفه‌کن‌های انبساطی از یک لوله‌ی ورودی، یک لوله‌ی خروجی و یک محفظه انبساط تشکیل می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، لوله‌های ورودی و خروجی در دو طرف محفظه و بر روی یک محور قرار گرفته‌اند [۱۸]. امواج صوتی با ورود به محفظه انبساط، دچار کاهش افت فشار می‌شوند [۴، ۱۹].



شکل ۱. ساختار صداخفه‌کن معمولی

برای صداخفه‌کن 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 و ساده‌سازی، اتلاف عبوری صداخفه‌کن انبساطی به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود. برای جایگذاری، مولفه‌های ماتریس T باید به جای مولفه‌های α ، β ، ζ و η در رابطه ۲ قرار گیرند.

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

در روش نظری، با استفاده از ماتریس انتقال، پارامترهای چهارگانه صداخفه‌کن محاسبه شده و سپس رابطه محاسبه اتلاف عبوری بر حسب موقعیت مکانی خروجی صداخفه‌کن استخراج می‌شود [۱۵].

• روش محاسبه تلفات عبوری

در این بخش تلاش می‌شود تا اتلاف عبوری به شکل رابطه‌ای بر حسب پارامترهای چهارقطبی بیان شود [۱۶].

رابطه (۱) ماتریس پارامترهای چهارقطبی را به عنوان بخشی از یک معادله ماتریسی نشان می‌دهد [۴، ۱۷].

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

که p_1 و p_2 فشار صدا در ورودی و خروجی صداخفه‌کن را نشان می‌دهند. به طور مشابه v_1 و v_2 نیز بیانگر سرعت ارتعاش در ورودی و خروجی صداخفه‌کن هستند. اگر دما و سطح مقطع ورودی و خروجی صداخفه‌کن برابر باشند، میزان اتلاف عبوری صداخفه‌کن 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. در رابطه ۲، پارامترهای α و β به ترتیب نسبت فشار در ورودی به فشار و سرعت ارتعاش در خروجی است. همچنین پارامترهای ζ و η به ترتیب نسبت سرعت ارتعاش در ورودی به فشار و سرعت ارتعاش در خروجی است.

رابطه ۵ ماتریس انتقال صداخفه‌کن خروجی جانبی را نشان می‌دهد که در آن $l_1 = l - l_2$ می‌باشد. این مولفه‌های ابعادی در جدول ۱ تعریف شده‌اند [۴, ۱۹].

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

با جایگذاری رابطه ۵ در رابطه ۲ می‌توان اتلاف عبوری در صداخفه‌کن خروجی جانبی را به دست آورد. اتلاف عبوری این صداخفه‌کن در رابطه ۶ نشان داده شده است [۴].

که $\gamma = \frac{S}{S_1}$ نسبت انبساط صداخفه‌کن را نشان می‌دهد. اتلاف عبوری صداخفه‌کن انبساطی تابعی از فرکانس، طول محفظه و نسبت انبساط صداخفه‌کن است. اتلاف عبوری صداخفه‌کن‌های انبساطی متداول دارای یک بازه فرکانس عبور است که در آن، اتلاف عبوری برابر با صفر است [۲۰, ۲۱]. در این پژوهش، یک صداخفه‌کن با خروجی جانبی برای بهبود عملکرد خفه‌کن‌های انبساطی مورد بررسی قرار گرفته است [۴, ۱۹].

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

۴. اتلاف عبوری صداخفه‌کن با خروجی جانبی

اتلاف عبوری صداخفه‌کن جانبی تابعی از فرکانس، طول محفظه انبساط، موقعیت مکانی خروجی و نسبت انبساط است [۲۲, ۲۳].

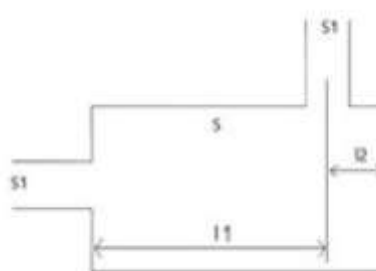
جانبی

در بخش بعدی به توصیف مولفه‌های ابعادی صداخفه‌کن خروجی جانبی پرداخته می‌شود. جدول ۱ ابعاد صداخفه‌کن خروجی جانبی را نشان می‌دهد.

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

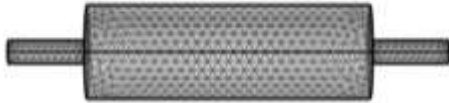
جدول ۱. ابعاد صداخفه‌کن خروجی جانبی

| مقدار (میلی‌متر) | 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) |

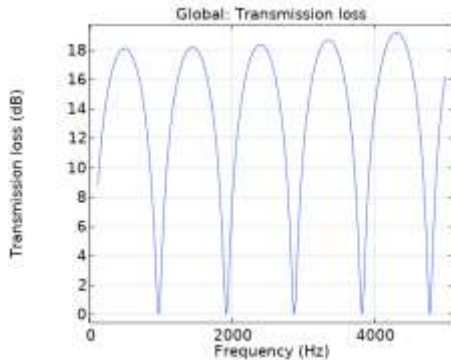


شکل ۲. ساختار صداخفه‌کن خروجی جانبی

| | | |
|----|-----|--------------------------------|
| ۶۰ | D | قطر محفظه انبساط (میلی‌متر) |
|----|-----|--------------------------------|

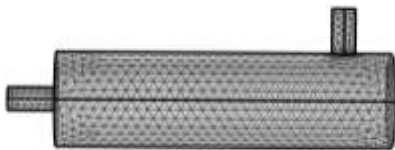


شکل ۳. شبکه‌بندی صداخفه‌کن معمولی در نرم‌افزار کامسول



شکل ۴. نمودار اتلاف عبوری برای صداخفه‌کن معمولی

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



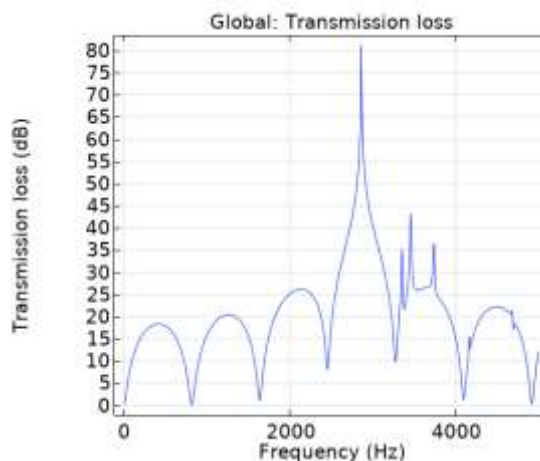
شکل ۵. شبکه‌بندی صداخفه‌کن خروجی جانبی در نرم‌افزار کامسول

۵. شبیه‌سازی و مقایسه اتلاف عبوری در صداخفه‌کن معمولی و خروجی جانبی

با استفاده از نرم‌افزار کامسول، میزان اتلاف عبوری در صداخفه‌کن معمولی و صداخفه‌کن خروجی جانبی بررسی و در نهایت نتایج این شبیه‌سازی با نتایج محاسبات نظری و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌است. با استفاده از شکل ۱ و داده‌های جدول ۱، هندسه‌ی صداخفه‌کن معمولی در محیط نرم‌افزار کامسول ایجاد شده‌است. شکل ۳، نمایی از شبکه‌بندی صداخفه‌کن معمولی را نشان می‌دهد. برای شبکه‌بندی صداخفه‌کن از شبکه نوع تتراهدرال آزاد^{۱۰} استفاده شده‌است. علت استفاده از این شبکه، تطبیق‌پذیری بالای آن با هندسه‌های پیچیده و دارای انحنا است. همچنین در راستای تعداد شبکه‌ها بررسی صورت پذیرفته است. تعداد شبکه‌ها در نمونه نهایی به‌صورتی است که نتایج شبیه‌سازی مستقل از شبکه‌بندی خواهد بود.

مسئله، تحت مطالعه‌ی فرکانسی در بازه فرکانس ۵۰۰-۱۰۰۰ حل شده‌است. در شکل ۴ تصویری از نمودار اتلاف عبوری صداخفه‌کن معمولی مشاهده می‌شود.

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



شکل ۶. اتلاف عبوری صداخفه‌کن خروجی جانبی

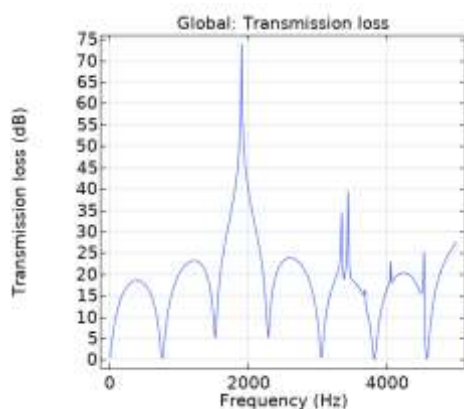
با مقایسه شکل ۴ و شکل ۶، بهبود عملکرد صداخفه‌کن خروجی جانبی، نسبت به صداخفه‌کن معمولی در اتلاف عبوری قابل مشاهده است. به‌طور تقریبی در تمام بازه‌های فرکانسی، اتلاف عبوری بهبود پیدا کرده است. این بهبود عملکرد، در بازه‌ی فرکانسی ۲۰۰۰-۵۰۰۰ هرتز با شدت بیشتری رخ می‌دهد. با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن می‌توان بیشینه اتلاف عبوری را با ساختار و ابعاد کلی یکسان، به‌طور تقریبی ۶۰ دسی‌بل افزایش داد.

۶. صحت‌سنجی

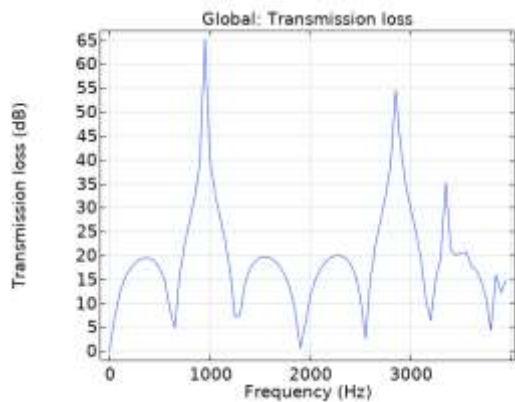
برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل، از کار تجربی و نظری آقای ژانگ و همکاران استفاده شده است. اتلاف عبوری صداخفه‌کن خروجی جانبی با استفاده از لوله امپدانس در یک آزمایش تجربی، محاسبه و صحت‌سنجی می‌شود [۴].

- تطبیق نتایج شبیه‌سازی با نتایج نظری و تجربی

در این مطالعه، دو صداخفه‌کن خروجی جانبی با استفاده از پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ طراحی شده‌اند. فاصله بین محور خروجی و سمت انتهایی صداخفه‌کن (l_2) به ترتیب ۴۵ میلی‌متر و ۹۰ میلی‌متر است. از لوله امپدانس برای اندازه‌گیری اتلاف عبوری دو صداخفه‌کن استفاده می‌شود [۴، ۲۴]. شکل ۷، نتایج شبیه‌سازی با فاصله‌ی ۴۵ میلی‌متری بین محور لوله‌ی خروجی و انتهایی صداخفه‌کن 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، آرمانی‌بودن شرایط مرزی در شبیه‌سازی است. همچنین انتشار امواج صوتی جذب‌نشده در انتهای صداخفه‌کن در محیط آزمایش نیز می‌تواند خطای بزرگی را ایجاد کند [۲۵].



شکل ۷. نمودار اتلاف عبوری به‌دست آمده از شبیه‌سازی ($l_2 = 0.25l$)



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

جدول ۳. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج مرجع [۴]

$$(l_2 = 0.5l)$$

| درصد خطای شبیه سازی به نظری | درصد خطای شبیه سازی به تجربی | اتلاف عبوری شبیه سازی (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 صداخفه‌کن، آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، اگر چه نتایج شبیه‌سازی کمی با نتایج تجربی و نظری متفاوت است،

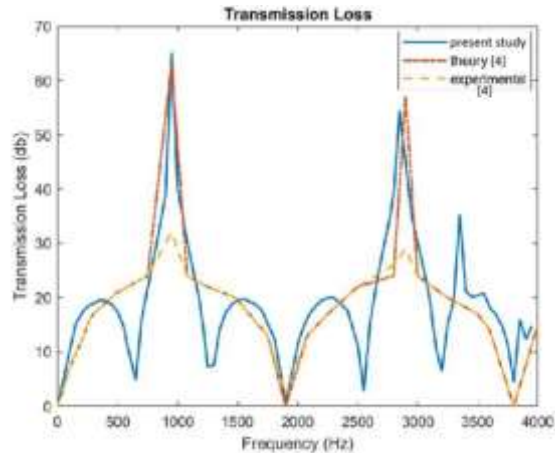
جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی با نتایج مرجع [۴]

$$(l_2 = 0.25l)$$

| درصد خطای شبیه سازی به نظری | درصد خطای شبیه سازی به تجربی | اتلاف عبوری شبیه سازی (dB) | اتلاف عبوری نظری (dB) | اتلاف عبوری تجربی (dB) | فرکانس (Hz) |
|--|---|--|--------------------------------|---------------------------------|----------------|
| ۰ | ۰ | ۱۸ | ۱۸ | ۱۸ | ۵۰۰ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰۰ |
| ۴ | ۶/۷ | 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 صداخفه‌کن نشان داده شده‌است. اولین پیک اتلاف عبوری صداخفه‌کن 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 شده‌است. بیشترین درصد خطا، مانند مقایسه قبل، در پیک اتلاف عبوری مشاهده می‌شود. دلایل این خطا، در مقایسه‌ی قبلی توضیح داده شده‌است. با بررسی درصد خطاها مشخص می‌شود که نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتایج کار تجربی و نظری دارند.

اما تطابق نتایج به صورت کلی مطلوب است و می‌تواند اطلاعات قابل اعتمادی را برای تعیین سازوکار تأثیر اتلاف عبوری صداخفه‌کن‌های پیچیده در مطالعات آینده ارائه دهد.



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

۷. جمع‌بندی

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

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

- (۱) اتلاف عبوری صداخفه‌کن خروجی جانبی تابعی از فرکانس، طول محفظه انبساط، موقعیت لوله خروجی و نسبت انبساط است.
- (۲) با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن انبساطی رایج، می‌توان با همان ساختار و ابعاد، اتلاف عبوری را به شکل چشمگیری افزایش داد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن می‌توان بیشینه اتلاف عبوری را تا حداکثر ۶۰ دسی‌بل افزایش داد.
- (۳) با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن، میزان فرکانس‌هایی با اتلاف عبوری صفر کاهش پیدا خواهد کرد. در این پژوهش با تغییر موقعیت خروجی صداخفه‌کن تعداد فرکانس‌های گذار از ۵ (۱۰۰۰، ۱۹۵۰، ۲۹۵۰، ۳۹۵۰ و ۴۹۰۰ هرتز) به ۲ (۰ و ۱۹۵۰ هرتز) کاهش پیدا کرده است.
- (۴) برای بهره‌گیری از عملکرد بهتر در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز، باید موقعیت خروجی از وجه انتهایی صداخفه‌کن فاصله بگیرد. در نتایج نمودارها مشاهده می‌شود که با دو برابر کردن فاصله موقعیت خروجی از وجه انتهایی، میزان اتلاف عبوری بیشینه به مقدار ۱۵ دسی‌بل افزایش پیدا کرده است.
- (۵) نتایج شبیه‌سازی اتلاف عبوری صداخفه‌کن خروجی جانبی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشت، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای تعیین سازوکار اتلاف عبوری صداخفه‌کن‌های پیچیده در مطالعات آینده مناسب است

منابع

- [1] Kalita, Ujjal, and Manpreet Singh. "Acoustic performance analysis of muffler by varying sound absorption materials." *Materials Today: Proceedings* (2023).
- [2] Huang, Peiyan, Pei Wu, He Su, Jing Xue, Haijun Zhang, Yongan Zhang, and Yuchen Guo. "Research on the Acoustic Attenuation Performance and Optimization of Split-Stream Rushing

- Exhaust Mufflers in the Presence of Acoustic–Structure Coupling Effects." *Applied Sciences* 15, no. 9 (2025): 4722.
- [3] Wu, Can, Lei Chen, 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." *SpringerPlus* 5, no. 1 (2016): 1366.
- [4] Zhang, Liang, He-Mu Shi, Xiao-Hui Zeng, and Zhuo Zhuang. "Theoretical and experimental study on the transmission loss of a side outlet muffler." *Shock and Vibration* 2020, no. 1 (2020): 6927574.
- [5] Chivate, Shubham, Pravin Hujare, Rajesh Askhedkar, Deepak Hujare, and Satish Chinchankar. "A review on acoustic performance analysis of reactive muffler." *Materials Today: Proceedings* 63 (2022): 613-622.
- [6] Sedighi, "The effect of muffler design on reducing the noise pollution," 2024.
- [7] Labao, Kai, Nicholas Middleton, and John Nuskowski. *Design of a Reactive-Style Muffler for a Formula SAE Race Car*. No. 2025-01-0024. SAE Technical Paper, 2025.
- [8] Othman, Nor'Azizi, and Nurul Ashmira Abdul Rahman. "The Effects of Acoustic Absorbing Materials in Noise Reduction of Exhaust Muffler System." *Journal of Advanced Research Design* 76, no. 1 (2021): 1-13.
- [9] Pratama, Muhammad Yandi, Prihanto Trihutomo, and Suprayitno Suprayitno. "Muffler Design for Noise Reduction and Pressure Loss Optimization Using Multiobjective Genetic Algorithm." *Engineering Innovations* 11 (2024): 63-68.
- [10] Rafique, Faisal, Jiu Hui Wu, Chong Rui Liu, and Fuyin Ma. "Transmission Loss analysis of a simple expansion chamber muffler with extended inlet and outlet combined with inhomogeneous micro-perforated panel (iMPP)." *Applied Acoustics* 194 (2022): 108808.
- [11] Oh, Kee Seung, Hayoung Chung, and Joo Hwan Oh. "Topology Optimization Using Reinforcement Learning for Designing the Inside Layout of a Muffler." *Available at SSRN* 4953398 (2024).
- [12] Gavit, Riziyamaalisa, and Kiran Wani. "Muffler transmission loss optimization for a vehicle using genetic algorithm." In *Smart Sensors Measurement and Instrumentation: Select Proceedings of CISCON 2021*, pp. 1-17. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.
- [13] Tan, Wei-Hong, and Zaidi Mohd Ripin. "Analysis of exhaust muffler with micro-perforated panel." *Journal of Vibroengineering* 15, no. 2 (2013): 558-573.
- [14] Ambavane, Sahil S., Vinayak C. Achari, Mrunal R. Khandebharad, and Pratik A. Kulkarni. "Design and thermal analysis of vehicle exhaust muffler." *IRJET* 8, no. 12 (2021): 19-25.
- [15] Bugaru, Mihai, and Cosmin-Marius Vasile. "Recent Developments in Using a Modified Transfer Matrix Method for an Automotive Exhaust Muffler Design Based on Computation Fluid Dynamics in 3D." *Computation* 12, no. 4 (2024): 73.
- [16] Munjal, M. L., and K. M. Kumar. "State of the art of rational design of efficient mufflers." *Noise Control Engineering Journal* 71, no. 3 (2023): 169-179.
- [17] Kalita, Ujjal, and Manpreet Singh. "Prediction of transmission loss on a simple expansion chamber muffler." *J. Emerg. Technol. Innov. Res* 5 (2018): 1022-1031.

- [18] Yimer, Ali Mohammed, and Ramesh Babu Nallamothe. "Reduction of the noise from the engine, modification of reactive muffler and performance analysis." *Discover Applied Sciences* 7, no. 8 (2025): 849.
- [19] Kalita, Ujjal, and Manpreet Singh. "Optimization of a reactive muffler used in four-cylinder petrol engine into hybrid muffler by using CFD analysis." *Materials Today: Proceedings* 50 (2022): 1936-1945.
- [20] Hu, Zhongxun, Lilv Pang, Linling Zhou, Peng Li, and Jun Lu. "Design of Noise Reduction Structure of Porous Muffler Based on Ant Colony Algorithm." In *International Conference on Innovative Computing*, pp. 1-9. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.
- [21] Saadabadi, Mehran, Mahdieh Samimi, and Hassan Hosseinlaghab. "Organized Computational Measurement to Design a High-Performance Muffler." *Metrology* 3, no. 3 (2023): 254-279.
- [22] Faizen, M., S. Ameen, A. Pandey, and D. S. Das. "Review of Muffler Performance by changing design parameters." *International Journal of Research and Analytical Reviews* 6, no. 2 (2019): 2349-5138.
- [23] Pratama, Muhammad Yandi. "Multiobjective Optimization of Three-Pass Perforated Muffler Design for Improved Acoustic Performance and Reduced Fluid Pressure Drop Using Genetic Algorithms." *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering* 22, no. 1 (2025).
- [24] Rao, P. Chinna, B. Madhava Varma, and L. V. V. G. Rao. "Muffler design, development and validation methods." *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol* 5 (2016): 8626-8639.
- [25] Moein, Hossein, Mohammad Passandideh Fard, and Ali Faezian. "Experimental and numerical investigation of transmission loss in a zero-flow silencer." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 56, no. 3 (2024): 411-438.

پی نوشت

¹ Muffler

² Rafique

³ Inhomogeneous Micro-Perforated Panel (IMPP)

⁴ Seung

⁵ Reinforcement Learning Algorithm

⁶ Gavit

⁷ Wani

⁸ Computer Aided Engineering (CAE)

⁹ Zhang

¹⁰ Free Tetrahedral