

طراحی و ارائه نمونه صداخفه‌کن مناسب برای موتور احتراق داخلی سنگین

سید مصطفی میرطبائی رئیس دایره مهارت‌آموزی دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران mirtabaei@iamu.ac.ir	مهدی پورسیفی استادیار دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران m_pourseifi@yahoo.com	مهدی نامی خلیله‌ده* دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه تبریز Mahdi.nami@tabrizu.ac.ir
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۹

دریافت: ۱۴۰۳/۶/۵

چکیده

هدف اصلی این مقاله، طراحی و ارائه یک صداخفه‌کن نوآورانه است که با شکستن فرکانس‌های صوتی ناشی از حرکت سیال در خروجی اگزوز خودروهای سنگین، صدای تولیدی را حداقل ۵۰ دسی‌بل کاهش دهد. این کاهش صدا، به بهبود تمرکز و آرامش اپراتور در هنگام انجام مأموریت کمک می‌کند. در این مطالعه، پس از بررسی سه نوع صداخفه‌کن، صداخفه‌کن‌های جذبی به دلیل استفاده از مواد جاذب متخلخل برای جذب امواج صوتی عبوری انتخاب و تحلیل شدند. این صداخفه‌کن برای موتور OM457 شرکت صنعتی ایدم^۱ طراحی شده است و توانایی کار در دمای اگزوز ورودی تا ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد و توان خروجی تا ۳۱۵ کیلووات را دارد. این سیستم بهینه‌سازی شده است تا حداقل افت فشار ۵۰ میلی‌بار را با فشار نسبی تخلیه ۱۸۵ میلی‌بار و فشار نسبی ورودی ۴۰۰ میلی‌بار تضمین کند. نوآوری این طراحی در کاهش موثر صدا با حفظ کارایی موتور و افت فشار حداقلی می‌باشد.

واژگان کلیدی: صداخفه‌کن، اگزوز، افت انتقال، موتور احتراق داخلی، لوله روزنه‌دار

۱. مقدمه

به‌سلامت اپراتورها آسیب می‌رساند بلکه باعث ایجاد مزاحمت‌های صوتی در محیط‌های کاری و شهری می‌شود. در این راستا، استفاده از صداخفه‌کن‌ها به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های مؤثر برای کاهش صدا همواره مورد توجه مهندسان و پژوهشگران بوده است.

در صنعت خودروهای سنگین و ماشین‌آلات صنعتی، صداهای تولیدی از موتور و سیستم‌های تخلیه گازهای اگزوز یکی از مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی و بهره‌برداری به شمار می‌آید. صدای زیاد نه‌تنها

* نویسنده مسئول

تاکنون دو نوع اصلی از صداخفه‌کن‌ها، یعنی تشدیدکننده و جذبی، در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. صداخفه‌کن‌های تشدیدکننده عمدتاً در سیستم‌های احتراق داخلی کاربرد دارند و صدا را از طریق تشدید فرکانس‌های صوتی کاهش می‌دهند. در مقابل، صداخفه‌کن‌های جذبی از طریق جذب انرژی صوتی و تبدیل آن به انرژی گرمایی، عملکرد بهتری در کاهش صدا دارند [1].

با توجه به اهمیت بهینه‌سازی عملکرد موتورهای سنگین و کاهش صدا بخصوص کمبود دانش و تجهیزات مربوط به کاهش آلودگی صوتی ماشین آلات سنگین در داخل کشور، هدف این تحقیق طراحی یک صداخفه‌کن جذبی نوآورانه است که بتواند با کاهش صدای خروجی آگزوز خودروهای سنگین، کارایی سیستم تخلیه را حفظ کرده و تمرکز و آرامش اپراتورها را بهبود بخشد. ابعاد این پژوهش در درجه اول برای رفع نیاز داخلی صنایع بوده و در مرحله بعدی با هدف استفاده از دستگاه تولیدی برای صادرات در بازارهای بین‌المللی است.

به‌منظور دستیابی به جذب صدای خوب در یک باند فرکانسی گسترده، مواد فیبری مختلف به‌عنوان مثال پشم‌ها از جمله پشم سنگ معمولاً اجرا می‌شوند که مقاوم در برابر حرارت و اشتعال می‌باشند و قسمت عمده و مشهود عمل خفه کردن صدا در این نوع مدل از صداخفه‌کن‌ها، تغییر انرژی صوتی به انرژی گرمایی می‌باشد که این تبدیل در لایه‌های ماده جذبی رخ می‌دهد که کیفیت ماده جاذب آن، دلیل اصلی و پایه برای طراحی موفق صداخفه‌کن است [2].

پاولو و همکاران به توسعه یک صداخفه‌کن با کاهش نویز و ویژگی‌های هیدرولیک پرداختند، آنها باید

پارامترهای اصلی را برای داده‌های پایه و همچنین برای ارزیابی غیرمستقیم راه‌حل‌های فنی پیشنهادی برای عایق صدا داشته باشند لذا پارامترهایی مانند پارامترهای صوتی و هیدرولیکی موتور احتراق داخلی سیستم آگزوز کم قدرت بدون صداخفه‌کن را پیشنهاد کردند [3]. کابرال و همکاران بر روی نوع مدرن عنصر آکوستیک جذبی که یک عنصر میکرو سوراخ شده است متمرکز شدند که جذب در عنصر میکرو سوراخ شده عمدتاً از اثر چسبناک داخل دهانه‌ها، ریختن گرداب آکوستیک غیرخطی و تکرار جریان ناشی می‌شود. نتایج پتانسیل خوبی را برای عناصر ریز سوراخ توسعه یافته نشان می‌دهد و همچنین مشخص شد که این نوع عنصر جاذب می‌تواند به طور مؤثری جایگزین طرح‌های مرسوم حاوی مواد فیبری شود [4]. به‌منظور ارائه جایگزینی برای جاذب‌های فیبری و متخلخل سنتی، پانل‌های میکرو روزنه‌دار^۲ (MPP) به‌طور کلی راه‌حل‌های قابل‌اعتماد و مؤثری برای صداخفه‌کن جذبی برای کاربردهای داخل مجرای هستند. این مدل ضریب جذب MPP را به‌عنوان تابعی از چهار پارامتر محاسبه می‌کند: قطر حفره (d)، تخلخل پانل (σ)، ضخامت پانل (t)، و عمق حفره [5]. یاری و همکاران [6] تأثیر تقسیم‌بندی حفره هوای مجاور را بر روی خواص افت انتقال MPP بررسی کردند و تأثیر این تنظیمات بر ضریب جذب MPP مورد بحث قرار گرفت. نتایج آزمایش برای ضریب جذب صدای طنین نشان می‌دهد که ویژگی‌های جذب MPP را می‌توان با استفاده از یک پانل لانه زنبوری کاغذی بهبود بخشید. تاؤو و همکاران [7] مورد پیچیده‌تری را در نظر گرفت که در آن دیواره‌های سلولی تقسیم شده نیز از مواد متخلخل ساخته شده بودند سپس آن‌ها به این نتیجه

رسیدند که تغییر تخلخل تأثیر قابل توجهی بر تضعیف صوتی MPP دارد.

صداخفه‌کن‌های جاذب نقش حیاتی در کاهش نویز خروجی از موتورهای احتراق داخلی دارند و این اهمیت به دلیل رشد استفاده از خودروها در محیط‌های شهری و نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به آلودگی صوتی، بیشتر شده است. به کارگیری دانش آکوستیک برای طراحی صداخفه‌کن‌های جاذب به منظور بهبود کارایی آن‌ها در کاهش نویز امری ضروری است. این مرور به بررسی کارهای انجام شده پیشین در این حوزه پرداخته و تلاش می‌کند تا تصویر جامعی از پیشرفت‌های به‌دست‌آمده در طراحی این تجهیزات ارائه دهد.

در دهه ۱۹۹۰، تحقیقات روی استفاده از مواد نوین مانند فوم‌های متخلخل و فیبرهای صوتی آغاز و نشان داده شد که استفاده از این مواد می‌تواند جذب صوت را در فرکانس‌های بالاتر بهبود بخشد، که برای موتورهای احتراق داخلی با سرعت بالا بسیار مفید است [8]. سامراسکیلز [9] نیز بیان کرد که با ترکیب چندین ماده جاذب و ایجاد ساختارهای چندلایه، می‌توان عملکرد صداخفه‌کن‌ها را بهینه کرد.

از دهه ۲۰۰۰ به بعد، استفاده از مدل‌سازی‌های آکوستیکی برای بهبود طراحی صداخفه‌کن‌ها رونق گرفت استفاده از مدل‌های عددی، تأثیر مواد جاذب و نحوه توزیع آن‌ها را بر کاهش نویز خروجی موتورهای احتراق داخلی بررسی و نشان داده شد که تنظیم دقیق ضخامت و تراکم مواد جاذب می‌تواند میزان کاهش نویز را افزایش دهد [10]. مونجال نیز مدل‌های انتقال صوت در لوله‌های صداخفه‌کن‌های جاذب را توسعه داد و با تحلیل انتقال صوت در داخل لوله‌ها، به نتایج دقیقی در زمینه چگونگی کاهش نویز دست یافت [11].

تحقیقاتی به‌طور خاص بر بهینه‌سازی صداخفه‌کن‌های جاذب برای موتورهای دیزلی و بنزینی تمرکز داشته‌اند. پاول [12] به تحلیل تفاوت‌های فرکانسی بین موتورهای دیزلی و بنزینی پرداخت و نشان داد که صداخفه‌کن‌های جاذب با استفاده از مواد با خواص آکوستیکی خاص می‌توانند برای هر دو نوع موتور بهینه شود. علیرمضانی و همکاران [13] استفاده از تکنیک‌های مدرن شبیه‌سازی صوتی، بهینه‌سازی طراحی صداخفه‌کن‌ها برای موتورهای احتراق داخلی را بهبود و نشان داد که می‌توان کاهش نویز را برای این موتورها با استفاده از مواد جدید به دست آورد.

در سال‌های اخیر، ترکیب مواد جاذب با تکنولوژی‌های دیگری مانند ساختارهای چندگانه و محفظه‌های تشدیدکننده مورد توجه بوده است. یون و همکاران با ترکیب محفظه‌های تشدیدکننده و مواد جاذب در صداخفه‌کن‌های موتورهای احتراق داخلی، توانستند میزان نویز خروجی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند [14].

چالش‌هایی همچنان در زمینه سازگاری مواد جاذب با دماهای بالا و شرایط محیطی وجود دارد که نیازمند پژوهش‌های بیشتری است.

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از لوله‌های روزنه‌دار، انتخاب بهترین الگوی توزیع و اندازه روزنه‌ها است. کیائو و همکاران [15] در تحقیقی تأثیر اندازه و فاصله روزنه‌ها بر کارایی کاهش صدا را بررسی کردند و دریافتند که کاهش صدا به‌طور مستقیم به تعداد و محل روزنه‌ها وابسته است. بهینه‌سازی طراحی لوله‌های روزنه‌دار نیازمند استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی پیشرفته است. الگوریتم‌های مختلفی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها

می‌توان به الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی، و الگوریتم‌های مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه اشاره کرد. آلفردسون و همکاران از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تعداد و محل روزنه‌ها در لوله‌های صداخفه‌کن استفاده کردند و توانستند کارایی سیستم را بهبود بخشند [15].

استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی رفتار صوتی لوله‌های روزنه‌دار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بارو و همکاران [16] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی انتقال صوت در لوله‌های روزنه‌دار پرداختند و نشان دادند که این روش می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی عملکرد صوتی این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گیرد. دنیا و همکاران [17] نیز از مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی نحوه انتشار امواج صوتی در لوله‌های روزنه‌دار استفاده کردند و توانستند نتایج دقیقی از کاهش صدا ارائه دهند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه طراحی لوله‌های روزنه‌دار، چالش‌های بسیاری همچنان باقی است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی دقیق انتقال صوت در این لوله‌ها است. نیاز به الگوریتم‌های پیشرفته‌تر و دقیق‌تر برای مدل‌سازی‌های دقیق‌تر وجود دارد.

نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از لوله‌های روزنه‌دار در صداخفه‌کن‌ها به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش صدا در سیستم‌های صنعتی و خودرویی به کار می‌رود. انتخاب الگوریتم‌های مناسب برای بهینه‌سازی طراحی این لوله‌ها نقش مهمی در بهبود عملکرد آن‌ها دارد. در این میان، استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی و شبیه‌سازی‌های عددی

می‌تواند به طراحی بهینه و کاهش صدا کمک شایانی کند.

در این مقاله هدف، طراحی صداخفه‌کن جاذب با استفاده از دانش آکوستیک برای موتور احتراق پیستونی OM457 می‌باشد که مختص شرکت صنعتی ایدم بوده و در طراحی این سامانه از خصوصیات و ویژگی‌های ماده جاذب متخلخل که برای جذب صوت عبوری و لوله روزنه‌دار که مجراهای جاذب صوت هستند کمک گرفته شده است. نوآوری مقاله در استفاده از یک الگوریتم لگاریتمی در طراحی روزنه‌های لوله بوده که بیشترین جذب صوت را دارا می‌باشد و به کمک ماده جاذب متخلخل باعث کاهش حداقل ۵۰ دسی‌بل صدا می‌شود. از جمله مزیت دیگر، طراحی و شبیه‌سازی در محیط انسیس فلونت برای تشخیص دما و فشار در هر نقطه، قابلیت تغییر ابعاد و وزن متناسب با نوع کارکرد می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

مشخصات فنی استفاده شده در این مقاله در جدول ۱ آمده است. طراحی آکوستیکی صداخفه‌کن به گونه‌ای است که مناسب برای حداکثر دمای اگزوز ورودی و حداکثر توان موتور بوده و نیز همگون‌ساز با فشار اتمسفر استاندارد، تا از خفگی و خاموشی موتور جلوگیری گردد. با حداکثر فشار نسبی تخلیه و حداکثر فشار نسبی ورودی بهینه شده، و همچنین کمینه افت فشار نیز محاسبه گردیده است تا این صداخفه‌کن بتواند به موتور این توانایی را بدهد که با کم‌ترین افت فشار، کم‌ترین صدا را در داخل کابین ایجاد نماید، و امکان سنجش فشار و دبی را هم در هر نقطه از صداخفه‌کن فراهم کند.

جدول ۱. مشخصات فنی مورد استفاده

حداکثر دمای آگروز ورودی	۵۲۰
درجه سانتی گراد	
حداکثر توان موتور	۳۱۵ کیلووات
حداکثر فشار نسبی تخلیه	۱۸۵ میلی بار
حداکثر فشار نسبی ورودی	۴۰۰ میلی بار
کمینه افت فشار	۵۰ میلی بار

تراز نسبت توان صوت (IL)، تراز نسبت فشار صوت (DL) و افت انتقال^۳ (TL) از مشخصه‌های صوت در یک سامانه می‌باشند. که مطابق روابط ۱ و ۲ تراز نسبت، به معنای اختلاف میزان صدا در حالت‌های با و بدون حضور صداخفه‌کن می‌باشد. مهم‌ترین این سه پارامتر افت انتقال است که یک اصل برای نشان دادن کارایی رفتار آکوستیکی است و نشان دهنده مقدار انرژی صوتی در عبور از سازه بوده و از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$IL = 10 \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right) \quad (1)$$

$$DL = 20 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (2)$$

$$TL = 10 \log\left(\frac{W_i}{W_t}\right) \quad (3)$$

که در معادله ۱ و W_1 و W_2 به ترتیب نماد توان آکوستیکی بدون و با حضور صداخفه‌کن بوده و همچنین در معادله ۲ و P_1 و P_2 نشان دهنده فشار آکوستیکی بدون و با حضور صداخفه‌کن می‌باشد. همچنین، در معادله ۳، W_i و W_t مشخص کننده توان ورودی و توان انتقال یافته از سازه است.

در این مقاله با توجه به دقت بالا و حجم کم محاسباتی روش اجزای مرزی، از این روش برای محاسبه میزان افت انتقال صدا در صداخفه‌کن‌هایی که طراحی ساده

دارند استفاده شده است که امکان شبکه‌بندی دو بعدی به جای سه‌بعدی را فراهم نموده و همچنین وجود راه حل‌های سریع‌تر و آسان‌تر همراه با دقت حل بالا به دلیل استفاده از عملگرهای انتگرالی به جای مشتقات از جمله مزیت‌های دیگر روش موجود با روش اجزای محدود می‌باشد.

بطور کلی با استفاده از این روش به تحلیل آکوستیکی موج صوتی منتشر شده در داخل هندسه جسم پرداخته می‌شود و معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی برای هر یک از اجزاء با در نظر گرفتن هندسه و مرز آن به فرم لاپلاس طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial^2 \varphi(p)}{\partial p_i^2} \quad (4)$$

که در آن N بیشینه تغییرات ابعاد و φ پتانسیل سرعت است. رابطه فوق به صورت مختصر برای هر جزء از هندسه به شکل رابطه ۵ است:

$$\nabla^2 \varphi(p) = 0 \quad (5)$$

شکل ۱ نشان دهنده نمای داخلی دامنه D از کل سطح است که شکل انتگرالی آن به صورت رابطه ۶ است.

$$\int_S \frac{\partial G}{\partial n_q}(p, q) \varphi(q) dS_q + \frac{1}{2} \varphi(q) = \int_S G(p, q) \frac{\partial \varphi}{\partial n_q} dS_q \quad (6)$$

در رابطه فوق، $G(p, q)$ در واقع تابع گرین می‌باشد که بیانگر تابع در نقطه q و نسبت به مختصات اصلی p می‌باشد.

$$\psi(p, t) = \text{Re}[\varphi(p)e^{-i\omega t}] \quad (10)$$

در معادله ۱۰، ω فرکانس زاویه‌ای بوده و براساس فرمول $\omega = 2\pi f$ محاسبه می‌گردد که f فرکانس بر حسب هرتز است. $\varphi(p)$ پتانسیل سرعت غیر وابسته به زمان بوده است لذا معادله هلمهولتز زمانی که $\varphi(p)$ پتانسیل سرعت صوت و p مختصات نقطه مورد نظر در دامنه می‌باشد به شکل رابطه ۱۱ است.

$$\nabla^2 \varphi(p) + k^2 \varphi(p) = 0 \quad (11)$$

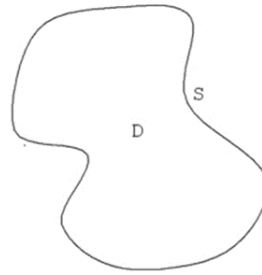
نهایتاً تراز فشار صوت و افت انتقال صوت در مقیاس دسی بل را با استفاده از تابع لگاریتمی روابط ۱۲ و ۱۳ می‌توان اندازه‌گیری کرد که p^* فشار مرجع برابر 10^{-5} پاسکال؛ و رابطه افت انتقال صوت شامل نسبت شدت صوت در سطح ورودی و خروجی است.

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p^*} \right) \quad (12)$$

$$\text{TL} = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{\text{in}}}{W_{\text{out}}} \right) \quad (13)$$

۱.۲. نرم‌افزار محاسباتی

نرم‌افزارهایی که در این زمینه مورد توجه قرار گرفته و در گسترش روش اجزاء مرزی اهمیت داشته، نرم‌افزار فلونت بوده که برای بررسی افت انتقال صوت صداخفه کن‌ها استفاده گردیده چرا که نرم‌افزار فلونت چند منظوره بوده و با استفاده از روش‌های حل عددی پیشرفته اقدام به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مسائل فیزیکی می‌نماید. این برنامه امکان ادغام این شبیه‌سازی با سایر



شکل ۱. نمایی از دامنه داخلی [۱۸].

در تابع‌های انتگرالی نشانه‌گذاری یک امر ضروری و مفید است که باعث می‌شود که به راحتی رابطه بین معادله انتگرال و سیستم خطی معادلات مشخص گردد. بنابراین برای همه نقاط p که بر روی سطح S قرار دارند می‌توان تابع نهایی را به صورت معادله ۷ نوشت.

در معادله ۷، $V(p)$ سرعت ذرات بوده و با جای‌گذاری L به عنوان یک عملگر انتگرالی، رابطه ۷ را می‌توان به فرم رابطه ۸ بازنویسی نمود.

$$\{L\zeta\}_S(p) = V(p) \quad (8)$$

حال بعد از آن که روابط مربوط به محاسبه افت انتقال صوت استخراج و استحصال گردید حال معادله موج وابسته به زمان با استفاده از معادله هلمهولتز ساده‌تر شده و برای این کار فرض می‌شود که سیال در حوزه آکوستیکی ایزوتروپیک و همگن بوده و باید در نظر داشت که هندسه و دامنه آن هر چه که باشد در تحلیل آکوستیکی مسئله از معادله موج خطی که در رابطه ۹ آورده شده است استفاده می‌گردد.

$$\nabla^2 \psi(p, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi(p, t) \quad (9)$$

c سرعت انتشار صوت و $\psi(p, t)$ پتانسیل سرعت وابسته به زمان می‌باشد که آن را می‌توان به صورت مجموع پتانسیل‌ها برای هر ذره به شکل رابطه ۱۰ محاسبه نمود.

روش‌های محاسباتی و نرم‌افزار طراحی دوبعدی و سه‌بعدی را در محیطی یکسان فراهم نماید و همچنین در زمینه آکوستیک نیز این برنامه تا حدی قابلیت حل معادلات دیفرانسیل جزئی و کامل برای تحلیل و بررسی رفتار سیستم‌های خطی و غیرخطی و شرایط مرزی را دارد.

۲.۲. شرایط مرزی حاکم

در روش اجزاء مرزی شرایط مرزی به صورت معادله ۱۴ ظاهر می‌شود که شامل پتانسیل سرعت $\varphi(p)$ و سرعت نرمال $V(p)$ می‌باشد.

$$\alpha(p)\varphi(p) + \beta(p)V(p) = \gamma(p) \quad (14)$$

در رابطه فوق α و β و γ مقادیر پیچیده تعریف شده روی سطح هستند که این رابطه به سطح مرزی انتزاعی وابسته است.

برای سطوحی که موج صوتی در لحظه برخورد با آنها به‌هیچ‌عنوان از آنها عبور نمی‌کند و کلاً بازتاب می‌شود به اصطلاح شرط مرزی دیوار گفته شده که قابل استفاده برای سطح خارجی محفظه انبساط و لوله‌های داخلی اگزوز می‌باشد که این شرط مرزی از معادله ۱۵ بدست می‌آید.

$$\left(-\frac{\nabla\varphi(p)}{\rho}\right).n = 0 \quad (15)$$

در رابطه ۱۶ میزان تخلخل سطح با نماد σ نشان داده می‌شود که در حقیقت با نسبت مجموع مساحت روزنه‌ها به مساحت کل سطح روزنه‌دار برابر بوده و علاوه بر آن θ نمایانگر مقاومت ویژه است که از رابطه ۱۷ قابل محاسبه می‌باشد. x راکتانس بوده و توسط رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود که در آن θ_f مقاومت جریانی را نشان می‌دهد که بیانگر امپدانس خاص ناشی از

مقاومت در برابر یک جریان متوسط در صداخفه‌کن است.

همچنین ویسکوزیته دینامیکی با نماد μ نمایش داده می‌شود و t_p ضخامت صفحه روزنه‌دار است و d_h قطر هر روزنه را نشان می‌دهد و δ_h یک اصلاح نهایی برای مشخصات روزنه است که به اندازه $0.25 d_h$ فرض می‌شود.

$$\frac{z}{\rho c} = \frac{1}{\sigma}(\theta + ix) + \theta_f \quad (16)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{8\mu k}{\rho c}} \left(1 + \frac{t_p}{d_h}\right) \quad (17)$$

$$x = k(t_p + \delta_h) \quad (18)$$

۳. نتایج و بحث

در این مقاله به کمک نرم‌افزار فلوننت به بررسی افت انتقال صوت در انباره اگزوز با ساختارهای متخلخل پرداخته شد. به همین دلیل، هندسه انباره اگزوز در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی شده و سپس افت انتقال صدا برای مدل ذکرشده با استفاده از روش اجزاء مرزی و اعمال شرایط مرزی بر مساله و همچنین مش‌بندی دقیق محاسبه شد.

مخزن اگزوز مورد بررسی شامل لوله‌های ورودی و خروجی، لوله‌های روزنه‌دار و مواد جاذب صدا است که هدف از این مدل‌سازی بررسی اثر لوله‌های روزنه‌دار و صفحات متخلخل در جذب صوت بوده و در نهایت نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی، که به روش ماتریس انتقال انجام شده، مقایسه و هم‌پوشانی قابل قبولی مشاهده گردید.

۱.۳. طراحی صداخفه‌کن

۲.۳. مشخصات نمونه آزمایشگاهی

با اتمام طراحی و محاسبات صورت گرفته، نمونه آزمایشگاهی شروع به ساخت گردید که با در نظر گرفتن تمامی جوانب و نکات لازم، اجزای دستگاه بصورت زیر می‌باشد:

۱.۲.۳. فلنج

شکل ۳ یک فلنج تبدیل ۸ به ۴ می‌باشد که برای اتصال صدا خفه‌کن به خروجی اگزوز متناسب با اندازه استاندارد ساخت شده است.



شکل ۳. فلنج تبدیل ۸ به ۴

۲.۲.۳. پشم سنگ

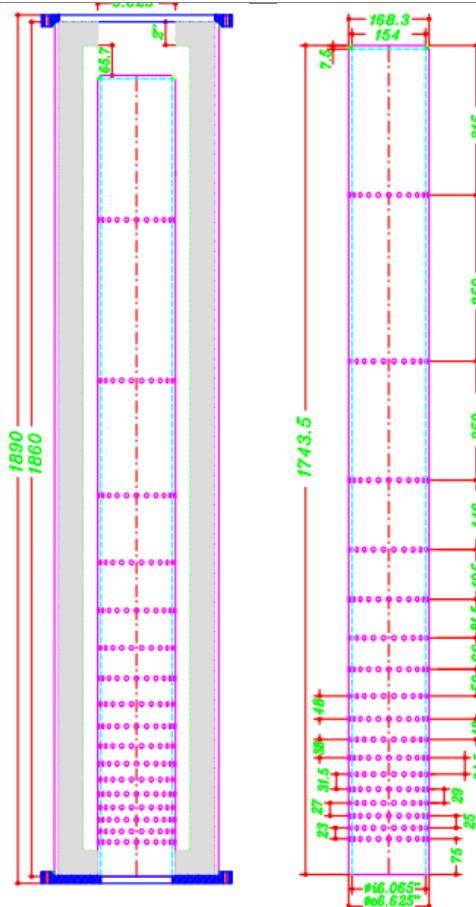
پشم سنگ استفاده شده در این پژوهش عایق حرارتی، صوتی و رطوبتی و نیز عایق ضد حریق با تحمل دمای $+750$ درجه سانتیگراد و نقطه ذوب $+1300$ درجه سانتیگراد و نیز تحمل برودتی -30 درجه سانتیگراد است. پشم سنگ استفاده شده دارای ضریب انتقال حرارتی بسیار کم بوده و قدرت عایقی آن ۳۳ برابر دیوار بتنی و ۲۲ برابر دیوار آجری است. پشم سنگ استفاده شده از مواد اولیه معدنی بازالت و دولومیت تشکیل شده است. در فرآیند تولید، این مواد معدنی ذوب شده و به صورت الیاف نازک درآمده و سپس تحت فشار و حرارت به شکل پتوهای عایق یا تخته‌های سخت فشرده می‌شود. شکل ۴ پشم سنگ مورد استفاده در ساخت

با در نظر گرفتن شرایط مرزی و همچنین مشخصات فنی موتور ذکر شده طراحی صداخفه‌کن انجام گردید که ابعاد نهایی و بهینه آن در جدول ۲ آمده است.

استفاده از الگوریتم لگاریتمی برای لوله‌های روزنه‌دار نوآوری بود که در این مقاله استفاده شده چراکه این الگوریتم بهینه‌ترین در نوع خودش بوده و بیشترین جذب صوت را دارا می‌باشد که نقشه طراحی شده به همراه ابعاد تمام شده این دستگاه در شکل ۲ مشخص شده است.

جدول ۲. مشخصات ابعادی صداخفه‌کن

طول	۲۳۰ میلی‌متر
عرض	۱۰۵ میلی‌متر
ارتفاع	۱۸۹۰ میلی‌متر



شکل ۲. ابعاد تمام شده صداخفه‌کن

این دستگاه را نشان می‌دهد که با چگالی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴. پشم سنگ مورد استفاده در صداخفه‌کن



شکل ۶. مونتاژ دستگاه

۳.۲.۳. لوله روزنه‌دار

برای بازتاب صوت از لوله روزنه‌دار استفاده شده است که فواصل آن بصورت لگاریتمی می‌باشد و نحوه محاسبه آن در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شده است. شکل ۵ این لوله روزنه‌دار را نشان می‌دهد که چگونگی اتصال آن به دستگاه و فلنج تبدیل را نشان می‌دهد.



شکل ۵. لوله روزنه‌دار



شکل ۷. نمونه آزمایشگاهی

۴.۲.۳. سایر اجزا

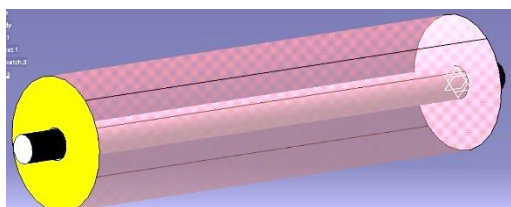
در این بخش بعد از اتمام ساخت ریز اجزا، اقدام به مونتاژ گرفته و بصورت شکل ۶ سوار می‌شود که دستگاه تمام شده در شکل ۷ نمایش داده شده است.

۳.۳. اعتبار سنجی

اعتبار سنجی مدل یک روش بسیار مهم در تحقیق است زیرا به طور مستقیم بر اعتبار یافته‌های تحقیق تأثیر می‌گذارد. صحت نتایج به دست آمده از مدل‌سازی ریاضی بر تصمیمات و سیاست‌های مبتنی بر تحقیق تأثیر می‌گذارد.

لذا با توجه به اینکه استفاده از صداخفه‌کن برای موتور احتراق داخلی سنگین برای اولین بار صورت گرفته

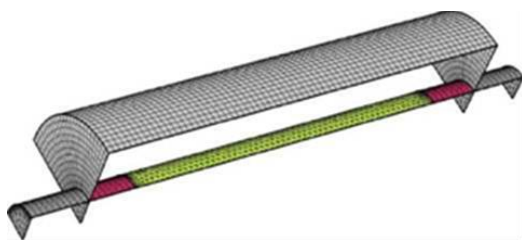
حضور مواد جاذب صوتی پرداخته شد که صداخفه‌کن با شکل و ابعاد مطابق شکل ۹ مورد بررسی قرار گرفته است. ماده جاذب صوت در این تحلیل پشم سنگ بوده که چگالی آن برابر با ۵۰۰۰ میکرون در هر متر می‌باشد.



شکل ۹. صداخفه‌کن دارای ماده جاذب صوت

جریان هوا در این مدل‌سازی به‌عنوان سیال ایده‌آل در نظر گرفته شده که با ورود به محفظه انبساط از طریق لوله روزنه‌دار که در امتداد لوله ورودی است با ماده جاذب برخورد می‌کند.

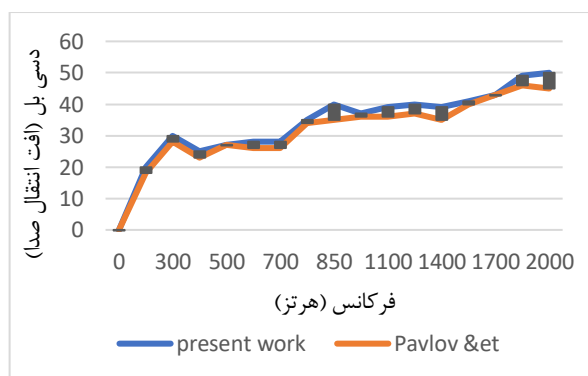
لوله روزنه‌دار دارای سوراخ‌هایی با قطر ۵ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و درصد تخلخل ۲۵ می‌باشد. ماده جاذب مثل پوششی محفظه انبساط را کاملاً پوشانده که مش‌بندی این هندسه در شکل ۱۰ نمایان است. مش‌بندی روزنه‌دار بدلیل الگوریتم اشاره شده در قبل، سه‌وجهی انتخاب گردیده و نکته مهم در تحلیل، به دلیل دارا بودن تقارن محوری در هندسه شکل و به جهت کاهش حجم محاسبات به‌صورت یک‌چهارم بررسی شده‌است.



شکل ۱۰. هندسه مش‌بندی شده با مواد جاذب و لوله روزنه‌دار

بنابراین اعتبارسنجی این مورد با پژوهش پاولو و همکاران [3] مقایسه شده است که هم‌پوشانی نتایج این مقاله با پژوهش ذکر شده قابل قبول است که در شکل ۸ نمایش داده شده است.

پاولو و همکاران به مشکل کاهش نویز موتورهای احتراق داخلی کم توان پرداخته و با توجه به اینکه مقاومت جریان با کاهش نویز افزایش می‌یابد، نویسندگان پیکربندی‌های مختلف صدا خفه‌کن و روش‌های کاهش نویز را توضیح داده و تحقیق کردند و نتایج نشان داد که با رعایت کم‌ترین مقاومت هیدرولیکی حرکت گاز، روش موثر تضعیف صدا، انعکاس امواج صوتی متعدد از دیوارهای صاف در یک فضای محدود است.

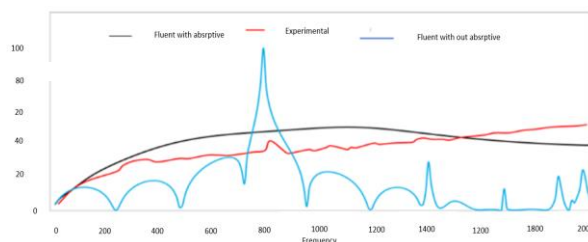


شکل ۸. مقایسه میزان افت انتقال صدا با ماده جاذب با پژوهش پاولو و همکاران [3].

۴. نتایج

مواد جاذب که از مواد متخلخل ساخته شده و مانع خروج صوت می‌شوند اغلب به‌صورت لایه‌ای و بدلیل کاهش سطح نویز عبوری به کار گرفته می‌شوند. استفاده از مواد جاذب در وسایل نقلیه مثل خودرو و هواپیما نقش بسیار مهمی ایفا می‌نمایند لذا در این راستا عملکرد میرایی آکوستیکی در صداخفه‌کن‌ها در

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزاء مرزی با روش آزمایشگاهی در شکل ۱۱ آورده شده است. در این نمودار همچنین تجزیه و تحلیل قسمت‌های مرزی هندسه در زمانی که دارای مواد جاذب بوده و زمانی که حاوی مواد جاذب نبوده با روش آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق نسبتاً خوبی نشان داده شده است.



شکل ۱۱. میزان افت انتقال صدا با و بدون ماده جاذب
 جدول ۳. مقایسه نتایج بدست آمده برای افت انتقال صدا در صداخفه‌کن ساخته شده در این پژوهش و مقایسه آن با نتایج نمونه از مرجع [19]

	افت انتقال صدا (دسی بل)				
	فرکانس (هرتز)				
	۱۸۰۰	۱۲۰۰	۸۰۰	۶۰۰	۲۰۰
مدل ساخته شده (پژوهش حاضر)	۴۷	۵۹	۸۵	۳۰	۱۸
نتایج شبیه‌سازی عددی (پژوهش حاضر)	۴۵	۴۰	۳۵	۲۵	۱۲
پاولو و ناکوویاکو [19]	۴۳	۴۶	۴۱	۳۲	۹

انرژی صوتی، طی یک مسیر هوا در لوله‌های روزنه‌دار صوت به گرما تبدیل می‌شود. صداخفه‌کن جذبی با بهره‌گیری از خواص ماده جاذب انرژی صوتی ناشی از حرکت موج آکوستیکی را از بین می‌برد همچنین صداگیرهای جاذب دارای ساختاری ساده‌تر هستند و یکی از ویژگی‌های صوتی صداخفه‌کن‌ها افت انتقال صوت در آنها است که به‌صورت لگاریتمی از نسبت فشار در ورود به محفظه انبساط به فشار در خروج از محفظه انبساط تعریف می‌شود که این مقدار را بر حسب دسی‌بل اندازه‌گیری می‌کنند.

در این پژوهش به دلیل دقت در حل و کم‌تر شدن حجم محاسبات از روش اجزاء مرزی برای محاسبه افت انتقال صوت صداخفه‌کن‌ها با ساختارهای ساده استفاده شد.

همچنین میزان افت انتقال صوت به روش اجزاء مرزی با استفاده از نرم‌افزار فلونت برای صداخفه‌کن‌ها با سطح مقطع دایروی محاسبه گردید که نتایج حاکی از آن است که نتایج حل به روش اجزاء مرزی دارای تطابق مناسبی با دیگر روش‌ها همانند روش آزمایشگاهی است؛ بنابراین این روش به‌عنوان یک روش کارا و مفید در محاسبه میزان افت انتقال صوت در صداخفه‌کن‌ها با هرنوع هندسه داخلی است.

در انتها از بین این مدل‌ها، یک مدل که ساختار ساده‌تر و دارنده نمودار میزان افت انتقال صوت بهتری از حیث پهنای باند فرکانسی می‌باشد به‌عنوان نمونه‌ای برای طراحی دقیق به کارگیری شد.

۵. نتیجه‌گیری

بطور کلی در این مقاله انواع صداخفه‌کن‌ها بطور خلاصه بحث شد و مشخص گردید که در صداگیرهای جاذب

- [1]. Sánchez-Orgaz, Eva María, Francisco David Denia, Jose Martínez-Casas, and Javier Carballeira. "Computational approach for the acoustic modelling of large aftertreatment devices with multimodal incident sound fields." *Advances in Mechanical Engineering* 15, no. 9 (2023): 16878132231199870.
- [2]. Tupov, V. V. "Principles of design for intake noise silencers to meet acoustic and power requirements of two-stroke carburetor engines." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 2383, no. 1. AIP Publishing, 2022.
- [3]. Pavlov, G. I., P. V. Nakoryakov, and E. A. Sukhovaya. "Development of silencer for low-power internal combustion engines." *Procedia Engineering* 206 (2017): 1690-1695.
- [4]. Kabral, Raimo, Hans Rämmal, and Jüri Lavrentjev. *Acoustic studies of micro-perforates for small engine silencers*. No. 2012-32-0107. SAE Technical Paper, 2012.
- [5]. Maa, Dah-You. "Potential of microperforated panel absorber." *the Journal of the Acoustical Society of America* 104, no. 5 (1998): 2861-2866.
- [6]. Yairi, Motoki, Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto, and Atsuo Minemura. "Acoustical properties of microperforated panel absorbers with various configurations of the back cavity." In *12th International Congress on Sound and Vibration*. 2005.
- [7]. Kennedy, John, Lara Flanagan, Luke Dowling, G. J. Bennett, Henry Rice, and Daniel Trimble. "The influence of additive manufacturing processes on the performance of a periodic acoustic metamaterial." *International Journal of Polymer Science* 2019, no. 1 (2019): 7029143.
- [8]. Everest, F. Alton. *Master handbook of acoustics*. 2022.
- [9]. Somerscales, Euan FC. "Measurement systems: Application and design: EO Doebelin. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990. ISBN 0-07-017378-9." *Experimental Thermal and Fluid Science* 5, no. 4 (1992): 575-575.
- [10]. Goestchel, Quentin, Gwenaël Guillaume, David Ecotièrre, and Benoit Gauvreau. "Analysis of the numerical properties of the transmission line matrix model for outdoor sound propagation." *Journal of Sound and Vibration* 531 (2022): 116974.
- [11]. Peat, K. S. "Book Review: Acoustics of ducts and mufflers. 1987 by ML Munjal. Chichester: John Wiley. ISBN 0-471-84738-0. 328 pages." *Journal of Sound and Vibration* 119, no. 3 (1987): 585-586.
- [12]. Powell, Alan. "Theory of vortex sound." *The journal of the acoustical society of America* 36, no. 1 (1964): 177-195.
- [13]. Aliramezani, Masoud, Charles Robert Koch, and Mahdi Shahbakhti. "Modeling, diagnostics, optimization, and control of internal combustion engines via modern machine learning techniques: A review and future directions." *Progress in Energy and Combustion Science* 88 (2022): 100967.
- [14]. Qiu S, Ding H, Lu T, Liu S, Qian P, Wang N, et al. *Honeycomb acoustic liner based on embedded apertures and multi-depth cavities*. Kexue Tongbao/Chinese Sci Bull. 2023;68.
- [15]. Kyaw Oo D'Amore, Giada, Mitja Morgut, Marco Biot, and Francesco Mauro. "Numerical study on the influence of porous baffle interface and mesh typology on the silencer flow analysis." *Marine Systems & Ocean Technology* 17, no. 2 (2022): 71-79.
- [16]. Barua, S., and Sushovan Chatterjee. "CFD analysis on an elliptical chamber muffler of a CI engine." *Int. J. Heat Technol* 37, no. 2 (2019): 613-619.
- [17]. Denia, Francisco D., F. Javier Fuenmayor, Antonio J. Torregrosa, and Ahmet Selamet. "Numerical modelling of thermal effects on the acoustic attenuation of dissipative mufflers." In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, vol. 2012, no. 10, pp. 1548-1559. Institute of Noise Control Engineering, 2012.

- [18]. Stewart, G. W. "The Theory of the Herschel-Quincke Tube." *The Journal of the Acoustical Society of America* 17, no. 2 (1945): 107-108.
- [19]. Pavlov, G. I., P. V. Nakoryakov, and E. A. Sukhovaya. "Development of silencer for low-power internal combustion engines." *Procedia Engineering* 206 (2017): 1690-1695.

پی نوشت

¹ <https://www.idem.ir/>

² Micro perforated panel (MPP)

³ Transmission loss