



توسعه سامانه سنجش اُفت انتقال صدای صداخفه کن و صحه گذاری آن برای اندازه گیری عملکرد صداخفه کن

یعقوب عباس زاده^{۱*}، محسن غفاری^۲، هادی محمدی بیدهندی^۳، مهدی گریوانی^۴، وحید فخاری^۵

^۱ کارشناس واحد محاسبات مهندسی شرکت ایپکو، تهران، ایران، Y_abbaszadeh@ip-co.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، Ghaffari.mohsen@email.kntu.ac.ir

^۳ کارشناس واحد محاسبات مهندسی شرکت ایپکو، تهران، ایران، H_Mohammadi@ip-co.com

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران، Gari65amg@gmail.com

^۵ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، v_fakhari@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۳ آذر ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

صداخفه کن خروجی

افت انتقال صدا

دستگاه آزمون افت انتقال صدا

صداخفه کن یک قطعه از سامانه خروجی خودرو می باشد که با جذب و یا پس زنی امواج صوتی باعث کاهش صدای خروجی می شوند. یکی از مهم ترین عوامل بیان کننده عملکرد یک صدا خفه کن، مقدار اثر تضعیفی ای است که بر موج ورودی خود دارد؛ این متغیر با افت انتقال صدا شناخته می شود. یکی از روش های بدست آوردن مقدار این متغیر روش آزمون استاندارد چهار- میکروفون است که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق برای اندازه گیری میزان افت انتقال صدا دستگاه آزمون ساخته شد. برای صحه گذاری عملکرد دستگاه آزمون و نتایج آن، با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار جی تی پاور^۱ و محاسبات نظری میزان افت انتقال صدا برای یک نمونه واقعی محاسبه شده است. از دستگاه آزمون افت انتقال صدا می توان برای ارزیابی عملکرد صداخفه کن های مورد استفاده در خودرو و صنایع دیگر استفاده کرد. بطور کلی هدف اصلی از این تحقیق ساخت دستگاه آزمون افت انتقال صدا و توسعه کد محاسباتی مربوط به آن و صحه گذاری عملکرد دستگاه آزمون است.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

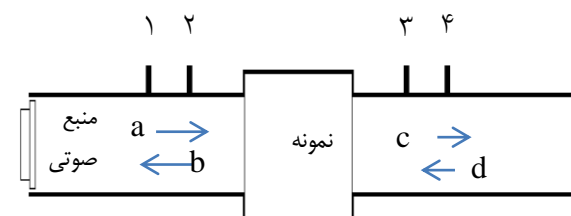
در این مقاله به پیاده‌سازی روش چهار-میکروفون^۵ و ساخت دستگاه آزمون متناسب با آن پرداخته می‌شود. به منظور صحت‌سنجی عملکرد دستگاه آزمون، آزمایش برای یک نمونه پیچیده انجام و سپس نتایج آزمون با نتایج عددی مقایسه شده است. با حصول اطمینان از عملکرد صحیح دستگاه آزمون، می‌توان آن را در راه بهبود طراحی انواع صداخفه‌کن‌ها و همچنین خواص صوتی مواد، به کار گرفت.

صدای مزاحم ناشی از کارکرد خودرو یکی از متغیرهای نشان دهنده کیفیت خودرو و آسایشی است که برای سرنشینان و محیط اطراف فراهم می‌آورد. در میان سایر قطعات و سامانه‌های خودروهای با موتور احتراقی، موتور، مبدل‌ها، میل‌گردان و ... سامانه خروجی دود^۱ با داشتن سهم ۳۲ درصد دارای نقش مهمی در صدای خودرو است [۱-۲].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- اندازه‌گیری افت انتقال

افت انتقال عبارت است از نسبت توان موج ورودی به موج انتقالی از عنصر صوتی با واحد دسی‌بل. از آنجا که موج اندازه‌گیری شده توسط میکروفون‌ها در جریان‌های بالا دست و پایین دست، از برهم نه موج رفت و موجی که پس از برخورد با عنصر صوتی بازتاب می‌شود، به وجود می‌آید (شکل ۱)؛ لذا نمی‌توان به صورت مستقیم از اندازه‌های ثبت شده توسط میکروفون‌ها استفاده کرد.



شکل ۱: نمای فنی دستگاه آزمون و چیدمان میکروفون‌ها

امواج رفت و برگشت در بالادست و پایین دست را می‌توان به صورت مختلط با معادلات ۱ تا ۴ نمایش داد. و برنک نحوه نوشتن امواج صوتی را شرح داده‌اند [۶]:

$$P_A = A e^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

$$P_B = B e^{j(\omega t + kx)} \quad (2)$$

$$P_C = C e^{j(\omega t - kx)} \quad (3)$$

$$P_D = D e^{j(\omega t + kx)} \quad (4)$$

که k عدد موج، ω بسامد موج و A ، B ، C و D دامنه‌های مختلط امواج داخل دستگاه هستند. P_A و P_B به ترتیب فشار موج رفت و برگشت در جریان بالا دست و P_C و P_D فشار موج رفت و برگشت در جریان پایین دست هستند.

به این ترتیب با به کارگیری معادلات بالا و خاصیت برهم‌نهی، برای تغییرات فشار در جریان بالا دست و پایین معادلات زیر بدست می‌آید:

$$P_{up} = A e^{j(\omega t - kx)} + B e^{j(\omega t + kx)} \quad (5)$$

$$P_{down} = C e^{j(\omega t - kx)} + D e^{j(\omega t + kx)} \quad (6)$$

به همین دلیل ساخت مجموعه‌ای برای کاهش صدای آن، تأثیر بسزایی بر کاهش مزاحمت ایجاد شده توسط صدای خودرو دارد. در همین راستا از جزئی به نام صداخفه‌کن^۲ استفاده می‌شود. صداخفه‌کن با جذب و یا پس زنی امواج صوتی باعث تضعیف آنها می‌شود. به منظور ارائه طرحی بهینه برای ساخت صداخفه‌کن، نیاز است تا از معیاری برای مقایسه عملکرد آنها استفاده شود.

متغیرهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد یک صداخفه‌کن وجود دارد. یکی از این متغیرها میزان تضعیف امواج صدا پس از گذر از صداخفه‌کن است که به افت انتقال (افت انتقال)^۳ معروف است. افت انتقال تفاوت میان تراز توان موج صدای ورودی و خروجی است. این متغیر به هندسه و مواد به کار رفته در صداخفه‌کن وابسته است و برای هر صداخفه‌کن به صورت تابعی از بسامد صدای ورودی بیان می‌شود. افت انتقال به دامنه و زاویه موج ورودی نیز وابستگی ندارد.

محاسبه افت انتقال به صورت تحلیلی برای محفظه‌هایی با هندسه ساده امکان‌پذیر است. در صورت پیچیده بودن هندسه از روش جزء مرزی^۴ و یا روش‌های آزمایشگاه استفاده می‌شود. مشخص است که استفاده از روش‌های شبیه‌سازی نسبت به ساخت نمونه‌های واقعی صرف بسیار بیشتری در هزینه و زمان دارد؛ اما به دلیل اهمیت عملکرد طرح نهایی در واقعیت و شرایط محیطی مشابه با شرایط کاری، روش‌های آزمایشگاه نیاز است تا از صحت عملکرد مطابق با شبیه‌سازی اطمینان حاصل شود.

مطالعات متعددی در زمینه‌ی ارزیابی خواص صوتی مواد صورت گرفته است. در سال ۱۹۷۹، چانگ و بلیزر [۳] روش ماتریس انتقال را برای اندازه‌گیری خواص صوتی ارائه کردند. طی سال‌ها روش‌های دیگری به منظور بدست آوردن دقیق‌تر و راحت‌تر خواص صوتی ارائه شده‌اند. در ۱۹۸۳، به علت عدم امکان برقرار شدن کامل فرضیات نظری در عمل، لانگ و دوی [۴] از روش دو بارگذاری برای بدست آوردن خواص صوتی استفاده کردند و در ۱۹۹۰، مونجال و دویگ [۵] از روش دو منبع در همین راستا با دلایل مشابه استفاده کردند.

1 Exhaust

2 Muffler

3 Transmission Loss (TL)

4 Boundary Element Method

5 Four-mic method

در معادله ۱۷، P و V ، فشار و سرعت جریان در عنصر صوتی هستند و زیر نویس ۱ و ۲ بیانگر جایگاهشان نسبت به عنصر صوتی است. با داشتن درایه‌های ماتریس انتقال، افت انتقال به صورت رابطه ۱۸ به دست می‌آید [۷]:

$$TL = 10 \log \left(\frac{T_{11} + \frac{T_{21}}{\rho c} + T_{22} + T_{12} \rho c}{4} \right) \quad (18)$$

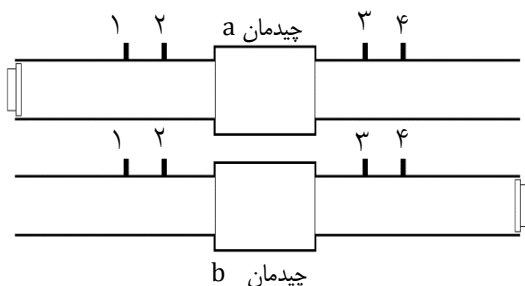
ماتریس انتقال (رابطه ۱۷) برای نمونه آزمون چهار-میکروفون عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

در معادله ۱۹ دو معادله و چهار مجهول وجود دارد. برای بدست آوردن مجهول‌ها که همان متغیرهای ماتریس انتقال است؛ لازم است تا آزمایش در دو حالت متفاوت انجام شود. این دو حالت متفاوت اغلب با روشهای دو منبع و دو بارگذاری ایجاد می‌شود.

۲-۲-۱- روش دو منبع

در این روش، مطابق چیدمان نشان داده شده در شکل، آزمایش در دو حالت منبع صوتی در ابتدا و انتها انجام می‌شود.



شکل ۳: نمایی از چیدمان روش دو منبع

به این ترتیب برای چیدمان a ماتریس انتقال عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} P_{a0} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{a1} \\ V_{a1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

و ماتریس انتقال برای چیدمان b عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} P_{b1} \\ V_{b1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & -T_{12} \\ -T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{b0} \\ V_{b0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

به این ترتیب چهار معادله و چهار مجهول بدست می‌آید که با حل آنها متغیرهای ماتریس انتقال محاسبه می‌شود.

۲-۲-۲- روش دو بارگذاری

در این روش مطابق شکل، آزمایش برای دو بارگذاری متفاوت انجام می‌شود.

واضح است که نزدیک بودن بارگذاری‌ها به یکدیگر می‌تواند منجر به عدم یکتایی^۲ پاسخ‌ها شود. در این تحقیق برای به وجود آوردن دو بارگذاری متفاوت، آزمایش در دو حالت انتها باز و انتها بسته انجام

در معادلات ۵ تا ۸، P_{up} و P_{down} و V_{up} و V_{down} به ترتیب فشار در جریان بالا دست و پایین دست و سرعت در جریان بالا دست و پایین دست هستند. همچنین ρ و c به ترتیب جرم حجمی و سرعت صوت در جریان داخل دستگاه آزمون هستند.

سرعت ذرات نیز با در نظر گرفتن جهت خلاف امواج بازتاب شده به صورت معادلات ۷ و ۸ نشان داده می‌شود:

$$V_{up} = \frac{A e^{j(\omega t - kx)} - B e^{j(\omega t + kx)}}{\rho c} \quad (7)$$

$$V_{down} = \frac{C e^{j(\omega t - kx)} - D e^{j(\omega t + kx)}}{\rho c} \quad (8)$$

برای بدست آوردن دامنه‌ها از فشار ثبت شده توسط میکروفون‌ها استفاده می‌شود:

$$P_1 = A e^{j(\omega t - kx_1)} + B e^{j(\omega t + kx_1)} \quad (9)$$

$$P_2 = A e^{j(\omega t - kx_2)} + B e^{j(\omega t + kx_2)} \quad (10)$$

$$P_3 = C e^{j(\omega t - kx_3)} + D e^{j(\omega t + kx_3)} \quad (11)$$

$$P_4 = C e^{j(\omega t - kx_4)} + D e^{j(\omega t + kx_4)} \quad (12)$$

با حل معادلات ۹ تا ۱۲، دامنه‌ها به صورت زیر در معادلات ۱۳ تا ۱۶ بدست می‌آیند:

$$A = \frac{j(P_1 e^{jkx_2} - P_2 e^{jkx_1})}{2 \sin k(x_1 - x_2)} \quad (13)$$

$$B = \frac{j(P_2 e^{-jkx_1} - P_1 e^{-jkx_2})}{2 \sin k(x_1 - x_2)} \quad (14)$$

$$C = \frac{j(P_3 e^{jkx_4} - P_4 e^{jkx_3})}{2 \sin k(x_3 - x_4)} \quad (15)$$

$$D = \frac{j(P_4 e^{-jkx_3} - P_3 e^{-jkx_4})}{2 \sin k(x_3 - x_4)} \quad (16)$$

۲-۲-۲- ماتریس انتقال

عنصر صوتی نشان داده شده در شکل را می‌توان به صورت ماتریسی ۲×۲ شبیه‌سازی کرد که فشار و سرعت جریان را در قبل و بعد از عنصر به یکدیگر مرتبط می‌سازد که به ماتریس انتقال^۱ موسوم است.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$



شکل ۲: نمای فنی یک عنصر صوتی

² Un-singularity

¹ Transfer Matrix

$$T_{12} = \frac{1}{P_{ai}V_{bi} - P_{bi}V_{ai}} (P_{a0}P_{bi} - P_{b0}P_{ai}) \quad (33)$$

$$T_{21} = \frac{1}{P_{ai}V_{bi} - P_{bi}V_{ai}} (V_{a0}V_{bi} - V_{b0}V_{ai}) \quad (34)$$

$$T_{22} = \frac{1}{P_{ai}V_{bi} - P_{bi}V_{ai}} (P_{bi}V_{a0} - P_{ai}V_{b0}) \quad (35)$$

در نهایت افت انتقال از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود.

۲-۳- مشخصات آزمایش

در شکل نمایی از دستگاه آزمون به همراه نمونه مورد آزمایش نشان داده شده است. برای اتصال لوله‌ها به نمونه، ضروری است که از فلنج استفاده شود. به منظور جلوگیری از نشت صدا و تضعیف توان امواج، محل‌های اتصال با واشر و پشم شیشه عایق و آب‌بندی شده‌اند. منبع صوتی از یک بلندگوی ۳ اینچ، ۱۰ وات و ۴ اهم به همراه تقویت کننده^۲ تشکیل شده است، که در لوله نویز سفید پخش می‌کند.

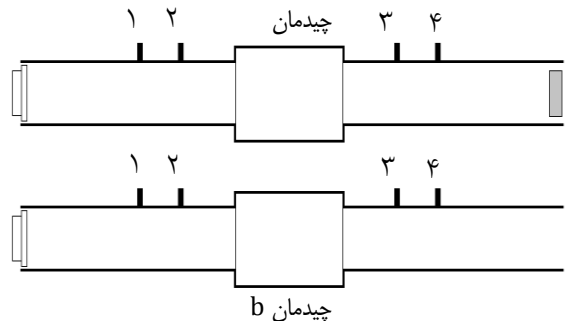


شکل ۵: نمایی از دستگاه آزمون

- رعایت موارد زیر در رسیدن به جواب بهتر و خطای کمتر کمک می‌کند [۸]:
- مقطع لوله‌ها باید دایروی و یا مستطیلی باشد و در طول لوله به صورت ثابت پیش رود. لوله باید بدون خمیدگی باشد. سطح لوله صاف و تمیز و عاری از گرد و غبار و جداره لوله به اندازه کافی ضخیم باشد تا تضعیف امواج به حداقل برسد. از پایه‌های مناسب برای تضعیف ارتعاشات خارجی وارد بر لوله‌ها استفاده شود.
 - کمترین بسامد کاری به فاصله میکروفون‌ها از یکدیگر بستگی دارد و این فاصله باید از یک درصد طول موج مربوط به کمترین بسامد بیشتر باشد.
 - به منظور نزدیک شدن انتشار موج به حالت یک بعدی شرط زیر برقرار باشد (برای لوله دایروی):

$$f_u < \frac{0.586c}{d} \quad (36)$$

می‌شود. در حالت انتها بسته تلاش بر این است که یک انتهای غیر بازتابی ایجاد شود. مطابق استاندارد (2009) ASTM E2611 این حالت را می‌توان به وسیله یک ماده جاذب صدا مانند پشم شیشه^۱ به طول تقریبی ۳۰ سانتی‌متر ایجاد کرد [۸].



شکل ۴: نمایی از چیدمان روش دو بارگذاری

در این روش آزمایش مطابق شکل، در دو چیدمان a و b انجام می‌شود. به این ترتیب معادلات زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} P_{a0} \\ V_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ai} \\ V_{ai} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} P_{b0} \\ V_{b0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{bi} \\ V_{bi} \end{bmatrix} \quad (23)$$

در معادلات ۲۲ و ۲۳، فشار و سرعت جریان برای دو بارگذاری، از معادلات بدست آمده برای فشار و سرعت در جریان بالا دست و پایین دست (معادلات ۵-۸)، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P_{a0} = A_a + B_a \quad (24)$$

$$P_{ai} = C_a e^{-jkl} + D_a e^{jkl} \quad (25)$$

$$V_{a0} = \frac{A_a - B_a}{\rho c} \quad (26)$$

$$V_{ai} = \frac{C_a e^{-jkl} - D_a e^{jkl}}{\rho c} \quad (27)$$

$$P_{b0} = A_b + B_b \quad (28)$$

$$P_{bi} = C_b e^{-jkl} + D_b e^{jkl} \quad (29)$$

$$V_{b0} = \frac{A_b - B_b}{\rho c} \quad (30)$$

$$V_{bi} = \frac{C_b e^{-jkl} - D_b e^{jkl}}{\rho c} \quad (31)$$

به این ترتیب متغیرهای ماتریس انتقال به صورت معادلات ۳۲ تا ۳۵ بدست می‌آید:

$$T_{11} = \frac{1}{P_{ai}V_{bi} - P_{bi}V_{ai}} (P_{a0}V_{bi} - P_{b0}V_{ai}) \quad (32)$$

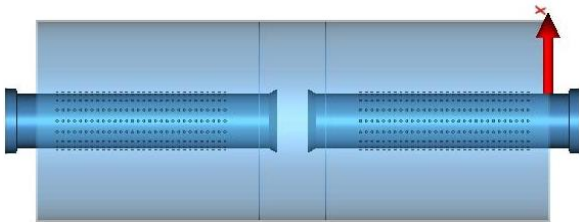
² Amplifier

¹ Fiber glass

در شکل نمایی از شبیه‌سازی ساخته شده از صداخفه‌کن در نرم‌افزار جم‌سیدی^۳ آورده شده است. شبیه‌سازی ساخته شده از اجزای زیر تشکیل شده است:

- پوسته^۴ با سطح مقطع بیضوی با قطرهای ۱۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲ میلی‌متر
- لوله‌های ورودی و خروجی با قطر ۴۶ میلی‌متر و طول ۲۲۳ میلی‌متر با ۴۸۰ روزنه با قطر ۲ میلی‌متر که در ابتدا و انتها به قطر ۵۵ میلی‌متر افزایش می‌یابند.
- دو سپرک^۵ با فاصله ۱۹۶ میلی‌متر از ابتدا و انتهای پوسته و با ضخامت ۱ میلی‌متر

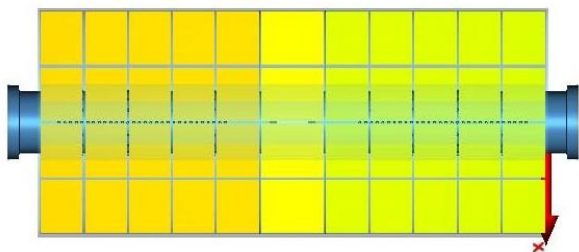
از آنجا که سیال محیط آزمایش هوا است، متناسب با آن مخلوط هوا به عنوان سیال محبوس در صداخفه‌کن در نظر گرفته می‌شود (دمای شبیه‌سازی نیز به دلیل مشابه تعیین می‌گردد). با توجه به هدف نهایی استفاده از دستگاه آزمون، که ارزیابی صداخفه‌کن سامانه خروجی است، انتخاب سیال محبوس متناسب با گاز خروجی از خودرو در شبیه‌سازی و آزمایش تأثیر بهتری در نتایج نهایی و هم چنین قابلیت استفاده تجاری از دستگاه خواهد داشت.



شکل ۶: نمایی از شبیه‌سازی ساخته شده از صداخفه‌کن

۳-۱- شبکه‌بندی

پس از شبیه‌سازی، با شبکه‌بندی شبیه‌سازی یک بعدی از صداخفه‌کن بدست می‌آید. شبکه‌بندی پیشفرض نرم افزار به صورت مکعبی با ابعاد ۴۰ × ۴۰ × ۴۰ میلی‌متر مکعب برای پوسته صداخفه‌کن و ۴۰ میلی‌متر در طول لوله‌ها است که در این تحقیق از همین حالت استفاده شده است. در شکل نمایی از شبکه‌بندی اعمال شده بر روی شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۷: نمایی از شبیه‌سازی شبکه‌بندی شده

در معادله ۳۶، c سرعت صوت در محیط، d قطر لوله محیط انتشار و f_u بیشترین بسامد صدا در آزمایش است.

- فاصله منبع صوتی تا اولین میکروفون حداقل سه برابر قطر لوله باشد.
- ایجاد انتهای نزدیک به غیر بازتابی به دقت نتایج کمک می‌کند. به این منظور می‌توان ماده جاذب صدایی را به شکل گوه و به طول ۳۰ سانتی‌متر در انتهای لوله نصب کرد.
- بسته به قطر میکروفون‌ها بیشینه مقداری برای بسامد کاری پیشنهاد می‌شود که کمترین آن ۳۰۰۰ هرتز است.
- فاصله میکروفون‌ها با یکدیگر باید شرط رابطه ۳۷ را برآورده کند:

$$s < \frac{0.8c}{2f_u} \quad (37)$$

در معادله ۳۷، s فاصله بین دو میکروفون است.

- میکروفون‌ها باید به صورت مماس در لوله‌ها نصب شوند.
- به منظور کاهش تأثیر صدای محیط بر آزمایش، پیشنهاد می‌شود بلندی صدای پخش شده توسط بلندگو حداقل ۱۰ دسی‌بل از صدای محیط بیشتر باشد.

پس از انجام آزمایش، داده‌های ثبت شده توسط میکروفون‌ها برای رسیدن به نتایج، توسط نرم افزار متلب^۱ پردازش می‌شوند. برای بدست آوردن متغیرهای ماتریس انتقال در هر بسامد از نویز سفید استفاده می‌شود و سپس فشار در موقعیت هر میکروفون نسبت به موقعیت میکروفون^۱ بدست می‌آید.

در این آزمایش از میکروفون‌های B&K TYPE 4189-A-021 استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات میکروفون‌های مورد استفاده	
قطر	۱/۲"
محدوده دینامیکی	16.5-134 dB
محدوده بسامدی	20-20000 Hz
نویز ذاتی	16.5 dB
حساسیت	50 mV/Pa

۳- شبیه‌سازی

به منظور شبیه‌سازی عملکرد صداخفه‌کن از نرم افزار جی تی پاور استفاده می‌شود. مراحل فرآیند شبیه‌سازی به ترتیب عبارت‌اند از: شبیه‌سازی، شبکه‌بندی^۲، یک بعدی سازی شبیه‌سازی، پیاده‌سازی شرایط آزمایش برای شبیه‌سازی نهایی و در پایان انجام شبیه‌سازی.

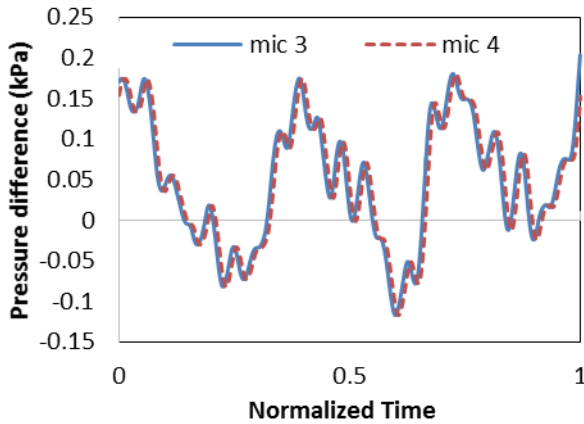
³ GEM3D
⁴ Shell
⁵ Baffle

¹ MATLAB
² Meshing

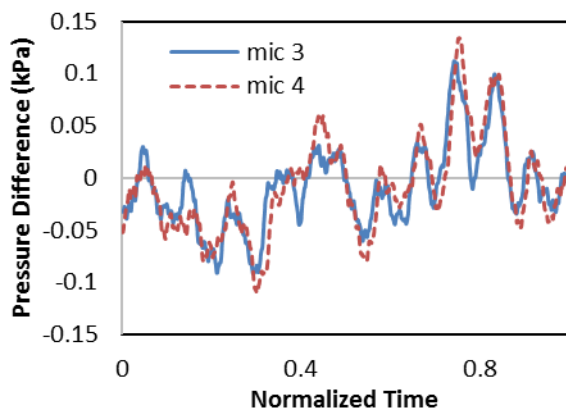
۲-۳- شبیه‌سازی آزمون

در این مرحله با انتخاب شبیه‌سازی ساخته شده، شبیه‌سازی آزمون در نرم افزار جی تی-آی اس ای^۱ و بدست آوردن افت انتقال صدا استفاده می‌شود.

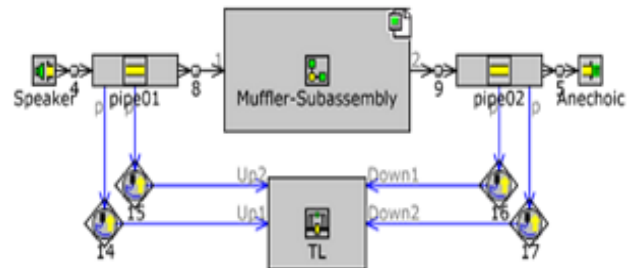
دمای پوسته و لوله‌ها و سیال محبوس در صداخفه‌کن مطابق شرایط آزمون برابر با ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته می‌شود. چنان چه پیش‌تر ذکر شد علت در نظر گرفتن این دما نزدیک بودن آن به شرایط محیط آزمایش است. در تلاش‌های آینده، ایجاد محیطی نزدیک به شرایط کاری واقعی منجر به توسعه بهتر دستگاه خواهد شد. در شکل نمایی از محیط نرم افزار و چیدمان جعبه‌ها آورده شده است.



شکل ۹: فشار میکروفون‌های ۳ و ۴ بر حسب زمان برای شبیه‌سازی



شکل ۱۰: فشار میکروفون‌های ۳ و ۴ بر حسب زمان برای دستگاه آزمون



شکل ۸: نمایی از محیط نرم افزار جی تی پاور

در شبیه‌سازی، شرط غیربازتابی به صورت کامل برقرار است و به همین دلیل نیازی به انجام دو مرتبه شبیه‌سازی نیست. منظور از شرط غیر بازتابی، منعکس نشدن امواج صوتی پس از عبور از عنصر صوتی به دلیل وجود نداشتن مانع است.

در نهایت، شبیه‌سازی برای بسامد ۱ تا ۳۰۰۰ هرتز انجام می‌شود.

۴- نتایج و بحث

در این مقاله روش‌های دو بارگذاری و دو منبع تشریح شدند و معادلات مربوط به آن دو، بار دیگر استخراج شد که مطابق با معادلات بدست آورده شده توسط تاتو و سیبرت [۹] است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودارهای مربوط به فشار ثبت شده توسط میکروفون‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای شبیه‌سازی و دستگاه آزمون در حالت انتها بسته آورده شده است. لازم به ذکر است که موج تولیدی تصادفی است و به همین دلیل فشارهای ثبت شده توسط میکروفون‌ها در آزمون و شبیه‌سازی لزوماً برابر نخواهند بود.

به دلیل بسته بودن و غیربازتابی بودن انتهای لوله، موج بازگشتی نباید وجود داشته باشد. عدم وجود موج بازگشتی به معنای آن است که فشار ثبت شده توسط میکروفون‌های ۳ و ۴ برابر بوده و تنها دارای اختلاف زاویه است.

مشاهده می‌شود که در نتایج حاصل از شبیه‌سازی این قضیه برقرار بوده و به همین علت در شبیه‌سازی با انجام آزمایش فقط در حالت انتها بسته، جواب حاصل خواهد شد.

اما با توجه به نتایج حاصل از آزمون، این گونه دیده می‌شود که تفاوت فشار ثبت شده از میکروفون‌ها تنها ناشی از اختلاف زاویه نیست. در نتیجه می‌توان گفت که موج بازگشتی وجود دارد و شرط غیربازتابی به طور کامل برآورده نشده است. لذا برای حصول افت انتقال صدا به صورت دقیق‌تر، آزمایش باید با شرط انتهایی متفاوتی تکرار شود تا با استفاده از دو مجموعه داده، مطابق با معادلات ۲۲ تا ۳۵، متغیرهای ماتریس انتقال تعیین گردند و در نهایت افت انتقال صدا محاسبه شود. به دلیل سادگی بیشتر اجرای روش دو بارگذاری، این روش برای بدست آوردن افت انتقال صدا مورد استفاده قرار گرفت. با پیاده سازی عملی روش دوبارگذاری و شبیه‌سازی در نرم‌افزار جی تی پاور، افت انتقال صدا به دو روش آزمون و شبیه‌سازی برای نمونه محاسبه شد. در شکل ۱ نتایج بدست آمده از آزمون و همچنین شبیه‌سازی در نرم‌افزار جی تی پاور برای صداخفه‌کن میانی خودروی سمند نشان داده شده است.

صوتی مانند ثابت بازتاب^۱، ثابت جذب^۲ و امپدانس^۳ را برای نمونه بدست آورد. از نمودار نشان داده شده در شکل ۱ می‌توان عملکرد صدا خفه‌کن از لحاظ آوایی را ارزیابی کرد. این نمودار عملکرد ضعیف صدا خفه‌کن در بسامد زیر ۵۰۰ هرتز و بالای ۲۰۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. با توجه به عملکرد مناسب صداخفه‌کن مورد آزمون در محدوده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز، این صداخفه‌کن می‌تواند برای موتورهایی که صدای غالب تولید شده از آنها در این محدوده باشد انتخاب مناسبی خواهد بود.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هدف توسعه سامانه آزمون برای سنجش عملکرد صداخفه‌کن‌های مورد استفاده در خودرو بوده است. از بین روشهای استاندارد، روش دو بارگذاری برای مبنای کارکرد این سامانه آزمون انتخاب شد.

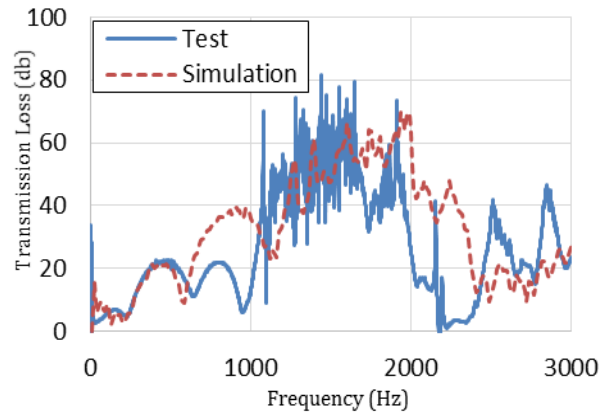
در طی انجام آزمون با این سامانه میزان افت انتقال صدا در طول مسیر یک صدا خفه‌کن محاسبه می‌شود. بعد از توسعه سامانه مطابق با استاندارد، یک نمونه صدا خفه‌کن متداول بررسی شد.

از شبیه‌سازی در نرم افزار جی تی پاور و حل معادلات ریاضی حاکم، عملکرد سامانه آزمون صحت گذاری شد. همانطوری که مقایسه نتایج آزمون و شبیه‌سازی نشان می‌دهد، دستگاه در شرایط آزمون عملکرد نسبی دارد و برای ارزیابی عناصر صوتی قابل استفاده خواهد بود.

از آنجا که هدف اصلی ارزیابی صداخفه‌کن سامانه خروجی است، توصیه می‌شود شرایط آزمایش به شرایط کاری واقعی نزدیک و تئوری‌های دیگر نیز بررسی شوند تا نتایج بهتری حاصل گردند. به این ترتیب میتوان از دستگاه آزمون در راستای طراحی و طبقه بندی صدا خفه‌کنهای مختلف و گزینش صدا خفه‌کن بهینه، متناسب با منبع صوتی (موتور) مورد نظر، بهره برد و صدای کلی منتشر شده از طرف خودرو را کاهش داد.

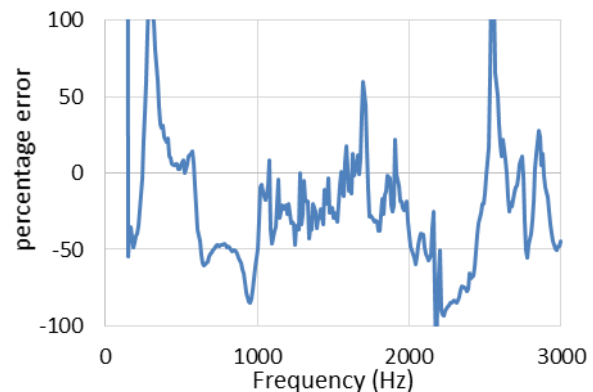
مراجع و منابع

- [1] A.K.M. Mohiuddin, A. Rahman, Y.B. Gazali, Experimental investigation and simulation of muffler performance, Proceeding of the International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka, Bangladesh, 29-31 December 2007
- [2] S. Rajadurai, Natarajan, N. Manikangan, Muffler pre-processing methodology and comparative study using HyperMesh, University of HTC, 2012



شکل ۱: افت انتقال صدا برای صداخفه‌کن میانی خودروی سمند

در شکل ۲ درصد اختلاف نتایج آزمایش از نتایج شبیه‌سازی به عنوان مبنا آورده شده است. مشاهده می‌شود با وجود اختلاف بسیار در بسامدهای ۲۵۰۰ و ۴۰۰ هرتز، در باقی محدوده‌ها نتایج آزمون تطابق قابل قبولی با شبیه‌سازی دارند. همچنین از شکل ۱، نزدیک بودن الگوی نتایج به یکدیگر قابل مشاهده است که نشان بر کارکرد صحیح دستگاه آزمون و مناسب بودن روش انتخابی دارد.



شکل ۲: درصد خطای نتایج آزمون از شبیه‌سازی در بسامدهای مختلف

یکی از دلایل اختلاف موجود میان نتایج، عدم مطابقت کامل نمونه ساخته شده با شبیه‌سازی آن است. همچنین وجود فلنج‌های قرار داده شده به منظور اتصال نمونه به دستگاه نیز به دلیل عدم وجود امکان درگیر کردن آنها در شبیه‌سازی منجر به اختلاف بیشتر نتایج می‌شود. در این خصوص می‌توان فلنجهای را به عنوان بخشی از هندسه نمونه در شبیه‌سازی لحاظ کرد که این عمل معادل با تغییر در خود نمونه است و نتایج حاصله نیز مختص به نمونه دارای فلنج خواهد بود. در این صورت متغیرهای نمونه اصلی بدست نخواهند آمد. لذا ترجیح بر این است تا ساختاری ساده تر برای اتصال نمونه به دستگاه طراحی شود که ناهمواری کمتری در طول مسیر انتشار موج ایجاد کند.

با استفاده از معادلات ۳۲ تا ۳۵، چهار متغیر ماتریس انتقال برای نمونه بدست آمد که توسط این چهار متغیر می‌توان دیگر خواص

^۱ Reflection coefficient

^۲ Absorption coefficient

^۳ Characteristic impedance

- [6] Beranek, L., and Ver, I., eds., Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc. New York, N.Y., 1992.
- [7] Munjal, M.L., Acoustics of Ducts and Mufflers, New York: Wiley-Interscience, 1987.
- [8] Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method, American Standard ASTM E2611 - 09: 2009 (American Society for Testing and Materials 2009)
- [9] Z. Tao and A. F. Seybert, A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss, University of Kentucky, 2003, 01-1653.
- [3] J. Y. Chung and D. A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. Engineering Mechanics Department, General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan. 1980. 904-913.
- [4] Lung, T.Y. and Doige, A.G., "A Time-averaging Transient Testing Method for Acoustic Properties of Piping Systems and Mufflers," J. Acoust. Soc. Am, 73, 867-876 (1983).
- [5] Munjal, M.L. and Doige A.G., "Theory of a Two Source-location Method for Direct Experimental Evaluation of the Four-pole Parameters of an Aero acoustic Element," Journal of Sound and Vibration, 141(2), 323-333, 1990.



Development and Validation of Sound Transmission Loss Measurement System for Measuring Muffler Performance

Y. Abbaszadeh^{1*}, M. Ghaffari², H. Mohammadi³, M. Garivani⁴, V. Fakhari⁵

¹ Specialist at CAE Department, IPCO, Tehran, Iran, Y_abbaszadeh@ip-co.com

² MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, K.N.T. University of Technology, Tehran, Iran, Ghaffari.mohsen@email.kntu.ac.ir

³ Specialist at CAE Department, IPCO, Tehran, Iran, H_Mohammadi@ip-co.com

⁴ MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Gari65amg@gmail.com

⁵ Faculty Member, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, v_fakhari@sbu.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 4 December 2019

Accepted: 18 February 2020

Keywords:

Exhaust Muffler

Sound Transmission Loss

Sound Transmission Loss Test Device

ABSTRACT

Muffler is a part of the vehicle exhaust system that absorb or reflect sound waves to reduce exhaust noise. One of the most important determinants of a muffler performance is the amount of attenuation that has on its input wave; this parameter is known as sound transmission loss. Four - mic standard test is one way to determine this parameter which is used in this paper. In this study, a test device was developed to measure the level of Sound Transmission Loss. In order to validate the performance of the test apparatus and its results, sound transmission loss is calculated for real sample using GT-Power software and theoretical calculations. The sound transmission loss test machine can be used to assess mufflers used in the car and other industries. In general, the main purpose of this research is to construct the sound transmission loss test device and develop the computational code for it and validate the performance of the test system.

