Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 11, No. 2, 2024

(Research Article)
Numerical simulation of the effect of the magnetic field on the acoustics of the Muffler chamber of the internal combustion engine

Hadieh Yazdani[1], Jalil Jamali[2*]

1. Department of Mechanical engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Mechanical engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Revised: 2023/10/09, Accepted: 2024/05/12

Abstract

Internal combustion engines due to their wide range of use in various industries, and due to their nature, are always associated with vibrations, which cause noise, which is considered as an irritating environmental factor. Therefore, to control these irritating noises, a silencer is used. There are various varieties of silencers, one of the most essential and extensively used types of silencers are mufflers. On the other hand, many conditions and requirements influence the design of mufflers, and the most optimal mode should be selected. On the other hand, fields such as magnetic fields can affect the efficacy of these systems. Therefore, it is very essential to address this issue and provide optimal solutions, which indicates the necessity of doing it. On the other hand, establishing a magnetic field around the exhaust gas from the muffler causes better control over raucous particles and leads to a better separation of these particles from the output fluid, which leads to a reduction in noise in the muffler chamber. Therefore, in this research, we attempt to use the optimal design of the exhaust chamber in internal combustion engines to investigate the influence of the presence and absence of a magnetic field on acoustics and noise reduction. The optimal design of the exhaust chamber in order to reduce the pollution in the internal combustion engine is one of the main objectives of this research. The effect of magnetism on the physical properties of the fuel, the design of the muffler's acoustic performance, the impact of the magnetic field on the muffler's acoustics are also investigated in this research.

Keywords: Internal Combustion Engine, Exhaust, Magnetic Field.

pp. 66-76 (in Persian)

* Email: jalil.jamali@iau.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران

سال: ۱۴۰۲، دوره: ۱۱، شماره ۲، صفحات: ۶۶-۷۶

شبیه‌سازی عددی تاثیر میدان مغناطیسی بر صوتیّات محفظه مافلر موتور احتراق داخلی

هدیه یزدانی[۱]، جلیل جمالی*[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مکانیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

چکیده

موتورهای احتراق داخلی به دلیل طیف گسترده‌ی استفاده در صنایع مختلف، و با توجه به ماهیت آن‌ها همواره با ارتعاشات همراه هستند که این ارتعاشات سبب بروز نوفه می‌گردد. نوفه به عنوان یک عامل محیطی آزار دهنده محسوب می‌شود. لذا به منظور کنترل این نوفه‌های آزار دهنده از صداگیر استفاده می‌شود. صداگیرها انواع مختلفی دارند که یکی از مهمترین و پرکاربردترین نوع صداگیرها، مافلرها می‌باشند. از یک سو شرایط و الزامات زیادی بر طراحی مافلرها موثر هستند که می‌بایست بهینه‌ترین حالت را انتخاب نمود و از طرف دیگر میدان‌هایی نظیر میدان مغناطیسی می‌تواند بر عملکرد این سامانه‌ها تاثیرگذار باشند. از این رو پرداختن به این مساله و ارائه راهکارهای مطلوب از اهمیت بالایی برخوردار است که ضرورت انجام آن را نشان می‌دهد. برقراری میدان مغناطیسی حول گاز خروجی از مافلر سبب کنترل بهتری بر روی ذرات صدادارشده و منجر به جداسازی بهتر این ذرات از سیال خروجی می‌گردد و این امر منجر به کاهش نوفه در محفظه مافلز می‌گردد. لذا در این پژوهش تلاش می‌گردد که با بهره‌گیری از طراحی بهینه محفظه مافلر در موتورهای احتراق داخلی تاثیر وجود و عدم وجود میدان مغناطیسی را بر صوتیّات و کاهش نوفه بررسی نماییم. طراحی بهینه محفظه مافلر به منظور کاهش آلودگی در موتور احتراق داخلی از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. اثر مغناطیس بر خواص فیزیکی سوخت، طراحی عملکرد صوتین مافلر، اثر میدان مغناطیسی بر صوتیّات مافلر نیز در این پژوهش مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: موتور احتراق داخلی، مافلر، میدان مغناطیسی.

۱. مقدمه

با پیشرفت جوامع بشری و نیاز بیش‌تر به استفاده از موتورهای احتراق داخلی در صنایع گوناگون، تلاش‌های گسترده‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد اینگونه موتورها با هدف کاهش آلایندگی‌های صوتی و زیست محیطی و نیز افزایش بازده صورت گرفته است [۱]. در سال ۲۰۲۰ لیو و همکاران [۲] بیان داشتند، سامانه اگزوز جزء اساسی موتور احتراق داخلی[۱] است که وظیفه کنترل صدای گازهای خروجی را بر عهده دارد، در نتیجه میزان آلودگی صوتی محیطی وسایل نقلیه موتوری را کاهش داده و میزان صدای گاز خروجی را متناسب با نیاز شنوایی انسان تنظیم می‌کند. علاوه بر این ، عملکرد کنترل صدای سامانه اگزوز به طور قابل توجهی به مشخصات منبع (موتور احتراق داخلی) مربوط می‌شود. برای طراحی یک سامانه مافلر[۲] با قابلیت جای‌گیری در یک موتور احتراق داخلی، شناسایی مشخصات منبع از اهمیت زیادی برخوردار است.

صداگیرها به دو دسته کلی تقسیم می‌گردند: ۱) صداگیرهای غیر فعال که صدای مزاحم در آن‌ها با انعکاس و جذب انرژی صوتی میرا می‌گردد. ۲) صداگیرهای فعال که صدای مزاحم را با روش‌های برقی بازخورد[۳] و پیش خور[۴] از بین می‌برند [۳].

صداگیرهای غیر فعال که مافلر نیز نامیده می‌شوند ، خود به دو بخش تقسیم می‌شوند: ۱) مافلرهای واکنشی که امواج صوتی را توسط انبساط ناگهانی مساحت به سمت منبع منعکس می‌کنند. ۲) مافلرهای جذبی که بر مبنای میرایی

* نویسنده پاسخگو: jalil.jamali@iau.ac.ir

[1] Internal-Combustion Engine
[2] muffler
[3] Feedback
[4] Feedforward

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

انرژی صوتیات به گرما توسط تلفات در ماده‌های جاذب صوت عمل می‌کنند. صداگیرهایی نیز برای میرا کردن صدا از هر دو روش بهره می‌برند مانند صداگیرهای با لوله‌های سوراخ‌دار که در درجه اول انرژی صوتی را به سمت منبع منعکس می‌کنند لذا جزء دسته صداگیرهای واکنشی می‌باشند که مقداری از انرژی صوتی را توسط عنصر[1]های صوتی مقاومتی جذب می‌کنند [۴].

موتورهای احتراق داخلی به دلیل طیف گسترده استفاده در صنایع مختلف، و با توجه به ماهیت آن‌ها همواره با ارتعاشات همراه هستند، این ارتعاشات سبب بروز صدا شده که به‌عنوان یک عامل محیطی آزار دهنده محسوب می‌شود. لذا به منظور کنترل این صداهای آزاردهنده از صداگیر استفاده می‌شود. صداگیرها انواع مختلفی دارند که یکی از مهمترین و پرکاربردترین نوع صداگیرها، مافلرها می‌باشند. از طرفی شرایط و الزامات زیادی بر طراحی مافلرها موثر هستند که می‌بایست در بهینه‌ترین حالت انتخاب شوند. از طرف دیگر میدان‌هایی نظیر میدان مغناطیسی می‌تولند بر عملکرد این سامانه‌ها تاثیرگذار باشند. از این رو پرداختن به این مساله و ارائه راهکارهای مطلوب از اهمیت بالایی برخوردار است که ضرورت انجام آن را نشان می‌دهد. با بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام شده در حوزه صوتیات محفظه مافلر مشخص شد که تاکنون در پژوهشی به بررسی تاثیر حضور میدان مغناطیسی در ارزیابی صوتیات مافلر پرداخته نشده‌است که این موضوع نشان دهنده نوآری پژوهش حاضر است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. طراحی مافلر

برای محاسبه مافلر روش‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از آن‌ها روش توصیه شده کمیته (آشرِی ۶.۲)[2] است. این روش چهار گروه برای مافلرها پیشنهاد داده است (جدول ۱) که با در نظر گرفتن نوع کاربری و میزان کاهش صدا می‌توان گروه مناسب را انتخاب نمود. در این پژوهش از گروه فوق بحرانی برای رسیدن به بیشینه کاهش صدا استفاده شده‌است.

جدول ۱ محاسبه مشخصه‌ای مافلر براساس پیشنهاد کمیته آشرِی ۶.۲.

گروه پیشنهادی	طول مافلر به قطر لوله (ورودی)	قطر مافلر به قطر لوله (ورودی)	میزان کاهش صدا dB(A)
صنعتی/تجاری	۵ تا ۶/۵	۲ تا ۲/۵	۱۵ تا ۲۵
مسکونی	۶ تا ۱۰	۲ تا ۲/۵	۲۰ تا ۳۰
بحرانی	۸ تا ۱۰	۳	۲۵ تا ۳۵
فوق بحرانی	۱۰ تا ۱۶	۳	۳۵ تا ۴۵

افت فشار عامل مهمی در انتخاب مافلر است. محاسبه دقیق افت فشار به دلیل ساختار پیچیده مافلر بسیار مشکل است، لذا با استفاده از معادلات افت فشار می‌توان آن را تخمین زد. تخمین آن در یک موتور چهار زمانه با استفاده از سرعت هوا در مافلر انجام می‌شود و نباید از حد مشخصی تجاوز کند.

۲-۲. مدل سازی عددی

برای شبیه‌سازی این موضوع، می‌توان از مدل‌های ریاضی و روش‌های مختلف استفاده کرد. یکی از روش‌های رایج در شبیه‌سازی این نوع سامانه‌ها، استفاده از مدل‌های الکترومغناطیسی و مکانیکی است. در این روش، معادلات ماکسول برای توصیف میدان مغناطیسی و معادلات حرکت برای توصیف جریان گاز درون محفظه مافلر استفاده می‌شوند. برای شبیه‌سازی اثر میدان مغناطیسی بر جریان گاز درون محفظه مافلر، می‌توان از روش‌های ترکیبی بهره برد. یک روش ترکیبی استفاده از معادلات جریان گاز همراه با معادلات مغناطیسی است. برای این منظور، باید معادلات ماکسول را با معادلات نیوتن برای جریان گاز درون محفظه مافلر ترکیب نمود.

هم‌چنین می‌توان از روش‌های شبیه‌سازی جریان گاز با استفاده از معادلات نیوتن و معادلات حرکت گاز استفاده کرد. در این روش، با استفاده از معادلات حرکت گاز درون محفظه مافلر و معادلات مغناطیسی، جریان گاز در حضور میدان مغناطیسی مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.

برای شبیه‌سازی عددی تاثیر میدان مغناطیسی بر صوتیات محفظه مافلر موتور احتراق داخلی، می‌توان از معادلات

[1] element

[2] ASHRAE 6.2

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

مختلفی استفاده کرد. در ادامه، یکی از مدل‌های ریاضی رایج برای این موضوع ارائه می‌شود:

در این مدل، از معادلات حرکت گاز با استفاده از معادلات نیوتن و معادلات مغناطیسی استفاده گردیده است. معادلات حرکت گاز درون محفظه مافلر به صورت زیر می‌باشند [۶-۵]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\rho(u\cdot\nabla)u=-\nabla p+\rho g+\mu\nabla^2 u+f \quad , \qquad (۱)$$

که در این رابطه t زمان، ρ چگالی، u بردار سرعت، g بردار شتاب گرانشی، p فشار گاز، μ ضریب لزجت گاز، ∇ عملگر گرادیان، ∇^2 عملگر لاپلاسین و f بردار نیرو است.

پس از حل معادلات حرکت گاز، معادلات مغناطیسی باید حل شوند. برای محاسبه میدان مغناطیسی، معادلات ماکسول برای میدان برقی و میدان مغناطیسی را در نظر می‌گیریم:

$$\nabla.E=\frac{\rho_c}{\varepsilon_.} \quad , \qquad (۲)$$

$$\nabla.B=0 \quad , \qquad (۳)$$

$$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial t} \quad , \qquad (۴)$$

$$\nabla\times B=\mu_. J+\mu_.\varepsilon_.\frac{\partial E}{\partial t} \quad , \qquad (۵)$$

که در این معادلات، E بردار میدان برقی، B بردار میدان مغناطیسی، ρ_c چگالی بار برقی، ε_0 ثابت برقی (ثابت بولتزمن)، J بردار جریان برقی و μ_0 ثابت مغناطیسی است.

حل معادلات ماکسول در حضور جریان گاز، باعث به وجود آمدن نیروهای الکترومغناطیسی در درون محفظه می‌شود که بر روی گاز اثر می‌گذارد. برای محاسبه این نیروها، از معادله لورنتز استفاده می‌شود [۶-۵]:

$$f_{em}=\rho_c E+J\times B \quad , \qquad (۶)$$

که در این معادله، fem نیروی الکترومغناطیسی است که بر روی گاز اثر می‌گذارد، E بردار میدان برقی، B بردار میدان مغناطیسی، ρ_c چگالی بار برقی و J بردار جریان برقی است.

در این مدل، به عنوان شرط مرزی برای جریان گاز درون محفظه، شرط نوع دوم را در نظر می‌گیریم. هم‌چنین برای حل معادلات، از روش موج استفاده می‌شود. شرایط مرزی نوع دوم، شرایط مرزی نویمن[1] نامیده می‌شوند و بر حسب مشتق ناحیه‌ای یا تغییرات یک متغیر نسبت به محور مشخصی تعریف می‌شوند. به عبارت دیگر، این شرایط مرزی وضعیت تغییرات در مرزها را تعیین می‌کنند.

به‌طور خلاصه، در این مدل ریاضی، معادلات حرکت گاز با استفاده از معادلات نیوتن، معادلات ماکسول برای میدان برقی و میدان مغناطیسی، و معادله لورنتس[2] برای نیروهای الکترومغناطیسی حل می‌شوند.

بعد از حل معادلات، برای تحلیل صوتیات محفظه مافلر می‌توان از معادله موج استفاده نمود. برای گاز در حالت ایده‌آل، معادله موج برای فشار صوتی به صورت زیر است [۷-۵]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}-c^2\nabla^2 p=0 \quad , \qquad (۷)$$

که در این معادله، p فشار صوت و c سرعت صوت در گاز است. با حل این معادله، می‌توانیم تاثیر میدان مغناطیسی بر فشار صوت درون محفظه مافلر را بررسی کنیم.

با استفاده از این مدل ریاضی، می‌توانیم تاثیر میدان مغناطیسی بر صوتیات محفظه مافلر موتور احتراق داخلی را بررسی کنیم. این مدل با در نظر گرفتن تاثیر میدان مغناطیسی بر رفتار جریان گاز و فشار صوتی، به ما این امکان را می‌دهد که عملکرد موتور را بهبود بخشیم و بهینه‌سازی صورت پذیرد.

برای انجام شبیه‌سازی، ابتدا باید شرایط اولیه و شرایط مرزی را تعیین کرد. سپس با استفاده از روش‌های عددی مانند اِف‌ایی‌اِم[3]، می‌توانیم معادلات مربوطه را حل کنیم. در این شبیه‌سازی، باید از شبه‌سنج[4]های مختلفی مانند شدت و جهت میدان مغناطیسی، شدت جریان برقی، چگالی گاز و شرایط مرزی صحیح استفاده کنیم.

با استفاده از شبیه‌سازی، می‌توانیم عملکرد مدل ریاضی را بررسی نمود. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی، می‌توانیم تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان گاز و فشار صوتی را بررسی کنیم و بهینه‌سازی موتور صورت پذیرد.

در نتیجه، با استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی عددی، می‌توانیم تاثیر میدان مغناطیسی بر صوتیات محفظه مافلر موتور احتراق داخلی را بررسی کرده و عملکرد موتور را بهبود بخشیم. در ادامه به محاسبه‌ی جریان گاز داخل سیلندر می‌پردازیم.

[1] Neumann
[2] Lorentz
[3] Finite Element Method
[4] parameter

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

اولین گام در این فرآیند محاسبه جریان گاز داخل سیلندر است که به‌وسیله معادله (۸) انجام می‌شود [۵-۷]:

$$CGF=\frac{\pi\cdot b^{۲}\cdot s\cdot n\cdot N}{(۱۲۲۰۰۰)k} , \qquad (۸)$$

که در آن CGF جریان گاز درون سیلندر(برحسب متر مکعب بر دقیقه)، b قطر سیلندر(بر حسب متر)، s طول کورس پیستون (بر حسب متر)، n سرعت دورانی موتور (برحسب دور بر دقیقه)، N تعداد سیلندر موتور و k تعداد سیکل موتور بوده و برای موتور دو زمانه ۲ و برای موتور چهار زمانه ۴ در نظر گرفته می‌شود.

دومین گام، به دست آوردن جریان گاز ورودی واقعی است که از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۵-۷]:

$$IGF=\frac{CGF\cdot V_E}{۱۰۰} , \qquad (۹)$$

که IGF جریان گاز واقعی داخل اگزوز (برحسب متر مکعب بر دقیقه) و V_E بازده حجمی موتور (بر حسب درصد) است و برای موتورهای بدون توربو شارژر و سوپر شارژر ۸۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

سومین گام، محاسبه جریان گاز واقعی اگزوز با استفاده از رابطه (۱۰) است:

$$EGF=IGF\cdot\frac{T_e}{T_i} , \qquad (۱۰)$$

که EGF جریان گاز واقعی داخل اگزوز (متر مکعب بر دقیقه)، T_e دمای داخل اگزوز (برحسب رانکین) و T_i دمای ورودی (بر حسب رانکین) است.

چهارمین گام، سرعت گاز درون مافلر که با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$V_s=\frac{EGF}{A} , \qquad (۱۱)$$

که در آن Vs سرعت گاز درون اگزوز (برحسب متر بر دقیقه) و A سطح مقطع مافلر (برحسب متر مربع) است. و در پایان افت فشار است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta p=C\left(\frac{V_s}{۷۹/۸\times۱۰^{۴}}\right)^{۲}\left(\frac{۵۳۰}{T_.}\right) . \qquad (۱۲)$$

۲-۳. مدلسازی‌با استفاده از جدول شدت میدان مغناطیسی و شدت جریان برقی:

در این مدل، از جدول شدت میدان مغناطیسی و شدت جریان برقی برای محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی درون محفظه مافلر استفاده می‌شود. جدول شدت میدان مغناطیسی و شدت جریان برقی به صورت زیر است:

جدول۲ شدت جریان برقی.

شدت جریان برقی(A/m^۲)	شدت میدان مغناطیسی(T)
۱۰۰	۰/۵
۲۰۰	۱/۰
۳۰۰	۱/۵
۴۰۰	۲/۰
۵۰۰	۲/۵

برای محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی، از معادله لورنتز استفاده می‌شود:

$$f_{em}=\rho cE+J\times B , \qquad (۱۳)$$

که در این معادله، f_{em} نیروی الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.

۲-۴. مدلسازی با استفاده از جدول چگالی گاز و شرایط مرزی:

در این مدل، از جدول چگالی گاز و شرایط مرزی برای حل معادلات حرکت گاز استفاده می‌شود. جدول چگالی گاز به صورت زیر است:

جدول ۳ چگالی گاز.

چگالی گاز(kg/m^۳)	شرایط مرزی
۱	ورودی
۱	خروجی
۲	دیواره محفظه
۱/۵	دیواره پوسته

در این جدول، شرایط مرزی شامل ورودی و خروجی محفظه و دیواره‌های محفظه و پوسته است که در زیر توضیح داده شده‌اند. هم‌چنین چگالی گاز بر حسب واحد کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده‌است. با استفاده از این جدول و شرایط مرزی، می‌توانیم معادلات حرکت گاز را حل کرده و تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان گاز و فشار صوت را بررسی کنیم.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

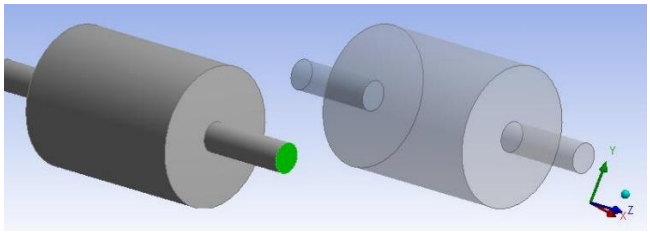
شبه‌سنج‌های مرتبط با شرایط مرزی بصورت زیر می‌باشد:

۱. شـــرط مرزی ورودی: چگالی گاز در ورودی محفظه برابر با ۱ کیلوگرم بر متر مکعب است.
۲. شرط مرزی خروجی: چگالی گاز در خروجی محفظه نیز برابر با ۱ کیلوگرم بر متر مکعب است.
۳. شـــرط مرزی دیواره محفظه: چگالی گاز در دیواره محفظه برابر با ۲ کیلوگرم بر متر مکعب است.
۴. شـــرط مرزی دیواره پوســـته: چگالی گاز در دیواره پوسته نیز برابر با ۱.۵ کیلوگرم بر متر مکعب است.

۳. نتایج

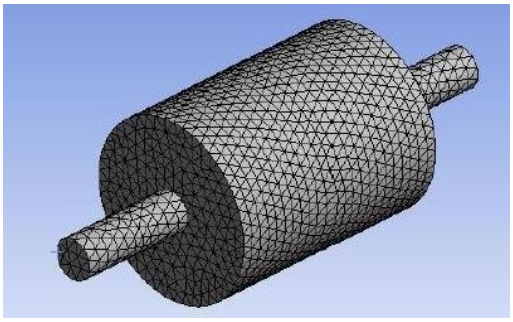
هندســـه مدل را می‌توان به راحتی با اســـتفاده از مدل‌ســـاز طراحی در نرم‌افزار آنســـیس[1] ایجاد کرد و ســـپس اِفاییِ‌ای[2] با اســـتفاده از حل‌کننده آنســـیس انجام می‌شـــود که در آن تحلیل‌های مختلفی می‌توان انجام داد. محیط فیزیکی که صدا از آن عبور می‌کند، حفره صداخفه‌کن است.

بنابراین، آنچه که قرار است مدل شود، حفره صداخفه‌کن (نه ورق فولادی خود صداخفه‌کن) است که در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ صداخفه‌کن انعکاسی استوانه‌ای ساده.

جعبه ابزار تحلیل[3] هم‌ساز[4] آنسیس برای انجام تجزیه و تحلیل تلفات انتقال صداخفه‌کن استفاده می‌شود. مدل ساخته شد و شرط مرزی اعمال شد و سپس برای مشاهده نتایج و مقایسه آن با نتایج تحلیلی، مساله حل می‌شود. مدل با یک عنصر از نوع فلوید۲۲۱[5] و اندازه مش یکنواخت همانطور که در شکل ۲ نشان داده شد، مش‌بندی شده‌است.



شکل ۲ مش‌بندی مدل مافلر.

۳-۱. تنظیمات آنالیز:

بازه بسامد: برای تحلیل صدا، بازه بسامد از ۰ تا ۳۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شده‌است. این بازهه بسامد برای محاسبه نتایج به فواصل زیر تقسیم می‌شود. در اینجا، نتایج در هر ۵۰ هرتز با تعریف فواصل ۶۰ محاسبه خواهند شد.

روش حل: برای تجزیه و تحلیل صوتیات ، فقط روش هم‌ساز کامل[6] قابل اســـتفاده اســـت. این روش برای حل معادلات صـوتیات اسـتفاده شـده و نتایج دقیق‌تری را در اختیار ما قرار می‌دهد.

تعریف صـــوتیات بدنه: برای تعریف صـــوتیات بدنه، ما نیاز به انتخاب یک مدل داریم. انتخاب مدل به معنای تعیین چگالی، جرم و سـرعت صـوت در بدنه اسـت. در اینجا، برای محاسـبات صوتیات ، از هوا به عنوان واسطه متوسط[7] استفاده می‌شود که چگالی، جرم و سرعت صوتی آن مشخص است.

۳-۲. اثر مغناطیس بر خواص فیزیکی سوخت:

مولکول‌های مایع یا گاز دارای بار برقی مثبت و منفی هســتند و اتم‌های مایع یا گاز به ســمت یکدیگر جذب شــده و تشــکیل خوشه می‌دهند. میدان مغناطیسی که توسط آهنربای دائمی یا برقی ایجاد شده، بر ترکیب شیمیایی سوخت تاثیر می‌گذارد و باعث تبدیل ســاختار تصــادفی مایع یا گاز به ســاختار ســازمان یافته و زنجیره‌ای تنظیم شـــده‌ای می‌شـــود، که تقریباً به یونیزاســـیون اشـــاره دارد. وقتی ســـوخت در معرض میدان مغناطیســـی قرار می‌گیرد، ترکیب شـــیمیایی ســـوخت توانایی پاســـخ دهی به هوا در آن افزایش می‌یابد و ترکیبی منظم در

[1] ANSYS
[2] Finite Element Analysis
[3] analysis
[4] harmonic

[5] FLUID221
[6] Complete Harmonic
[7] medium

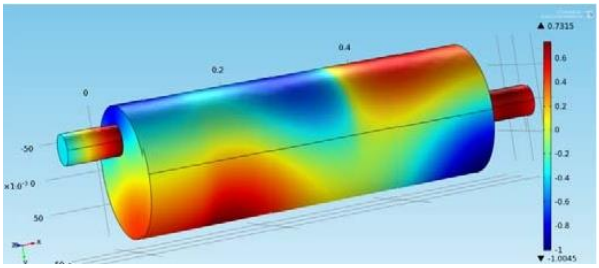
[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

سراسر حجم تزریق سوخت در محفظه احتراق ایجاد می‌نماید. این امر باعث کاهش کشش سطحی سوخت می‌شود، و در نتیجه تحت تاثیر میدان مغناطیسی، اندازه قطرات سوخت در فرآیند تزریق کاهش می‌یابد. در نهایت، میدان مغناطیسی باعث کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده حرارتی موتور می‌شود.

در ادامه، نتایج تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی بر عملکرد موتورهای احتراقی تراکمی ارائه می‌شود. متغیرهای عملیاتی اولیه تحت تأثیر میدان مغناطیسی در احتراق جرقه، شامل توان شکست، مصرف سوخت خاص، انتشار موتور و شدت میدان مغناطیسی هستند [۴-۶]. توان شکست، میزان قدرت یا انرژی است که برای شکستن اتم‌ها و ایجاد واکنش شیمیایی مورد نیاز است [۸].

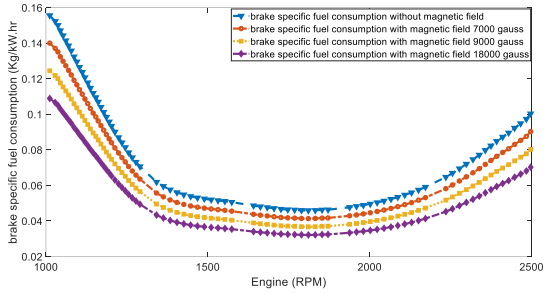
در موتورهای احتراق داخلی، ممکن است به انرژی لازم برای شروع واکنش احتراق اشاره داشته باشد به طور خلاصه، نتایج عمده از طریق اظهارات پایانی زیر ارائه می‌شود:

در شکل ۳، خطوط فشار صوتیات بر روی بسامد قطع نشان داده شده‌است. می‌توان مشاهده کرد که رزونانس‌های محوری و حالت‌های انتشار عرضی توسط صداخفه‌کن در این بسامد پشتیبانی می‌شوند.

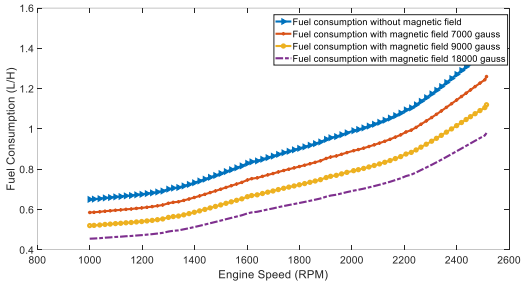


شکل ۳ فشار صوتی کل در بسامدهای مختلف.

میدان مغناطیسی سوخت مخصوص ترمز و مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مصرف سوخت ویژه ترمز و مصرف سوخت کاهش می‌یابد [۴,۹]. حداکثر کاهش مصرف سوخت در هنگام استفاده از میدان مغناطیسی دارای شدت (۱۸۰۰۰،۹۰۰۰،۷۰۰۰) گاوس، به ترتیب (۷.۱۴درصد، ۱۳.۶۳درصد، ۱۵.۷۱درصد) است که در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌است. این روند به این نسبت داده شد که میدان مغناطیسی کشش سطحی دیزل را القا کرده و یک مخلوط همگن را تشکیل داده است.



شکل ۴ رابطه بین سرعت موتور و مصرف سوخت ویژه ترمز بی‌اِس‌اِف‌سی [1].



شکل ۵ همبستگی بین سرعت موتور و مصرف سوخت (لیتر بر ساعت) موتور.

۳-۳. طراحی عملکرد صوتیات مافلر

صوتیات مافلر، یک سامانه صوتی است که به‌صورت خاص در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود. عملکرد صوتیات مافلر برای کاهش نوفه و افزایش کارایی موتور است. در طراحی عملکرد صوتیات مافلر، ابتدا باید طرح محفظه مافلر را طراحی کرد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی عددی، می‌توانیم تاثیر طرح محفظه مافلر بر جریان گاز و فشار صوتی را بررسی کنیم و عملکرد صوتیات مافلر را بهینه‌سازی کنیم.

در طراحی محفظه مافلر، باید ابعاد محفظه و مقدار جابجایی هوا را به گونه‌ای انتخاب کرد که موج صوتی درون محفظه با موج صوتی خارج از محفظه تداخل کرده و باعث کاهش فشار صوتی شود. در این سامانه، موج صوتی از سمت دهانه ورودی وارد محفظه می‌شود و در سمت خروجی تداخل می‌کند و فشار صوتی را کاهش می‌دهد.

[1] Brake-Specific Fuel Consumption

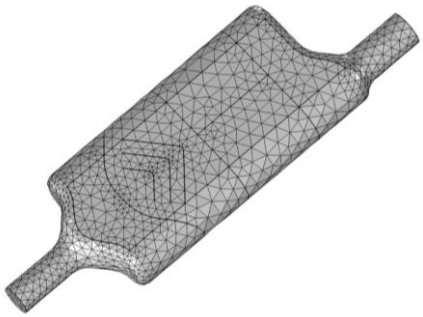
[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

برای طراحی عملکرد صوتیات مافلر، باید از روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی عددی استفاده کرد. در روش تحلیلی، با استفاده از معادلات حرکت گاز و معادله موج، می‌توانیم تاثیر طرح محفظه مافلر بر جریان گاز و فشار صوتی را بررسی کنیم. در روش شبیه‌سازی عددی، با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، می‌توانیم محفظه مافلر را به صورت سه‌بعدی طراحی کرده و تاثیر آن بر جریان گاز و فشار صوتی را بررسی کنیم.

صداخفه‌کن‌های واکنشی برای انعکاس امواج صوتی تولید شده توسط موتور طراحی شده‌اند تا امواج صوتی را تا حدی خنثی کنند. این پدیده به عنوان اصل تداخل مخرب[1] نامیده می‌شود. امواج صوتی اولیه تولید شده از صدای موتور هدایت می‌شوند تا موج صوتی منعکس‌شده مشابه و مخالف دیگری در داخل اتاقک‌های انبساط تولید کنند. این امواج هنگام برخورد با یکدیگر تداخل مخربی ایجاد می‌کنند که منجر به حذف صدا می‌شود. یک صداخفه‌کن واکنشی شامل چندین محفظه است که با لوله‌های استوانه‌ای به هم متصل شده‌اند تا بازتاب صدا را در هر اتصال ایجاد کنند. عدم تطابق امپدانس و انعکاس موج صوتی برخوردی باعث می‌شود که انرژی صوتی به منبع بازگردانده شود و از این رو تا حدی صدای موتور در داخل صداخفه‌کن کاهش یابد. اگرچه صداخفه‌کن‌های واکنشی برای کاهش صدای موتور طراحی شده‌اند، اما مستعد ایجاد فشار برگشتی سنگین هستند. فشار برگشتی[2] در موتورهای احتراق داخلی، به فشار اضافی‌ای اشاره دارد که به وسیله سامانه خروجی گازهای احتراقی مانند مافلر یا کاتالیزور به جریان گازهای خروجی وارد می‌شود. این فشار اضافی می‌تواند بر روند خروج گازهای احتراقی از سیلندرهای موتور اثر بگذارد و موجب کاهش کارایی موتور شود. در واقع، فشار برگشتی موجب می‌شود تا بخارات گازی باقی مانده از احتراق قادر به خروج از سیلندر نباشند که این امر می‌تواند به کاهش قدرت موتور و افزایش مصرف سوخت منجر شود [۱,۶].

مشخص شده‌است که کاهش صدا با فشار برگشتی نسبت معکوس دارد. به دلیل فشار برگشتی، راندمان حجمی کاهش می‌یابد و مصرف سوخت خاص افزایش می‌یابد که منجر به عملکرد پایین موتور می‌شود. سوخت خاص، یک معیار کارایی برای موتورها است و به مقدار سوخت مصرفی برای تولید یک واحد قدرت در یک واحد زمان اشاره دارد. این مقدار معمولاً به صورت گرم بر کیلووات ساعت[3] یا پوند بر اسب بخار ساعت[4] اندازه‌گیری می‌شود.

از این رو یک طراحی بهینه صداخفه‌کن باید اجرا شود تا حداکثر کاهش صدا و حداقل فشار برگشتی ممکن بدون تأثیر بر عملکرد موتور وجود داشته باشد. یک صداخفه‌کن واکنشی بهینه را می‌توان با چیدمان خاصی از محفظه انبساط و لوله‌ها طراحی نمود، که یک فرآیند تکراری می‌باشد که با روش‌های سنتی (ساخت و تست) دنبال می‌شود. روش‌های سنتی (ساخت و تست) صداخفه‌کن‌ها برای به دست آوردن نتایج مطلوب، گران و زمان بر هستند. با پیشرفت‌های اخیر در طراحی به کمک کامپیوتر و مهندسی به کمک کامپیوتر، می‌توان عملکرد صداخفه‌کن را با شبیه‌سازی مجازی پیش‌بینی کرد.

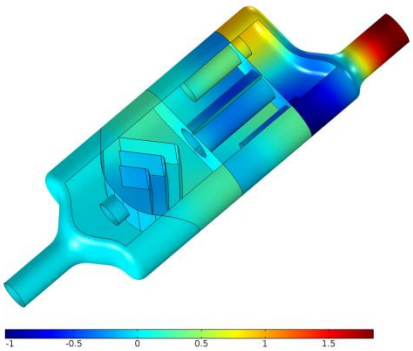


شکل ۶ مدل مش‌بندی مافلر مورد بررسی.

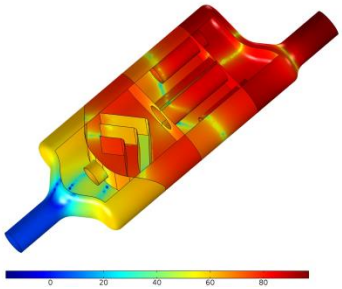
عملکرد طراحی صداخفه‌کن واکنشی به صورت عددی تحلیل می‌شود و نتایج شبیه‌سازی به صورت گرافیکی به صورت زیر نمایش داده شده‌است. شکل ۷ میدان فشار صوتیات را نشان می‌دهد، شکل ۸ سطح فشار صوت را نشان داده و شکل ۹ سطح فشار را در صداخفه‌کن در بسامد ۱۳۵۰ هرتز ترسیم می‌کند.

[1] Harmful interference
[2] Back pressure
[3] g/kWh
[4] lb/hph

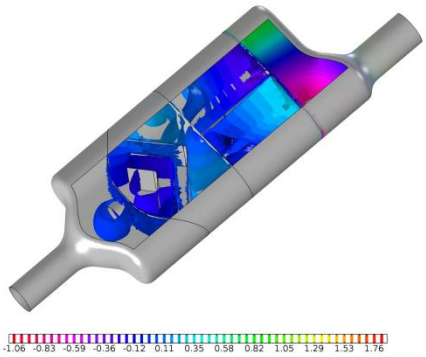
[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]



شکل ۷ میدان فشار صوتیات در ۱۳۵۰ هرتز.

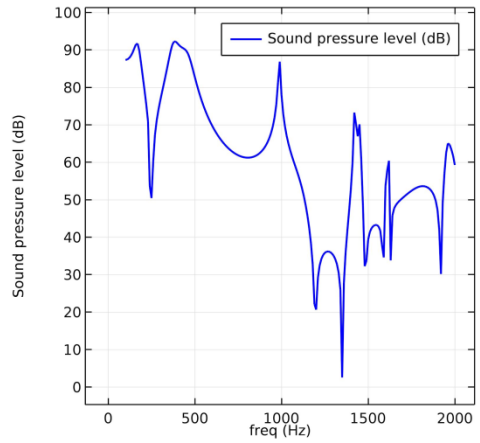


شکل ۸ سطح فشار صدا در ۱۳۵۰ هرتز.

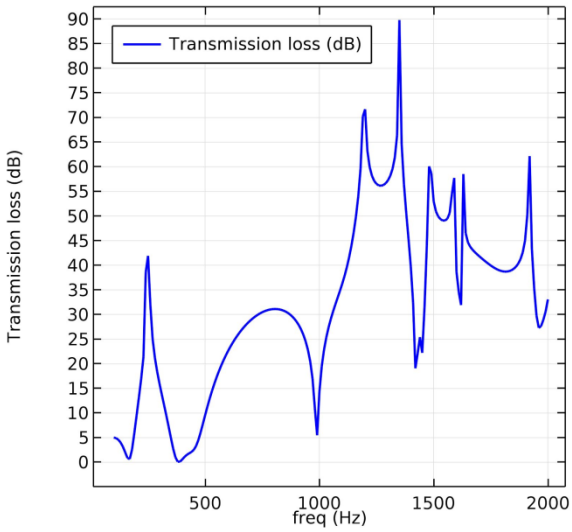


شکل ۹ نمودار هم سطح میدان فشار در ۱۳۵۰ هرتز.

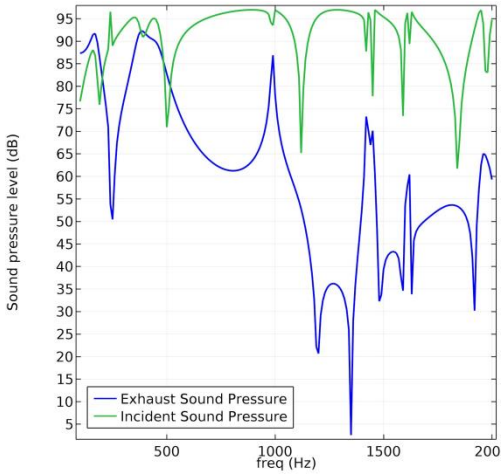
نتایج محاسبه شده از مطالعه شبه‌سنجی طراحی صداخفه‌کن به صورت گرافیکی در زیر ارائه شده‌است. شکل ۱۰ منحنی سطح فشار صوت را به عنوان تابعی از بسامد ترسیم می‌کند. شکل ۱۱ اثرات میرایی در صداخفه‌کن را نشان می‌دهد و در شکل ۱۲ مقادیر فشار صدای برخورد و خروجی اگزوز به ترتیب مقایسه شده‌است. حداقل فشار صدای اگزوز ۲.۵ دسی بل در لوله اگزوز، به نسبت تلفات انتقال بالاتر ۹۰ دسی بل، در بسامد ۱۳۵۰ هرتز به دست می‌آید.



شکل ۱۰ سطح فشار صدا.



شکل ۱۱ تلفات انتقال (TL).



شکل ۱۲ مقایسه سطح فشار صدا.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، می‌توانیم طرح محفظه مافلر را بهینه‌سازی کنیم. در اینجا باید به عواملی مانند شکل و اندازه محفظه، شرایط مرزی و جریان گاز درون محفظه توجه کنیم. در طراحی عملکرد صوتیات مافلر، باید مطمئن شویم که جریان گاز درون محفظه به گونه‌ای جریان پیدا کند که بتواند با موج صوتی خارج از محفظه تداخل کند و فشار صوتی را کاهش دهد.

ابتدا، محفظه مافلر با ابعاد ۲۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر طراحی شد و شرایط مرزی آن تعیین شد. در این مدل، فشار گاز و دمای جریان ورودی ۱ بار و ۳۰۰ کلوین بود. هم‌چنین، برای جریان خروجی، شرط آزاد شدن گاز استفاده شد.

بعد از اجرای شبیه‌سازی، که نتایج حاصله شامل فشار صوتی و جریان گاز در داخل محفظه مافلر بوده‌اند و با توجه به این نتایج، می‌توانیم طرح محفظه را بهینه‌سازی کنیم.

یکی از روش‌های بهینه‌سازی طرح محفظه، تغییر ابعاد محفظه است. با تغییر ابعاد محفظه، می‌توانیم جریان گاز درون محفظه را بهینه کنیم و موج صوتی درون محفظه با موج صوتی خارج از محفظه تداخل کند و فشار صوتی را کاهش دهد.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، اندازه محفظه را به ۲۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر تغییر دادیم و شبیه‌سازی را مجدداً اجرا کردیم. نتایج حاصله نشان داد که با این تغییر، جریان گاز بهینه شده و فشار صوتی کاهش یافته است.

در نهایت، با توجه به نتایج حاصله، طرح محفظه مافلر بهینه شده و برای استفاده در موتور احتراق داخلی قابل استفاده گردید.

در این بخش، نتایج بهینه‌سازی طرح‌های مختلف محفظه مافلر در جداول ارائه شده است:

جدول ۴ جریان گاز در داخل محفظه مافلر.

جریان گاز (متر مکعب در ثانیه)	طول محفظه (سانتی‌متر)
۰٫۱۳	۲۰
۰٫۰۹	۲۵

جدول ۵ فشار صوتی در داخل محفظه مافلر.

فشار صوتی (پاسکال)	طول محفظه (سانتی‌متر)
۱۲۳	۲۰
۱۱۰	۲۵

با توجه به جداول بالا، مشخص است که با افزایش ابعاد محفظه، جریان گاز درون محفظه بهبود یافته و فشار صوتی در داخل محفظه نیز کاهش یافته است. به همین دلیل، تغییر ابعاد محفظه از ۲۰×۱۰×۱۰ به ۲۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر به عنوان طرح بهینه برای صوتیات مافلر پیشنهاد شده‌است. در ادامه تاثیر میدان مغناطیسی بر صوتیات محفظه مافلر بهینه‌شده را به صورت جداول مختلف ارائه می‌دهیم:

جدول ۶ تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر جریان گاز در داخل محفظه مافلر.

جریان گاز (متر مکعب در ثانیه)	شدت میدان مغناطیسی (تسلا)
۰٫۱۳	۰٫۵
۰٫۱۳	۱٫۰
۰٫۱۲	۱٫۵
۰٫۱۱	۲٫۰
۰٫۱۰	۲٫۵

جدول ۷ تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر فشار صوتی در داخل محفظه مافلر.

فشار صوتی (پاسکال)	شدت میدان مغناطیسی (تسلا)
۱۲۳	۰٫۵
۱۲۳	۱٫۰
۱۲۲	۱٫۵
۱۲۱	۲٫۰
۱۲۰	۲٫۵

با توجه به جداول بالا، تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر جریان گاز در داخل محفظه و فشار صوتی در داخل محفظه قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، جریان گاز درون محفظه کاهش یافته و فشار صوتی نیز کاهش یافته است. برای بهینه‌سازی عملکرد صوتیات مافلر با استفاده از میدان مغناطیسی، می‌توان از شدت مغناطیسی ۰٫۵ تسلا استفاده کرد.

۴. بحث و مقایسه

مطالعه تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر صوتیات محفظه صداخفه‌کن در موتورهای احتراق داخلی، تقاطع جدیدی از علم فیزیک، مهندسی و محیط زیست را نشان می‌دهد. این تحقیق با بررسی چگونگی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر عملکرد صوتی

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

صداخفه‌کن‌ها، با هدف کاهش آلودگی صوتی و افزایش کارایی موتورهای احتراق داخلی، به مجموعه دانش کمک می‌کند.

منحصر به فرد این تحقیق در رویکرد جامع آن به مطالعه اثرات میدان‌های مغناطیسی بر صوتیات صداخفه‌کن است، منطقه ای که اکتشافات بازهی را به خود دیده است. برخلاف مطالعات مرسوم که صرفاً بر روی طراحی و بهینه‌سازی مواد صداخفه‌کن‌ها برای کاهش نوفه متمرکز شده‌اند، این مطالعه دیدگاه جدیدی را با ترکیب میدان‌های مغناطیسی به عنوان شبه‌سنجی برای بهبود عملکرد صوتیات معرفی می‌کند. این رویکرد نوآورانه نه تنها راه‌های جدیدی را برای طراحی صداخفه‌کن باز می‌کند، بلکه به توسعه موتورهای احتراق داخلی کارآمدتر و سازگار با محیط زیست کمک می‌کند.

۴-۱. مقایسه با تحقیقات موجود

مطالعات قبلی عمدتاً بر جنبه‌های مکانیکی و مادی طراحی صداخفه‌کن، مانند استفاده از لوله‌های سوراخ دار، تشدید کننده‌ها و مواد جاذب برای کاهش نوفه متمرکز شده‌اند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۸ ژو و سان [۴] بر اثربخشی لوله‌های موجدار U شکل در صداخفه‌کن‌های واکنشی برای افزایش عملکرد صوتی تأکید کردند. به طور مشابه، در سال ۲۰۱۹ گوپتا و میشرا [۸] بهینه‌سازی ویژگی‌های انتشار را در کنار کاهش نوفه در موتورهای جرقه‌زنی بررسی کردند.

در مقلبل، این تحقیق مفهوم میدان‌های مغناطیسی را برای دستکاری خواص صوتی جریان اگزوز در محفظه صداخفه‌کن ادغام می‌کند .پشتوانه نظری این است که وجود میدان مغناطیسی می‌تواند بر رفتار ذرات باردار و مولکول‌ها در گازهای خروجی تأثیر بگذارد و به طور بالقوه منجر به کنترل بهتر و کاهش نوفه خروجی شود. این فرضیه بر اصول بنیادی الکترومغناطیس و دینامیک سیالات استوار است و رویکردی بین رشته‌ای را به نمایش می‌گذارد که آن را از دیدگاه‌های مکانیکی محور مطالعات قبلی متمایز می‌کند.

جدول ۸ مقایسه پژوهش حاضر با کارهای پیشین.

معیار	پژوهش حاضر	سان و ژو ۲۰۱۸	گوپتا و میشرا ۲۰۱۹
نوآوری	استفاده از میدان مغناطیسی برای کنترل صوتیات محفظه مافلر	تأکید بر اثربخشی لوله‌های موجدار Uشکل در صدا خفه‌کن‌های واکنشی	بهینه‌سازی ویژگی‌های انتشار در کنار کاهش نوفه در موتورهای جرقه‌زنی
هدف	کاهش آلودگی صوتی و بهبود کارایی موتورهای احتراق داخلی با استفاده از میدان‌های مغناطیسی	افزایش عملکرد صوتیات صدا خفه‌کن با استفاده از لوله‌های موجدار	بهینه‌سازی انتشار و کاهش نوفه موتور با تغییرات طراحی و مواد
رویکرد	شبیه‌سازی عددی و تحلیلی	تجربی و تحلیلی	تجربی و تحلیلی
یافته‌ها	میدان‌های مغناطیسی می‌توانند بر خواص صوتی محفظه مافلر تأثیر مثبت بگذارند	بهبود قابل توجه در عملکرد صوتیات صدا خفه‌کن	کاهش نوفه و بهبود ویژگی‌های انتشار با تغییرات طراحی
تفاوت کلیدی	تمرکز بر تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر صوتیات بدون تغییر فیزیکی در ساختار مافلر	استفاده از ساختار فیزیکی خاص برای کنترل صوتیات	بهینه‌سازی مکانیکی و مواد برای کاهش صدا

۵. نتیجه گیری

- مافلر انعکاسی یکی از بهترین روش‌های کاهش صدای موتور است.
- با افزایش سرعت دورانی موتور از ۱۴۰۰ تا ۲۲۰۰ دور بر دقیقه تراز صدای کلی افزایش پیدا کرد.
- در بین سوخت‌های مورد استفاده بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تراز صدای کلی به‌ترتیب مربوط به سوخت بی۱۸[1] و بی۲۴[2] می‌باشد.

نتیجه استفاده از میدان مغناطیسی بر عملکرد موتور احتراق تراکمی، برای انواع دور موتور و شدت میدان مغناطیسی را می‌توان به صورت زیر نتیجه گرفت:

الف) میدان مغناطیسی سوخت و مصرف سوخت ویژه را کاهش می‌دهد.

[1] B8

[2] B4

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]

ب) استفاده از میدان مغناطیسی باعث افزایش بازده حرارتی موتور به دلیل افزایش راندمان احتراق در داخل محفظه احتراق می‌شود.

یافته‌های این تحقیق با نشان دادن اینکه میدان‌های مغناطیسی می‌توانند به طور موثری بر خواص صوتی محفظه‌های صداخفه‌کن تأثیر بگذارند، به این میدان کمک می‌کنند و منجر به کاهش نوفه می‌شوند .این نه تنها مدل نظری را تایید می‌کند، بلکه چارچوبی عملی برای طراحی صداخفه‌کن‌های نسل بعدی که میدان‌های مغناطیسی را برای کنترل نوفه محیطی در خود جای می‌دهند، فراهم می‌کند.

علاوه بر این، این مطالعه بر اهمیت رویکردهای بین رشته‌ای در حل چالش‌های مهندسی معاصر، به ویژه در حوزه طراحی موتور احتراق داخلی و پایداری محیطی تأکید می‌کند.

تضاد منافع

این مطالعه تضاد منافع ندارد.

تقدیر و تشکر

در اینجا از راهنمایی‌های دلسوزانه آقای دکتر جلیل جمالی تقدیر و تشکر به عمل می‌آورد.

فهرست منابع

[1] A. Nassiri-Toosi, S. Hasanpour, “Recovery of exhaust waste heat for an ICE using a Stirling engine combined cycle,” Modares Mechanical Engineering, vol. 18, no. 2, pp. 359–370, 2018.

[2] H. Liu, Y. Chen, Q. Xiao, “Numerical and experimental analysis of the effect of acoustic loads on the source characterization for an internal combustion engine exhaust system,” IEEE Access, vol. 8, no. 1, pp. 172951–172961, 2020.

[3] A. Chafidz, C. Widyastuti, V. Augustia, K. Nisa, “Application of copper-zinc metal as a catalytic converter in the motorcycle muffler to reduce the exhaust emissions,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 167, no. 1, pp. 1-8, 2018.

[4] F. Xue, B. Sun, “Experimental study on the comprehensive performance of the application of U-shaped corrugated pipes into reactive mufflers,” Applied Acoustics, Vol. 141, no. 1, pp. 362-370, 2018.

[5] R. Ahmadi, L. Kazemi, “Analysis of the acoustic performance of a vehicle muffler with a perforated tube and investigation of the effects of sound-absorbing materials in the muffler shell,” 4th National Conference on Mechanical Engineering, Civil Engineering, and Advanced Technologies, 2018.

[6] H. Jafari, M. Baloo, A. Tahaei, J. Nourozi, “Examination of the production process factors of the gudgeon pin affecting abnormal noise in an internal combustion engine,” 11th International Conference on Internal Combustion Engines and Oil, 2018.

[7] Z. Ghourbani, M. Siefee, S. Biegee, B. Ghobadian, “Study on the effect of using a combined muffler on reducing the noise of a small gas-powered generator engine,” 11th National Congress of Bio-System Engineering and Mechanization of Iran, 2018.

[8] A. Gupta, P. Mishra, “Optimization of emission characteristics of spark ignition engine with chambered straight muffler running in methanol blend: An engine development technique for environmental sustainability,” Journal of Cleaner Production, Vol. 238, no. 20, pp. 117778-117786, 2019.

[9] T. George, H. Raj, “Energy efficient design and modification of an automotive exhaust muffler for optimum noise, transmission loss, insertion loss and back pressure: a review,” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 377, no. 1, pp. 1-12, 2018.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-03]