

## طراحی و شبیه سازی مافلر برای موتور چهار سیلندر دوزمانه

حسن بهمنی آ، محمدرضا الهامی\*

ایران، تهران، تهران، خواجه نصیرالدین طوسی، مهندسی مکانیک، ۴۳۳۴۴-۱۹۹۱۹، دانشجوی دکتری

ایران، تهران، تهران، دانشگاه امام حسین، ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، دانشیار.

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [melhami@ihu.ac.ir](mailto:melhami@ihu.ac.ir)

### چکیده

این مطالعه با هدف طراحی، مدلسازی سه بعدی و تحلیل عددی یک مافلر (صدا خفه کن) کارآمد برای کاهش چشمگیر نویز خروجی از موتور چهار سیلندر دو زمانه انجام شده است. رویکرد طراحی بر پایه اصول پیشرفته‌ی آکوستیک مهندسی شامل تحلیل دقیق رفتار امواج صوتی و بهینه‌سازی دقیق پارامترهای هندسی مافلر برای دستیابی به حداکثر جذب و میرایی صدا استوار بوده است. مدل‌های هندسی با جزئیات بالا در نرم‌افزار سالیدورکس ایجاد شدند و سپس به محیط قدرتمند کامسول مالی فیزیک منتقل گشتند تا در ماژول آکوستیک، تحت تحلیل‌های عددی پیشرفته با استفاده از روش المان محدود (FEM) قرار گیرند. این فرآیند شبیه‌سازی دقیق، امکان پیش‌بینی عملکرد آکوستیکی مافلر را قبل از ساخت فیزیکی فراهم آورد.

در این پژوهش، عملکرد آکوستیکی دو طرح مافلر به طور مجزا مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، به ویژه تأثیر حیاتی مواد جاذب صوتی بر کارایی میرایی نویز در بازه‌های فرکانسی مختلف ارزیابی شد. مافلر اول که در بازه فرکانسی گسترده‌تر ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز تحلیل شد، در حالت بهینه (با جاذب)، نشان داد که کاهش نویز از فرکانس ۴۰۰ هرتز به بالا به طور مداوم بیش از ۳۰ دسی‌بل است و در فرکانس کلیدی ۸۰۰ هرتز، میزان کاهش به رقم قابل توجه ۴۰ دسی‌بل می‌رسد، که ۱۰ دسی‌بل بهبود عملکرد نسبت به حالت بدون جاذب را نشان می‌دهد. این امر، کارایی طرح را در فرکانس‌های بالاتر، که اغلب نویز غالب موتور را تشکیل می‌دهند، برجسته می‌سازد.

مافلر دوم که برای هدف قرار دادن فرکانس‌های پایین‌تر در بازه ۰ تا ۲۰۰ هرتز طراحی شده بود، عملکرد تخصصی خود را به نمایش گذاشت. در این طرح نیز، افزودن مواد جاذب صوتی، میزان کاهش نویز را به شکل چشمگیری بهبود بخشید، به طوری که از فرکانس ۱۰۰ هرتز، کاهش نویز به بیش از ۱۰ دسی‌بل رسید و در فرکانس ۲۰۰ هرتز، حداکثر کاهش به ۲۸ دسی‌بل دست یافت. این در حالی است که در حالت بدون جاذب، حداکثر کاهش تنها ۲۰ دسی‌بل بود. به طور کلی، نتایج شبیه‌سازی به وضوح برتری طرح‌های بهینه‌سازی شده و تأثیرگذاری بالای مواد جاذب را در دستیابی به کاهش قابل قبول و مؤثر سطح نویز در فرکانس‌های هدف تأکید می‌کند، که این مافلر را به گزینه‌ای کارآمدتر نسبت به طرح‌های سنتی تبدیل می‌سازد.

کلمات کلیدی: مافلر؛ موتور دوزمانه؛ مواد جاذب صوتی؛ آکوستیک.

## ۱- مقدمه

طراحی و مهندسی سیستم‌های صداخفه‌کن (مافلر) برای موتورهای احتراق داخلی، به ویژه موتورهای دوزمانه، یکی از حوزه‌های چالش‌برانگیز و حیاتی در مهندسی آکوستیک کاربردی است. هدف اولیه در این فرآیند، کاهش مؤثر نویز خروجی اگزوز به سطوح قابل قبول یا مطابق با استانداردها است، اما این هدف باید در تعادل با یک الزام عملکردی حیاتی دیگر، یعنی حفظ حداقل افت فشار برگشتی، محقق شود. افت فشار برگشتی بیش از حد می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد ترمودینامیکی موتور، به ویژه در موتورهای دوزمانه که فرآیند رویش آن‌ها به دینامیک موج فشار در سیستم اگزوز بسیار وابسته است، تأثیر منفی بگذارد و منجر به کاهش توان خروجی، افزایش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها گردد. خصوصیات نویز اگزوز موتورهای دوزمانه، که غالباً با پالس‌های فشار قوی‌تر، فرکانس‌های پایه پایین‌تر (به دلیل احتراق در هر دور میل‌لنگ) و سطوح شدت صوت بالاتر نسبت به موتورهای چهارزمانه مشخص می‌شود، پیچیدگی طراحی را دوچندان می‌کند. این ویژگی‌ها، به خصوص غلبه‌ی انرژی صوتی در باندهای فرکانسی پایین مثلاً زیر ۵۰۰ هرتز، نیازمند راهکارهای طراحی خاصی است که بتواند میرایی مؤثری را در این محدوده فراهم کند، چالشی که با محدودیت‌های فضایی معمول در کاربردهایی مانند موتورسیکلت‌ها یا ابزارهای قدرتی دستی، تشدید می‌شود [۱].

عملکرد آکوستیکی مافلرها به طور بنیادین بر دو مکانیزم متکی است: بازتاب واکنشی، که از محفظه‌های انبساط و رزونانس برای ایجاد تداخل و پراکنده‌سازی امواج صوتی استفاده می‌کند، و جذب اتلافی، که از طریق مواد متخلخل و لوله‌های سوراخ‌دار، انرژی نویز را به گرما تبدیل می‌نماید. معیار اصلی برای ارزیابی عملکرد غیرفعال یک جزء مافلر، پارامتر افت انتقال<sup>۱</sup> است که قابلیت میرا کنندگی آن را به صورت مستقل از مشخصات منبع نویز و بار آکوستیکی محیط نشان می‌دهد [۱]. پژوهش‌های نوین به طور فزاینده‌ای بر بهینه‌سازی شکل هندسی مافلر برای حداکثرسازی TL در باندهای فرکانسی باریک یا گسترده تمرکز دارند.

برای تحلیل دقیق سیستم‌های مافلر، مدل‌سازی باید فراتر از فرضیات موج صفحه‌ای ساده عمل کند. این امر به ویژه در فرکانس‌های بالاتر یا در مافلرهایی با ابعاد بزرگ و هندسه‌های پیچیده (نظیر رزوناتورهای هلمهولتز و رزوناتورهای لوله‌ای متحدالمرکز) که نیازمند در نظر گرفتن امواج سه‌بعدی هستند، اهمیت می‌یابد. در تحلیل تک‌بعدی خطی، روش ماتریس انتقال که توسط متخصصانی چون M. L. Munjal توسعه یافته، ابزار استاندارد برای مدل‌سازی و اتصال عناصر آبخاری<sup>۲</sup> در سیستم اگزوز است [۱]. با این حال، در سیستم‌های واقعی اگزوز، حضور جریان میانگین، دماهای بالا و سطوح فشار صوتی بسیار شدید (حتی تا ۱۵۵ دسی بل)، تأثیرات دینامیک سیالات آکوستیک<sup>۳</sup> و حتی اثرات موج با دامنه‌ی محدود را ضروری می‌سازد که پیچیدگی‌های غیرخطی به تحلیل می‌افزاید.

به همین دلیل، رویکردهای تحلیلی باید با روش‌های مدل‌سازی عددی سه‌بعدی تکمیل شوند. روش المان محدود به عنوان یک ابزار قدرتمند، امکان مدل‌سازی جامع و دقیق پدیده‌های پیچیده را فراهم می‌آورد. روش المان محدود قادر است پارامترهای آکوستیکی مانند TL را برای هندسه‌های پیچیده، با لحاظ کردن شرایط مرزی آکوستیکی (نظیر مواد جاذب) و حضور جریان میانگین، پیش‌بینی و تحلیل نماید. بدین ترتیب، با ترکیب دانش اصول آکوستیک، ابزارهای تحلیلی و روش‌های شبیه‌سازی عددی، چرخه طراحی یک مافلر از طراحی مفهومی تا اعتبارسنجی نهایی با نتایج آزمایشگاهی کامل می‌شود و امکان بهینه‌سازی دقیق اجزای داخلی، نظیر محفظه‌ها و لوله‌های سوراخ‌دار، برای عملکرد گسترده در فرکانس‌های مورد نظر، فراهم می‌گردد.

<sup>۱</sup> Transmission Loss - TL<sup>۲</sup> Cascaded-Element<sup>۳</sup> Flow-Acoustic Dynamics

## ۲- انواع مافلر

### ۱-۱ مافلرهای واکنشی

مافلرهای واکنشی<sup>۴</sup> اساساً از طریق بازتاب امواج صوتی و ایجاد عدم تطابق امپدانس در مسیر جریان گاز آگروز، نویز را کاهش می‌دهند. عملکرد این دسته از مافلرها به شدت به هندسه داخلی آن‌ها وابسته است و اجزای کلیدی شامل محفظه‌های انبساطی، رزوناتورها (مانند هلمهولتز، لوله‌های ربع موج و لوله‌های متحدالمرکز)، لوله‌های داخلی و بافلرها می‌شوند. این عناصر با تغییر سطح مقطع، طول مسیر، یا ایجاد حفره‌های تشدیدگر، امواج صوتی را وادار به بازتاب و تداخل مخرب می‌کنند، تغییرات هندسی باعث تغییر امپدانس در محل اتصالات شده و امواج بازتابی ایجاد می‌کند، که منجر به کاهش انرژی صوتی منتقل شده به خروجی می‌شود. کارایی آن‌ها معمولاً با افت انتقال سنجیده می‌شود که نشان می‌دهد در فرکانس‌های خاصی (وابسته به ابعاد هندسی)، میرایی بالایی ایجاد می‌کنند. مافلرهای واکنشی به ویژه در فرکانس‌های پایین تا متوسط مؤثر هستند و برای کاهش هارمونیک‌های اصلی موتورهای احتراقی (به خصوص دوزمانه) مناسب‌اند، اما معمولاً افت فشار برگشتی بیشتری نسبت به انواع جاذب ایجاد می‌کنند و طراحی آن‌ها برای عملکرد باند پهن چالش برانگیزتر است [۱]، [۲]، [۳].

### ۱-۲ مافلرهای جاذب

اساس عملکرد مافلرهای جاذب<sup>۵</sup> بر تبدیل انرژی آکوستیکی به گرما از طریق مکانیزم‌های اتلافی درون مواد متخلخل جاذب صوت استوار است. این مواد، که می‌توانند شامل الیاف شیشه، پشم سنگ، فوم‌های فلزی یا سرامیکی باشند، معمولاً دیواره‌های داخلی داکت‌ها را می‌پوشانند یا به صورت بافلرهای موازی در مسیر جریان قرار می‌گیرند. انرژی امواج صوتی هنگام عبور از ساختار متخلخل این مواد، به دلیل اصطکاک ویسکوز بین هوا و ساختار جامد و همچنین اتلافات حرارتی ناشی از انتقال گرما بین هوا و ماده جامد در طی چرخه‌های تراکم و انبساط، مستهلک و به گرما تبدیل می‌شود. در بسیاری از کاربردها، به ویژه در سیستم‌های آگروز، مواد جاذب توسط یک لایه محافظ مانند صفحه سوراخ‌دار یا گاهی یک لایه نازک نفوذناپذیر پوشانده می‌شوند تا از آسیب ناشی از جریان گاز داغ و ذرات محافظت شوند [۴]، [۵].

### ۱-۳ مافلرهای هیبریدی یا ترکیبی<sup>۶</sup>

این نوع، همانطور که از نامشان پیداست، از ترکیب هوشمندانه‌ی عناصر واکنشی و جاذب در یک مجموعه واحد بهره می‌برند تا به عملکرد آکوستیکی برتر، به ویژه در کاهش نویز باند پهن، دست یابند. هدف اصلی از این ترکیب، بهره‌گیری همزمان از نقاط قوت هر دو نوع مافلر و پوشش دادن نقاط ضعف ذاتی آن‌هاست. مافلرهای واکنشی در فرکانس‌های پایین مؤثرترند اما ممکن است در فرکانس‌های بالا عملکرد ضعیفی داشته باشند و قله‌ها و دره‌های مشخصی در منحنی افت انتقال (TL) خود نشان دهند. در مقابل، مافلرهای جاذب در فرکانس‌های متوسط تا بالا عملکرد عالی دارند و افت فشار کمی ایجاد می‌کنند، اما در کاهش نویز فرکانس‌های پایین ناتوان هستند. طراحی یک مافلر هیبریدی معمولاً شامل قرار دادن مواد جاذب صوت (مانند پشم شیشه یا مواد مشابه مقاوم به حرارت) در بخش‌هایی از یک ساختار اساساً واکنشی است. به عنوان مثال، می‌توان مواد جاذب را در محفظه‌های انبساطی قرار داد تا رزونانس‌های داخلی محفظه را میرا کرده و عملکرد در فرکانس‌های بالا را بهبود بخشد، یا می‌توان از لوله‌های سوراخ‌دار که با مواد جاذب احاطه شده‌اند، به عنوان بخشی از مسیر جریان استفاده کرد. ترکیب یک محفظه انبساطی (برای بازتاب فرکانس پایین) با یک بخش داکت جاذب (برای اتلاف فرکانس بالا) نیز یک رویکرد رایج است. انتخاب دقیق نوع و محل قرارگیری عناصر واکنشی و جاذب، به مشخصات طیف نویز منبع (مانند موتور) و محدودیت‌های طراحی (فضا، وزن، افت فشار مجاز) بستگی دارد. تحلیل و بهینه‌سازی این

<sup>۴</sup> Reactive/Reflective Mufflers

<sup>۵</sup> Dissipative/Absorptive Mufflers

<sup>۶</sup> Combination/Hybrid Mufflers

مافلرها به دلیل اندرکنش پیچیده بین مکانیزم‌های بازتابی و اتلافی، و همچنین تأثیر جریان متوسط و دما، معمولاً نیازمند استفاده از روش‌های عددی پیشرفته مانند المان محدود یا المان مرزی در کنار روش‌های تحلیلی مانند ماتریس انتقال برای اجزای ساده‌تر است. در نهایت، مافلرهای هیبریدی به دلیل قابلیت دستیابی به میرایی مؤثر در گستره وسیع‌تری از فرکانس‌ها نسبت به انواع خالص واکنشی یا جاذب با حجم و پیچیدگی مشابه، در بسیاری از کاربردهای عملی، به‌ویژه در سیستم‌های اگزوز خودروهای مدرن، به گزینه ارجح تبدیل شده‌اند [۶]، [۷].

### ۳- روش

طراحی سطوح بازتابی (مانند انتهای محفظه‌ها یا بافلرها) در مافلر انبساطی با هدف ایجاد تداخل مخرب برای امواج صوتی انجام می‌شود. برای اینکه موج صوتی بازتابیده شده از یک سطح (مثلاً انتهای محفظه) با موج صوتی ورودی بعدی تداخل مخرب داشته باشد و آن را خنثی کند، باید اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای بین آن‌ها وجود داشته باشد. این اتفاق زمانی می‌افتد که موج بازتابیده شده مسیری اضافه به اندازه مضرب فردی از نصف طول موج را طی کند [۸]. برای دستیابی به حداکثر کاهش صدا در فرکانس هدف، طول مؤثر (L) بین سطوح بازتابی (مثلاً طول یک محفظه انبساطی ساده) باید به گونه‌ای انتخاب شود که این شرط اختلاف مسیر برقرار شود. این معمولاً به معنی انتخاب طولی نزدیک به مضرب فردی از یک‌چهارم طول موج است [۹].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

افت انتقال یک اتاقک انبساطی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

$$k = \frac{2\pi f}{c}$$

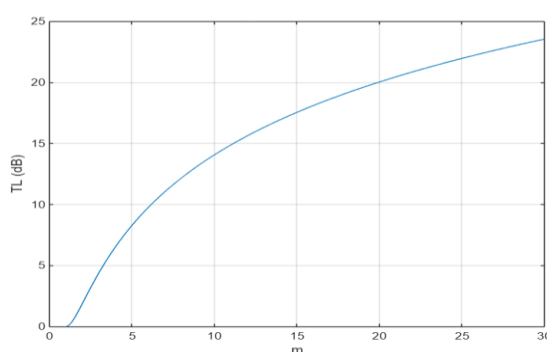
$m$ : نسبت قطر محفظه به قطر اگزوز

$f$ : فرکانس بر حسب هرتز

$c$ : سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه

$l$ : طول محفظه

$\lambda$ : طول موج

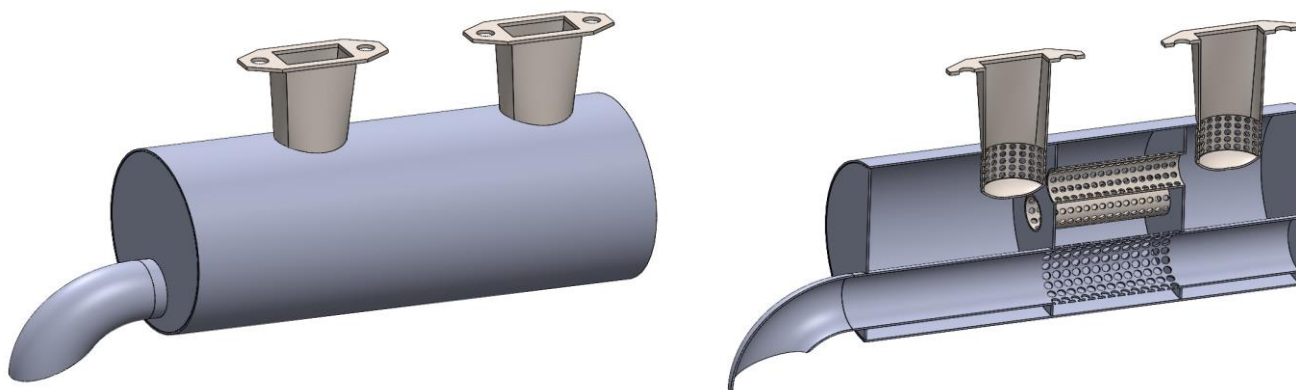


نمودار ۱. مقدار افت توان صوتی بر حسب نسبت قطر محفظه به قطر ورودی

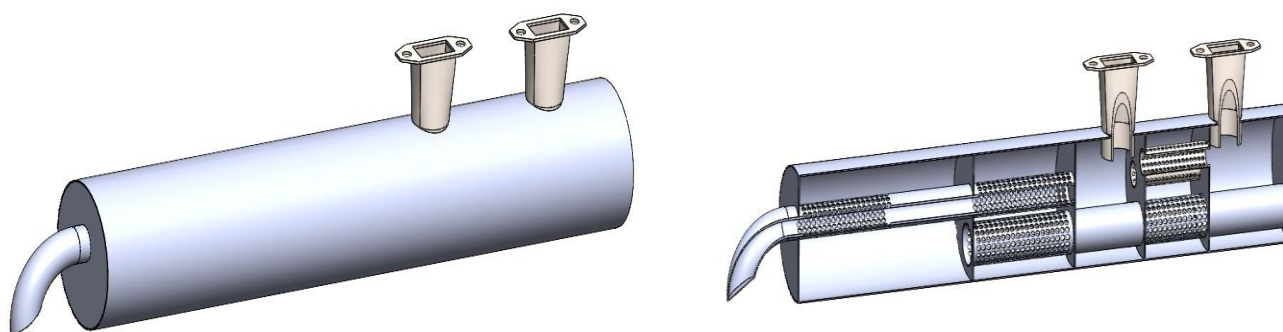
### ۴- طراحی

در این پژوهش دو طرح مورد طراحی و شبیه‌سازی قرار گرفت. طرح شماره یک که شماتیک آن شکل یک می‌باشد، در نرم‌افزار سالیدورکس با دو ورودی و یک خروجی به طول ۲۲۰ میلی‌متر طراحی شد.

شماتیک مافلر دوم در شکل دوم آمده است. این مافلر با دو ورودی از جانب و یک خروجی از قاعده به طول ۵۰۰ میلی‌متر طراحی شد.



شکل ۱. مافلر شماره یک



شکل ۲. مافلر شماره دو

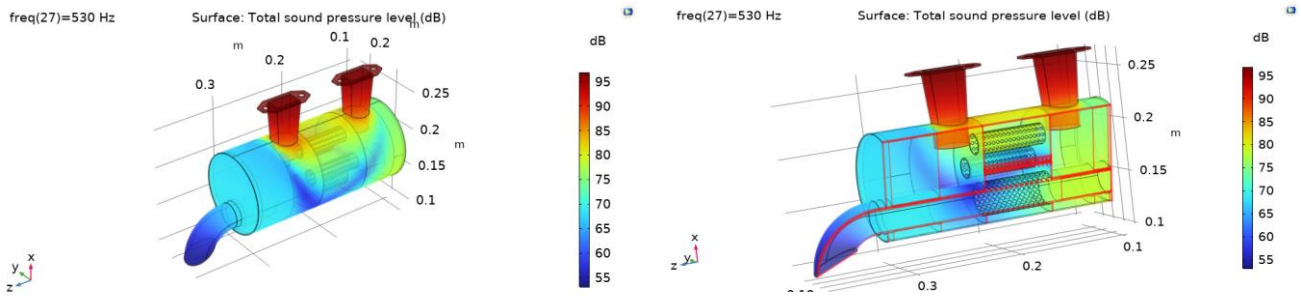
## ۵- شبیه‌سازی

در پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد آکوستیکی طرح‌های پیشنهادی مافلر با استفاده از شبیه‌سازی عددی المان محدود در نرم‌افزار کامسول<sup>۷</sup> و بر پایه مازول آکوستیک<sup>۸</sup> آن انجام پذیرفت. این رویکرد، روشی مهندسی و دقیق جهت ارزیابی کمی پارامتر کلیدی افت انتقال صدا در حوزه فرکانس، پیش از مرحله ساخت نمونه اولیه، فراهم می‌آورد. فرآیند مدل‌سازی مبتنی بر تعریف هندسه دامنه سیال، اعمال فیزیک (با در نظر گرفتن تأثیرات دما بر سرعت صوت)، و تخصیص شرایط مرزی دقیق شامل در ورودی و خروجی (جهت اعمال موج صفحه‌ای و جلوگیری از بازتاب‌های ناخواسته) و برای دیواره‌های صلب<sup>۹</sup> بود. پس از حصول اطمینان از کفایت مش‌بندی برای پوشش‌دهی محدوده فرکانس مورد مطالعه، شبیه‌سازی‌ها به طور خاص در دو پیکربندی متمایز اجرا گردید: حالت اول بدون حضور مواد جاذب (عملکرد صرفاً واکنشی) و حالت دوم با جایگذاری مواد جاذب صوتی در حفره‌های داخلی (عملکرد جذبی/ترکیبی)، تا تأثیر این مواد بر منحنی افت انتقال صدا به صورت تطبیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

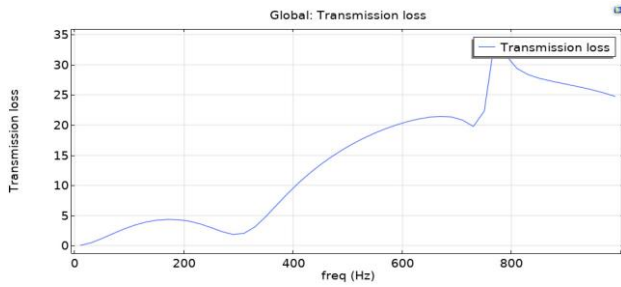
<sup>۷</sup> COMSOL

<sup>۸</sup> Acoustics Module

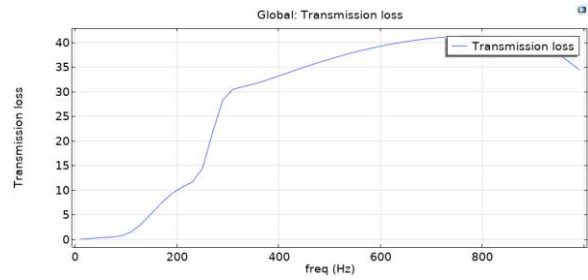
<sup>۹</sup> Sound Hard Boundary



شکل ۳. تحلیل عددی مافلر شماره یک



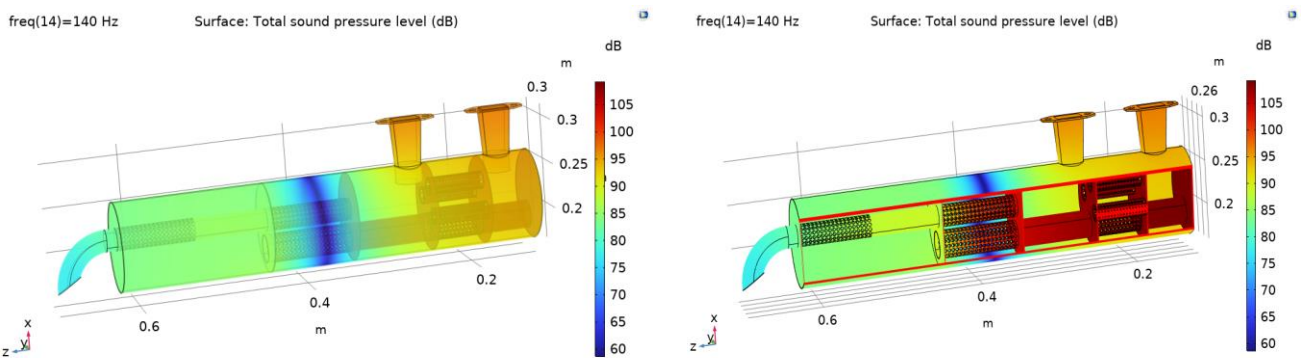
(الف)



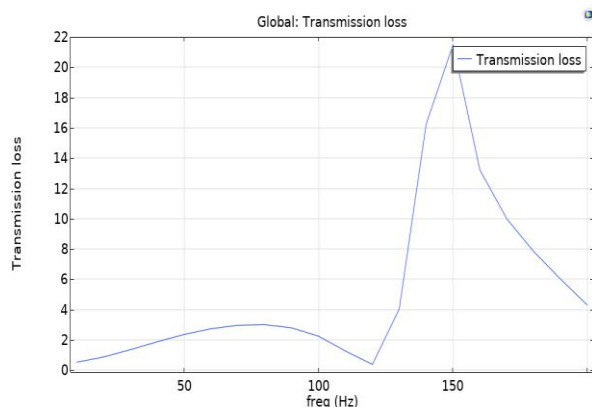
(ب)

نمودار ۲. نمودارهای افت انتقال (الف) بدون جایگذاری مواد جاذب (ب) با جایگذاری مواد جاذب

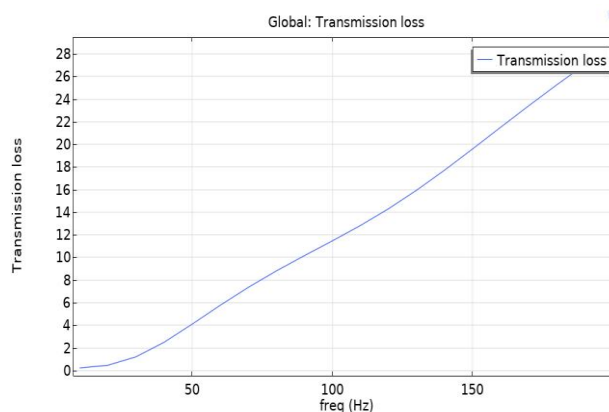
نتایج تحلیل عددی مافلر شماره یک در نرم‌افزار کامسول، که در شکل‌های بالا ارائه گردیده است، مورد ارزیابی دقیق قرار گرفت. بررسی تطبیقی نمودارهای افت انتقال در گستره فرکانسی ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز، تأثیر مثبت و چشمگیر به‌کارگیری مواد جاذب صوتی را به وضوح آشکار می‌سازد. این تحلیل مؤید آن است که در پیکربندی ترکیبی، یعنی حالتی که در آن از مواد جاذب در فضای داخلی مافلر بهره‌گیری شده است، عملکرد آکوستیکی سیستم در قیاس با حالت پایه (بدون جاذب)، بهبودی کاملاً ملموس و قابل توجهی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تحلیل عددی مافلر شماره دو



(الف)



(ب)

نمودار ۳. نمودارهای افت انتقال (الف) بدون جایگذاری مواد جاذب (ب) با جایگذاری مواد جاذب

مطابق نتایج عددی حاصل از تحلیل مافلر شماره دو در نرم‌افزار کامسول، که در نمودارهای افت انتقال (۰ تا ۲۰۰ هرتز) قابل مشاهده است، به کارگیری مواد جاذب صوتی تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد داشته است. مقایسه حالت ترکیبی (مجهز به جاذب داخلی) با حالت پایه (فاقد جاذب) نشان‌دهنده ارتقای ملموس و قابل توجه کارایی آکوستیکی سیستم می‌باشد.

## ۶- بحث

در فرآیند طراحی و تعیین ابعاد هندسی مافلرها، گستره فرکانسی عملکرد به عنوان یک پارامتر کلیدی لحاظ گردید. برای مافلر شماره یک، که با هدف میرایی در گستره فرکانسی وسیع (۰ تا ۱۰۰۰ هرتز) طراحی شد، ابعاد و به ویژه طول آن، متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر مرتبط با فرکانس‌های بالای این بازه، به صورت فشرده‌تر انتخاب گردید. در مقابل، مافلر شماره دو منحصراً برای عملکرد در گستره فرکانسی پایین (۰ تا ۲۰۰ هرتز) طراحی شد. از آنجایی که فرکانس‌های پایین دارای طول موج‌های صوتی به مراتب بلندتری هستند، دستیابی به میرایی و افت انتقال مؤثر در این بازه، مستلزم افزایش ابعاد فیزیکی، به ویژه طول مافلر بود. لذا، مافلر شماره دو به طور قابل توجهی طویل‌تر از مافلر شماره یک طراحی شد تا بتواند کاهش صدای مطلوبی را در فرکانس‌های هدف پایین فراهم آورد.

## ۷- نتیجه‌گیری

- (۱) اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی: عملکرد آکوستیکی مافلرها با موفقیت از طریق مدلسازی سه‌بعدی در سالیدورکس و تحلیل عددی المان محدود (FEM) در کامسول ارزیابی شد.
- (۲) بررسی تأثیر مواد جاذب: پژوهش بر مقایسه عملکرد دو طرح مافلر (یکی برای بازه فرکانسی وسیع و دیگری برای بازه فرکانسی پایین) و ارزیابی تأثیر حیاتی افزودن مواد جاذب صوتی بر هر دو متمرکز بود.
- (۳) نتایج مافلر شماره یک (بازه ۰-۱۰۰۰ هرتز): افزودن مواد جاذب در این طرح، عملکرد در فرکانس‌های بالا را به شدت بهبود بخشید. در فرکانس ۸۰۰ هرتز، کاهش نویز به ۴۰ دسی‌بل رسید که ۱۰ دسی‌بل بهتر از حالت بدون جاذب بود.
- (۴) نتایج مافلر شماره دو (بازه ۰-۲۰۰ هرتز): در این طرح که بر فرکانس‌های پایین متمرکز بود، افزودن جاذب، حداکثر میرایی در فرکانس ۲۰۰ هرتز را از ۲۰ دسی‌بل (حالت پایه) به ۲۸ دسی‌بل (حالت ترکیبی) افزایش داد.
- (۵) نتایج شبیه‌سازی به وضوح تأیید می‌کند که طرح‌های هیبریدی (ترکیبی از عناصر واکنشی و جاذب)، در دستیابی به کاهش نویز مؤثر در فرکانس‌های هدف، برتری کاملاً ملموسی نسبت به طرح‌های صرفاً واکنشی (بدون جاذب) داشته است.

## مراجع

1. Munjal, Manchar Lal. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. John Wiley & Sons, 1987.
2. Ranjbar, Mostafa & Kermani, Milad. (2015). Muffler Design by Noise Transmission Loss Maximization.
3. Ahmed, aunik. *Design and construction of absorption type muffler and compare it with engine's existing muffler*. Diss. Department of mechanical engineering bangladesh university of engineering and technology a thesis paper submitted to the department of mechanical engineering for the degree of bachelor of science in mechanical engineering department of mechanical engineering, bangladesh university of engineering & technology.
4. Selamet, A. & Lee, Iljae & Ji, Zhan & Huff, N.T.. (2001). Acoustic Attenuation Performance of Perforated Absorbing Silencers. SAE Technical Papers. 10.4271/2001-01-1435.
5. Haghighi, M., Mirzaei, R., Putra, A. *et al.* A comprehensive review of advances and techniques in muffler acoustics and design. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **21**, 8695–8716 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05686-6> Ujjal Kalita, Manpreet Singh,
6. Optimization of a reactive muffler used in four-cylinder petrol engine into hybrid muffler by using CFD analysis, *Materials Today: Proceedings*, Volume 50, Part 5, 2022, Pages 1936-1945, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.319>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321061861>)
7. Roy, Tyler. (2011). Muffler characterization with implementation of the finite element method and experimental techniques.
8. Galphade, amit bhalchandra. Investigations on thermoacoustic performance of a muffler in spark ignition engine. Diss. Gujarat technological university.
9. Ranjbar, Mostafa & Arslan, Hakan & Orak, Mehmet. (2018). Effect of Geometry Modification on Sound Transmission Loss in Multi-Chamber Muffler.