

صداخفه‌کن‌ها و ارزیابی تجربی آنها

علی میرمحمدی
استادیار مهندسی مکانیک
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
a.mirmohammadi@sru.ac.ir

فتح‌اله امی
استاد مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس
fommi@modares.ac.ir

حسین نکوبیدار*
دانشجوی کارشناس ارشد مکانیک
دانشگاه تربیت مدرس
Hossein_128Bidar@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

چکیده

پیشرفت فن‌آوری‌های صنعتی و گسترش آن کاربرد وسیع ماشین‌آلات و تجهیزات را به همراه داشته است. این رشد سریع سبب گردیده تا انسان در زندگی روزمره و شغلی خود هرچه بیشتر تحت تأثیر آشفته‌گی‌های ناخوشایند آکوستیکی یعنی صدا با شدت‌های مختلف قرار گیرد. صدا یکی از خطرات شغلی و صنعتی به شمار می‌رود و بسیاری از کارکنان بخش صنعت در معرض این عامل زیان‌آور قرار دارند. تشخیص ویژگی‌ها و مشخصات آکوستیکی منبع تولید صدا اولین گام در طراحی تجهیزات کنترل آلودگی صوتی به شمار می‌رود. در روش‌های کاهش و کنترل آلودگی صوتی، کنترل صدا در منبع تولید از کاراترین و مفیدترین روش‌ها به شمار می‌رود. در این پژوهش نحوه عملکرد صداخفه‌کن‌های صنعتی بررسی و سپس با توجه به نتایج تست‌های تجربی بهترین نوع آن انتخاب می‌گردد.

واژگان کلیدی: آلودگی صوتی، جذب صدا، صداخفه‌کن، مافلر، انباری

۱. مقدمه

آزمایشگاهی و صنایع برودتی نام برد. صداخفه‌کن بر مبنای علم آکوستیک تولید می‌شود. اولین صداخفه‌کن عملی در سال ۱۸۹۷ به ثبت رسید. صداخفه‌کن‌ها معمولاً ۹۵ درصد صدای حاصل از شلیک گلوله را در خود خنثی می‌کنند. دقیقاً همین مکانیزم در منبع آگزوز خودروها و ورودی کمپرسورها به کار برده می‌شود. این مکانیزم در ذهن هیرام ماکسیم به ایده‌ای تبدیل شد که وی در سال ۱۹۳۰ اولین صداخفه‌کن‌های کاربردی را در صنایع نظامی اختراع نمود. این صداخفه‌کن دارای طول و وزن بسیار بالایی بود که حمل آن، هدف‌گیری و مانور تیرانداز را دچار مشکل می‌کرد. این

صدا بر قسمت‌های مختلف بدن انسان اثرات مخربی چون گشادی مردمک، ترشح هورمون تیروئید، تپش قلب، ترشح آدرنالین، ترشح هورمون آدرنالین کورتکس، واکنش‌های معده و روده، واکنش ماهیچه‌ای و ساختار عروق خونی دارد. انتخاب و طراحی صداخفه‌کن به میزان کاهش صدای مورد نیاز بستگی دارد. صداخفه‌کن‌های متعددی با کاربردهای متفاوت صنعتی و یا حتی نظامی در دنیا تست و ساخته شده است. از جمله کاربردهای مهم صداخفه‌کن می‌توان در صنایع خودروسازی، تسلیحات نظامی، ایمنی افراد، ایمنی

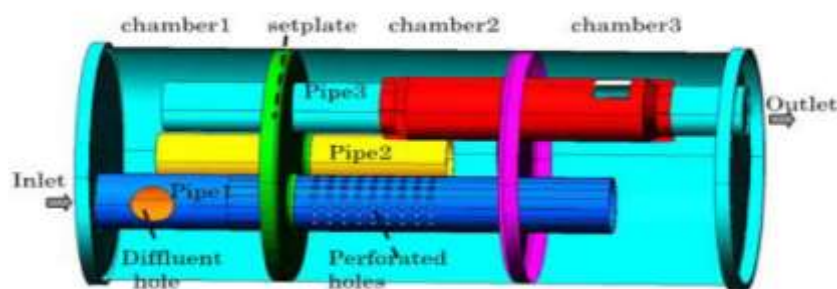
مدل‌ها در حقیقت لوله‌هایی بودند که چندین محور ساده و در فواصل معینی از هم و داخل هم قرار می‌گرفتند. سپس ایده سیستم تهویه مطبوع بی‌صدا برای ساختمان‌های بزرگ در ذهن هیرام ماکسیم قرار گرفت [۱].

در سه دهه اخیر مطالعات مختلفی در مورد صداخفه‌کن‌ها صورت گرفته است که در طراحی هر چه بهتر آن کمک می‌کند. در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی تأثیر عواملی چون شکل سطح مقطع، مواد جاذب صوت و جریان حجمی در کاهش سطح صدا مورد مطالعه قرار گرفت [۲].

در مرجع [۳] طراحی صداخفه‌کن برای خودرو و میرایی آلودگی صوتی بررسی شده است. در این مرجع انواع

صداخفه‌کن‌ها، اجزای داخلی آنها و پارامترهای طراحی صداخفه‌کن واکنشی-جاذب مطابق شکل ۱ بررسی شده است. برای کاهش بیشتر آلودگی صوتی در خودروها ترکیب صداخفه‌کن‌های واکنشی و جاذب در این مرجع پیشنهاد شده است.

از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در این مرجع تعداد محفظه‌ها، تعداد لوله‌های ورودی و خروجی، قطر لوله ورودی و خروجی، تعداد و قطر سوراخ‌های روی لوله و ابعاد صداخفه‌کن اشاره شده است.



شکل ۱. نمای برش خورده داخلی صداخفه‌کن واکنشی جاذب

در مرجع [۵ و ۶] طراحی یک سیستم صداخفه‌کن برای دیزل ژنراتور 53MTU 6V 183 AA انجام شده است. بررسی ایشان نشان می‌دهد که کاهش بیش از حد صدا، باعث ایجاد فشار برگشتی اضافی می‌گردد و راندمان ژنراتور را کاهش می‌دهد. لذا در این مرجع صداخفه‌کن غیرفعال انعکاسی طراحی گردیده که صدا را در حد قابل قبولی کاهش داده و همچنین میزان فشار برگشتی از حد مجاز که ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌بار برای این موتور دریایی است، بیشتر نشده است.

در مراجع [۷ و ۸] طراحی و اجرای راهکار کنترل آلودگی صوتی ناشی از خروجی‌های نیروگاه حرارتی انجام شده است. دمنده‌های موجود در نیروگاه حرارتی هوای مورد نیاز دیگرها را تأمین می‌نمایند. در زمانی که دیگرها به هوا نیاز

ندارند هوای مورد نظر غالباً با سرعت ۶۸ تا ۱۵۱ متر بر ثانیه از طریق چهار عدد خروجی در ارتفاع بالا به محیط تخلیه، و در نتیجه باعث سر و صدای زیادی می‌شود که علاوه بر تأثیر آن بر نواحی و محوطه بیرون نیروگاه سبب آلودگی دوردست نیز خواهد شد. پژوهش این مراجع با هدف کاهش ۲۵ دسی‌بل سطح صدای تولیدی منبع (۱۴۶ دسی‌بل) انجام شده است. به‌منظور کاهش سرعت هوای خروجی، جذب صدای تولیدی و جلوگیری از تولید مجدد صدا، صداخفه‌کن از نوع واکنشی-جذبی انتخاب گردیده است. مشخصات فیزیکی منبع شامل دبی هوای خروجی، سطح مقطع، دما و فشار هوای خروجی از پارامترهای مهم طراحی در این مراجع به شمار می‌روند.

در مرجع [۹] مطالعه پارامترهای طراحی بهینه صداخفه‌کن ونت انجام شده است. صداخفه‌کن‌های ونت عموماً از جنس استیل هستند که در شکل ۲ نمونه‌ای از آن ارائه شده است. اطلاعات در مورد نوع، مقدار فشار، حجم هوای تولیدی و دمای کاری کمپرسور و اطلاعات در مورد پارامترهای طراحی بهینه صداخفه‌کن در این مرجع ارائه شده است.

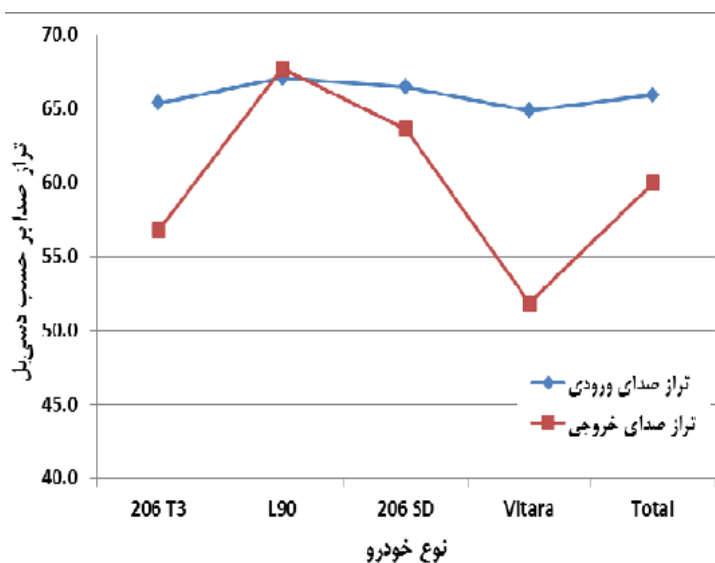


شکل ۲. صداخفه‌کن کمپرسور

در مرجع [۱۰] میزان کاهش صدای موتور کمکی هواپیما (APU) با استفاده از صداخفه‌کن سوراخ‌دار بررسی شده است. بر اساس استاندارد سازمان بین‌المللی هوانوردی این صدا باید کمتر از ۹۰ دسی‌بل باشد. با توجه به این موارد استفاده از صداخفه‌کن در آگزوز موتور کمکی اجتناب‌ناپذیر است. معمولاً فضای در نظر گرفته شده برای نصب کاهنده صوت در هواپیما محدود می‌باشد که به این دلیل طراحی بهینه مورد نیاز است. در این مرجع روش محاسبه و

پارامترهای مؤثر در کاهش صدا در کاهنده‌های سوراخ‌دار استخراج شده و تأثیر بافل در روابط اعمال گردیده است. در مرجع [۱۱] تأثیر رزوناتورهای خودروهای سوزوکی ویتارا، تندر نود، پژو ۲۰۶ معمولی و پژو ۲۰۶ صندوق‌دار به منظور کاهش تراز صدای خودرو بررسی شده است. آزمایش‌ها در قالب طرح تصادفی انجام شده که نوع رزوناتور در چهار سطح، دامنه صوت در پنج سطح و بسامد تحریک در ده سطح، پارامترهای این آزمایش بوده‌اند. شکل ۳ میانگین تراز صدای واردشده و خارج شده از رزوناتورهای خودروهای مختلف را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در مجموع وجود رزوناتور در خودرو به‌طور متوسط حدود شش دسی‌بل تراز صدای خودرو را کاهش داده است. دلیل کاهش بیشتر صدای خودروی سوزوکی به نسبت بقیه خودروها را می‌توان ناشی از حجم زیاد رزوناتور این خودرو به نسبت بقیه رزوناتورهای خودروهای دیگر دانست. بررسی نتایج این مرجع نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش تراز صدا برای رزوناتورهای مختلف به‌طور متوسط در بسامد ۸۱۹۲ هرتز به‌وجود آمده است و وجود رزوناتور در خودرو باعث کاهش محسوس تراز صدای خودرو شده است که گاهی این مقدار تا ۱۵ دسی‌بل نیز می‌رسد.



شکل ۳. میانگین تراز صدای ورودی و خروجی رزوناتورهای خودروهای مختلف [۱۱]

مرجع برای محاسبه مستقیم کاهش انتقال صدا، از روش سه نقطه‌ای به

جای روش مرسوم چهار قطبی بهره گرفته شده است. از آنجا که روش سه نقطه‌ای تنها نیازمند یک تحلیل در هر بسامد بوده به همین دلیل نسبت به روش چهار قطبی از سرعت بالاتری برخوردار می‌باشد. از انواع مختلف صداخفه‌کن با ابعاد و هندسه خارجی یکسان جهت نمایش اثر حضور عناصر تشدید کننده نظیر بافل^۴ و لوله امتداد یافته در محفظه انبساط بر روی کاهش انتقال صوت استفاده گردیده است. در نهایت کاهش انتقال صوت به دست آمده از روش عددی المان مرزی به کمک روش سه نقطه‌ای با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققین مقایسه شده است.

در مرجع [۱۸] بهبود طراحی صداخفه‌کن جهت کاهش فشار برگشتی بر روی موتور مشخص ۱۵۰ سی‌سی انجام شده است. تحلیل صداخفه‌کن با افزایش حجم اولیه آن نشان دهنده کاهش فشار برگشتی است. با کاهش فشار برگشتی ذخیره سوخت و صرفه‌جویی در قدرت برای موتور حاصل می‌شود.

در این مقاله مبانی فیزیکی و مفاهیم صوت ارائه و چندین صداخفه‌کن به صورت تجربی ارزیابی می‌گردد.

۲. مبانی فیزیکی

صوت هنگامی تولید می‌شود که صدای منبع با حرکت موج، هوای نزدیک به خود را فشرده می‌کند. این حرکت به سایر ذرات انتقال یافته و صوت در هوا با سرعت ۳۴۰ متر بر ثانیه منتشر می‌شود. در جامدات و مایعات سرعت صوت بیشتر می‌شود، ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در آب و ۵۰۰۰ متر بر ثانیه در فولاد است.

مرجع [۱۲] پدیده چرخش در صداخفه‌کن موتور خودرو و تأثیر آن بر کاهش فشار برگشتی و کاهش آلایندگی را بررسی کرده است. نتایج این مرجع نشان می‌دهد، در چرخش با سرعت بالا در حدود ۶۰ درصد کاهش فشار برگشتی خواهد داشت و این خود باعث کاهش آلایندگی‌هایی مانند هیدروکربن نسوخته و مونوکسید کربن هست و علاوه بر این‌ها باعث بهبود عملکرد ۲ درصدی در احتراق می‌شود. در مرجع [۱۳] و [۱۴] تأثیر بازگشت‌ناپذیری‌های انباره اگزوز بر شدت صدای خروجی از اگزوز صداخفه‌کن موتور احتراق داخلی OM314 مطالعه شده است. نتایج این مرجع، ارتباط بیشتر افت فشار دو طرف انباره به صدای اگزوز را در مقایسه با اختلاف دما نشان داده است. این نتیجه، امکان تأثیر بازگشت‌ناپذیرها به میزان کمی در شدت صدای اگزوز را تأیید می‌نماید. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهند دسی بل صدای اگزوز عمدتاً تابع سرعت موتور است و علت آن افزایش تعداد باز شدن سوپاپ دود در واحد زمان می‌باشد.

در مرجع [۱۵] بهینه‌سازی پارامتر کاهش انتقال صوت از سوراخ لوله‌های صداخفه‌کن مطالعه شده است. این پارامتر که خود بستگی به نوع فیلترها، تعداد و قطر سوراخ‌ها دارد، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مرجع نشان می‌دهد که صداخفه‌کن با لوله‌های سوراخ‌دار کاهش صدای بیشتری به نسبت محفظه انبساط ساده دارد.

صداخفه‌کن‌هایی با سوراخ بیضی به نسبت استوانه‌ای دارای ساختاری بهتر تا بسامد ۲۱۰۰ هرتز هستند و نتیجه آن کاهش ۷ تا ۸ دسی‌بل در خروجی صدا است. در صورتی که برای بسامدهای بالاتر از ۲۱۰۰ هرتز، لوله‌هایی با سوراخ استوانه‌ای انتخابی بهتر است.

در مرجع [۱۶] و [۱۷] بهبود کاهش انتقال صوت صداخفه‌کن خودرو مورد مطالعه قرار گرفته است. در این

به طور معمول صوت از بسامدهای زیادی تشکیل می‌شود. بیناب^۵ صوتی وسیع بوده و بر حسب میزان شنوایی به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

۱. صوت با بسامد ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز را بیناب شنوایی می‌نامند. ارتعاش صوتی با بسامدهای یاد شده حس شنوایی را در انسان تحریک می‌کند. در بیناب فوق بسامدهای ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز، بسامدهای مکالمه را تشکیل می‌دهند.

۲. ارتعاش‌هایی با بسامدهای کمتر از ۲۰ هرتز امواج مادون صوت هستند که گوش انسان حساسیت چندانی به شنیدن آن ندارد.

۳. امواج صوتی با بسامد بیش از ۲۰۰۰۰ هرتز امواج فراصوت است که حس شنوایی را در انسان تحریک نمی‌کند.

در بررسی مشکلات ناشی از صدا، اصوات دو ناحیه مادون صوت و فراصوت مورد نظر نیستند، بلکه اصواتی که در بیناب شنوایی قرار دارند، مورد توجه قرار می‌گیرند. بسامد موج صوتی به تعداد ارتعاش در ثانیه باز می‌گردد، که در واحد هرتز اندازه‌گیری می‌شود. صدای ایجاد شده با یک دامنه بسامدی بزرگ، برای یک فرد جوان قابل شنیدن است.

ترازهای صوتی در واحد دسی‌بل اندازه‌گیری می‌شوند. اگر صدا ۱۰ دسی‌بل شدیدتر شود، این صدا برای گوش‌ها تقریباً به صورتی که انگار دو برابر شده باشد به نظر می‌رسد. برعکس، یک کاهش ۱۰ دسی‌بل در صدا، آن را برای گوش طوری به نظر می‌رساند که انگار نصف شده باشد. پارامترهای صدا به صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱- توان صوت: مقدار انرژی صوتی که در واحد زمان به وسیله منبع صدا تولید می‌شود توان صوت نامیده می‌شود که بر حسب وات بیان می‌گردد. توان صوتی یکی از ویژگی‌های منبع صدا است و مستقل از محیط انتشار است.

۲- شدت صوت: مقدار توان صوتی که در واحد زمان از واحد سطحی که عمود بر امتداد انتشار صوت است، می‌گذرد، شدت صوت نامیده می‌شود و واحد اندازه‌گیری آن وات بر مترمربع است. هرچه شدت صوت بیشتر باشد، احساس صدا شدیدتر خواهد بود. رابطه بین توان و شدت صوت به صورت رابطه ۱ است.

$$I = \frac{W}{A} \quad (1)$$

در این رابطه I شدت صوت، W توان صوتی منبع بر حسب وات و A مساحت سطح عمود بر امتداد انتشار صوت را نمایش می‌دهد. در یک میدان آزاد، که مانعی بر سر راه عبور امواج صوتی وجود ندارد، انرژی صوتی منبع به صورت سطوح کروی به فواصل مختلف از منبع در فضا منتشر می‌شود. بنابراین، شدت صوت برابر است با:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2)$$

r : فاصله منبع بر حسب متر و $4\pi r^2$ مساحت کره است. از رابطه ۲ می‌توان دریافت که اگر توان صوت ثابت باشد، شدت به صورت عکس مجذور فاصله از منبع تغییر می‌کند. ۳- فشار صوت: فشار در هر نقطه نیروی وارد بر سطح است. تغییرات فشار در محیطی که در آن تعادل فشار به هم خورده است، فشار صوت می‌نامند. در هوا فشار صوت ناشی از افزایش یا کاهش متناوب فشار p پیرامون فشار جو (P_0) است. یعنی فشار صوت تفاوت بین فشار جو و فشار واقعی در مدت انبساط و تراکم تعریف شده است. بنابراین فشار به بسامد و طول موج بستگی ندارد. واحد فشار صوت در دستگاه متریک نیوتن بر متر مربع و واحد متعارف آن در فیزیک صوت میکرو بار است.

۴- تراز یا مقیاس لگاریتمی (دسی بل) dB: فشار صوتی در فشار جو (شرایط سطح دریا و دمای صفر درجه) از آستانه شنوایی ($10^{-5} \times 2$ پاسکال) تا آستانه درد (20 پاسکال) تغییر می‌کند. دسی‌بل واحدی است بدون بعد که برای بیان

۸۰	10^{-4}	سروصدای اداره
۷۰	10^{-5}	مکالمه
۵۰	10^{-7}	نجوا

۳. معیارهای صدا

تعیین معیارهای (استانداردهای) صدا در صنعت سال‌های زیادی مورد بحث و تبادل نظر بوده است. علت اصلی این بحث‌ها این واقعیت است که مواجهه بیش از حد با صدا برای حس شنوایی و اندام مربوطه زیان‌آور است. میزان و وسعت آسیب به مقدار زیادی به انرژی صدای جذب شده توسط گوش بستگی دارد. در سال ۱۹۶۹ حد مواجهه یا حد آستانه مجاز برابر ۹۰ دسی‌بل برای هشت ساعت کار تعیین شد که در سال‌های بعد در بعضی از کشورها این میزان به ۸۵ دسی‌بل کاهش یافت. مطالعات بعدی نشان داد که به ازای کاهش زمان مواجهه، افزایش تراز فشار صدا زیان‌آور نخواهد بود. این کاهش زمان و افزایش تراز فشار بر اساس نصف شدن زمان مواجهه از یک سو و افزایش تراز فشار صدا به میزان ۵ دسی‌بل از سوی دیگر است. جدول ۲ ارتباط بین زمان مواجهه و میزان تراز فشار صدا را نشان می‌دهد.

جدول ۲. میزان مواجهه با صدا براساس مدت زمان مواجهه [۲۱]

میزان تراز فشار صدا (دسی‌بل)	زمان مواجهه (ساعت)
۸۵	۸
۹۰	۴
۹۵	۲
۱۰۰	۱
۱۰۵	۳۰ دقیقه
۱۱۰	۱۵ دقیقه

۴. صدای ناشی از تخلیه گازها به محیط

نسبت یک کمیت اندازه‌گیری شده به کمیت مبنا به کار می‌رود. با استفاده از واحدها دسی‌بل کمیت فیزیکی یادشده به صورت تراز کمیت، اندازه‌گیری و محاسبه می‌شوند.
۵- تراز شدت صوت: از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$L_1 = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

L_1 : تراز شدت صوت (دسی‌بل)، I : شدت صدای مجهول (وات بر متر مربع)، I_0 : شدت مبنا که برابر ۱۰-۱۲ w/cm^2 است.

تراز فشار صوت: از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$LP = 20 \text{Log} \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

LP : تراز فشار صوت (دسی‌بل)، P : مقدار مؤثر فشار (پاسکال)، P_0 : فشار مبنا که در سیستم متریک برابر با 2×10^{-5} Pa است.

تراز توان صوت: از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Lw = 10 \text{Log} \frac{W}{W_0} \quad (5)$$

Lw : تراز توان صوت (دسی‌بل)، W : توان آکوستیکی (وات)، W_0 : توان آکوستیکی مبنا که در سیستم متریک برابر با 10^{-12} وات است. جدول ۱ توان و تراز صداهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱. توان و تراز صداهای گوناگون [۲۰]

منبع	توان	تراز صدا (dB)
موشک فضایی	10^6	۱۸۰
موتور جت	10^5	۱۷۰
هواپیمای مسافربری	10^3	۱۵۰
بوق خودرو	10^{-1}	۱۱۰
رادیو (صدای بلند)	10^{-2}	۱۰۰
فریاد	10^{-3}	۹۰

یکی از مهم‌ترین منابع تولید صدا، تخلیه گازها به محیط از طریق مسیرهای تخلیه^۴ است. این تخلیه می‌تواند در هنگام کنترل فشار به وسیله شیرهای اطمینان (PSV)^۵ باشد و یا خروجی یک اگزوز مد نظر باشد. در زمان ورود جت جریان به محیط در مرحله اول باعث تولید جریان‌های گردابی کوچک می‌شود که صدای با بسامد بالا را تولید می‌کند و با افزایش نفوذ سیال به محیط، جریان‌های گردابی بزرگ‌تری تولید می‌شود که صدا با بسامدهای پایین در این منطقه تولید می‌گردد. وجود هرگونه مانع در دهانه باعث ایجاد جریان‌های گردابی شده و جریان‌های گردابی بزرگ‌تر صدا با بسامدهای مختلف را تولید می‌کند. می‌توان با ایجاد جریان‌های هم‌رفت در محل تخلیه از ایجاد جریان‌های گردابی بزرگ جلوگیری کرد. از جمله راه‌های کاهش صدا در این جریان‌ها استفاده از تقسیم کردن جت جریان به چند جریان است که با این روش جریان‌های گردابی ریزتری تولید می‌گردد. یکی دیگر از راه‌های کنترل صدا استفاده از دیفیوزر با قطر سوراخ‌های کم است. در این روش جریان تخلیه شده از هر سوراخ به علت کوچک بودن قطر سوراخ تخلیه شده صدای با بسامد کمتری را تولید خواهد کرد. انباره‌های اگزوز وسایل رایج در کاهش صدای جریان‌ها هستند.

۵. انباره‌ها^۶

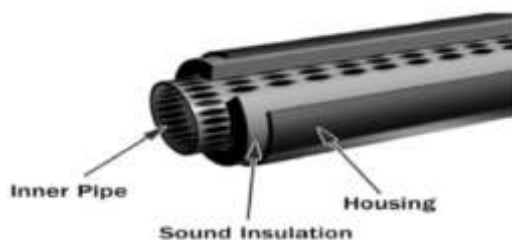
صداخفه‌کن یا سایلنسر نام عمومی برای محفظه‌های کنترل صدا است که می‌توانند تراز صدای ناشی از خروج پر فشار یک گاز یا هوا را در خروجی کاهش دهند. نحوه کار صداخفه‌کن به این صورت هست که با جداسازی بسامدهای صوتی از جریان‌های خروجی و انتقال آنها به یکی از مهم‌ترین اجزای یک منبع اگزوز یعنی اتاق‌های کاهنده صدا و برخورد به دیواره‌های آنها صداهای اضافی را دفع می‌کند. صداخفه‌کن‌ها در دو نوع فعال و غیرفعال کار می‌کنند. در نوع فعال به وسیله حسگرهای صوتی هویت

امواج منتشر شده از یک منبع تعیین شده و با استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی و بر اساس تداخل امواج، امواجی تولید می‌کنند که برابر قرینه صوت‌های اولیه باشد. در روش غیرفعال که به صورت رایج در بازار مشاهده می‌شوند با استفاده از المان‌های واکنشی و جذبی و به روش مکانیکی سطح صوت کاهش داده می‌شود. مثلاً یکی از روش‌ها برخورد بسامد یا صداها با دیواره روبه‌روی لوله انتقال دهنده موج‌ها در منبع و برگشت این بسامدها به لوله مذکور و منفی شدن حرکت بسامدها و برخورد و دفع شدن آنها است. این صداخفه‌کن‌ها به دو دسته انباره‌های جاذب و پخشی-واکنشی تقسیم می‌شوند. اصول کار این انباره‌ها بر اساس ترکیبی از جذب، انعکاس و پخش است.

۱-۵. انباره‌های جذبی

در این دسته صدا از میان یک محفظه پر شده از صفحات مشبک و مواد متخلخل جاذب صوت عبور داده می‌شود. محیط مورد نظر عموماً از الیاف فلزی مانند پشم فولاد انتخاب می‌شود هرچندکه می‌توان از الیاف مرکب نیز استفاده نمود. شرط استفاده از این روش این است که افت فشار زیادی در مسیر عبور ایجاد نکند.

این نوع برای خروجی موتورهای درون‌سوز، بخار، هوای فشرده ناشی از ابزارهای بادی و موتور سیکلت‌ها کاربرد دارد. در انتخاب نوع پشم فلز باید تناسب آن با ماهیت کار در نظر گرفته شود. مثلاً برای خروجی بخار بهتر است از موادی که متأثر از رطوبت نمی‌شوند استفاده گردد.



شکل ۴. انباره‌های جذبی [۲۲]

۲-۵. انباره‌های پخشی - واکنشی

در این وسیله هوا یا گاز پرفشار به درون این محفظه که شرایط انبساط هوا یا گاز را فراهم می‌کند در طی چند مرحله به دلیل انبساط گاز و نیز برخورد و بازتاب مکرر از دیواره‌ها تراز فشار صوت کاهش می‌یابد. اصولاً برای دستیابی به نتایج بهتر، انباره‌هایی طراحی می‌گردد که از هر دو خصوصیت جذب و پخش به طور توأم استفاده نماید.



شکل ۵. انباره‌های پخشی - واکنشی [۲۲]

جهت نتیجه‌ای خاص طراحی و تولید شده است. از این رو به انتخاب یک صنعت مورد استفاده این مکانیزم از صنایع ذکر شده جهت این تحقیق انتخاب می‌شود.

۱-۶. پارامترهای تعیین شده برای انتخاب

صداخفه‌کن مناسب

۱. در دسترس بودن
۲. هزینه ساخت
۳. ابعاد
۴. تکنولوژی ساخت

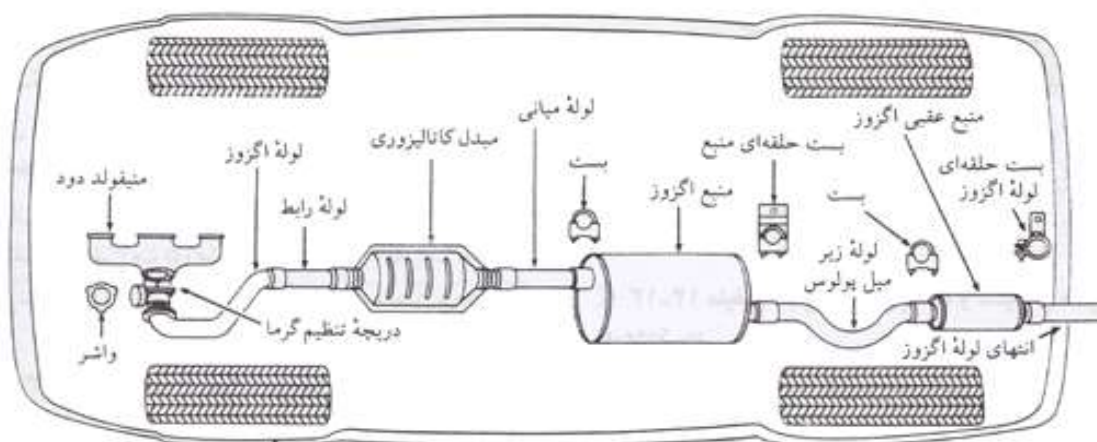
با توجه به پارامترهای عنوان شده و بررسی صداخفه‌کن‌ها در صنایع مختلف، می‌توان صنعت خودروسازی را منطبق بر این تحقیق انتخاب نمود.

۶-۶. پارامترهای مهم صداخفه‌کن‌ها

در صورت طراحی صحیح انباره‌ها، تراز فشار صوت به میزان زیادی کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده و تجربیات حاکی از موفقیت استفاده از این دستگاه‌های کنترل صداست. صداخفه‌کن‌ها در صنایع نظامی، خودروسازی، نیروگاهی و ایمنی افراد کاربرد دارد که هر کدام دارای ساز و کار مختلف

۶-۲. پارامترهای طراحی در یک صداخفه‌کن

۱. حجم و ابعاد صداخفه‌کن
 ۲. تعداد محفظه‌ها
 ۳. قطر لوله‌های ورودی و خروجی و تعداد آنها
 ۴. قطر سوراخ‌ها و تعداد آنها
- در شکل ۶ اجزای سیستم آگزوز در یک خودرو نشان داده شده است.



شکل ۶. اجزای سیستم آگزوز

۷. مشخصات چند نمونه از صداخفه‌کن‌های موجود در صنایع خودروسازی

در این بخش چند نمونه از صداخفه‌کن‌های خودروهای مرسوم در بازار که در داخل کشور تولید می‌گردد، بررسی و تحلیل می‌شود. نمونه‌های بررسی شده در کارخانه آگزوسازی نیشابور^۷ (KEMC)، بزرگ‌ترین کارخانه تولیدی سیستم آگزوز در کشور ساخته شده است.

معمولاً جنس این صداخفه‌کن‌ها از جنس آلومیناز و یا ورق گالوانیزه است که با استفاده از جوش CO₂ مونتاژ می‌شوند. در صداخفه‌کن واگن هود از پشم شیشه و پشم سنگ استفاده شده است.

در کپسول‌های داخل صداخفه‌کن هم از پشم سنگ و پشم شیشه جهت کاهش دما و کاهش صدا استفاده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات صداخفه‌کن خودروهای مختلف

قطر لوله‌های ورودی و خروجی (cm)	تعداد کپسولی	تعداد بافل‌ها	حجم (L)	ابعاد (cm)	دبی جرمی (kg/h)	حجم موتور (cc)	
۵	۰	۰	۲	۲۸×۱۰	۱۰۰۰	۱۵۹۸	پیکان
۴	۰	۳	۹	۳۳×۱۲	۹۰۰	۱۳۲۳	پراید
۵	۳	۴	۱۰	۵۲×۱۶	۱۱۵۰	۱۷۶۱	پژو ۴۰۵ _ سمند XU7
۵	۰	۳	۱۰	۵۲×۱۶	۱۱۰۰	۱۶۴۵	سمند EF7
۵	۲	۳	۱۳	۵۳×۱۶	۹۰۰	۱۳۶۰	پژو ۲۰۶
۵	۰	۰	۴	۵۸×۹	۱۰۵۰	۱۵۹۸	نوع کپسولی تندر ۹۰
۵	۰	۰	۸	۵۴×۱۴	۱۰۵۰	۱۵۹۸	نوع کتابی تندر ۹۰
۵	۱	۳	۲۰	۴۴×۲۴	۱۳۰۰	۱۹۷۱	ام وی ام ۵۳۰
۱۱	۰	۶	۱۰۱	۱۰۰×۳۶	۷۷۰۰	۱۱۵۸۰	واگن هود (دیزل)



شکل ۷. کپسول‌های فشار قوی



شکل ۸. شیر تنظیم فشار

۸. ارزیابی تجربی صداخفه‌کن‌ها

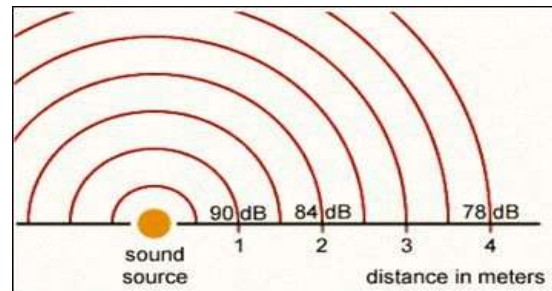
شرایط استاندارد و ایده‌آل برای انجام تست:

۱. اتاق آزمایش آکوستیک
۲. دسی‌بل سنج دیجیتال
۳. کپسول فشار قوی با شیر تنظیم جهت رسیدن به فشار مورد نظر
۴. فاصله ۵۰ سانتی‌متری دسی‌بل سنج و زاویه ۴۵ درجه از خروجی صداخفه‌کن



شکل ۱۰. رابط کپسول و صداخفه کن تندر نود جهت تست

شکل ۹ نشان می‌دهد که فاصله از منبع صوت کاهش صدا را به دنبال دارد.



شکل ۹. کاهش میزان صوت بر حسب فاصله از یک منبع صوت

پس از بستن تبدیل به صداخفه کن مورد نظر و بستن شلنگ به سمت مقابل آن آزمایش در فشارهای مختلف انجام شد. محل دسی بل سنج در فاصله ۵۰ سانتی متر و در زاویه ۴۵ درجه از خروجی صداخفه کن قرار داده شد.

۸-۲. نتایج آزمایش

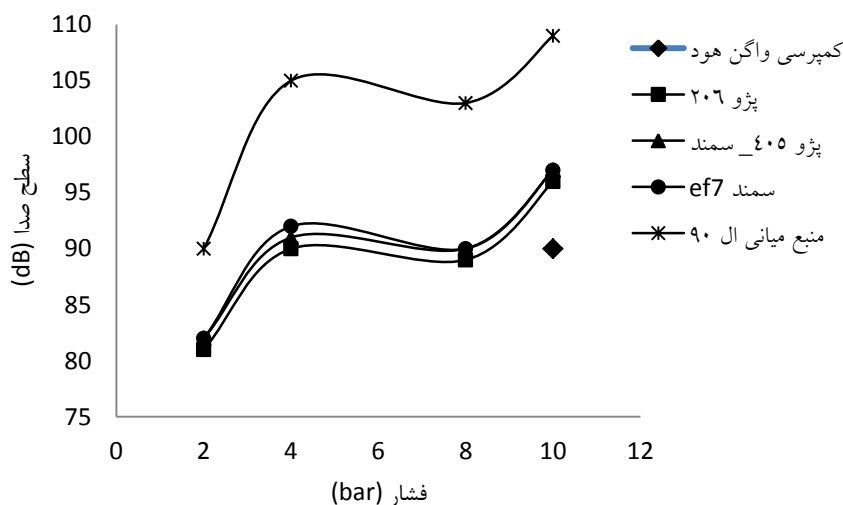
آزمایش برای پنج نوع صداخفه کن و در فشارهای مختلف در اتاق غیر آکوستیک با ۲۵ دسی بل آلودگی صوتی انجام شد و نتایج خروجی صدای آنها بر واحد دسی بل مطابق جدول ۴ و شکل ۱۱ است.

۸-۱. نحوه انجام آزمایش

تجهیزات لازم شامل یک کپسول فشار قوی، شیر تنظیم و یک شلنگ فشار قوی با قطر ۱۰ میلی متر برای متصل نمودن خروجی هوا در کپسول به ورودی صداخفه کن استفاده شد. با توجه به سطح مقطع متفاوت در خروجی شلنگ و ورودی صداخفه کن یک قطعه رابط تبدیل به صورت شکل ۱۰ آماده شد تا بتوان صداخفه کن‌های مورد نظر را مورد آزمایش قرار داد.

جدول ۴. خلاصه نتایج تست صداخفه کن‌ها

bar 10	bar 8	bar 4	bar 2	صداخفه کن / فشار
۹۰	-	-	-	کمپرسی واگن هود
۹۶	۸۹	۹۰	۸۱	پژو ۲۰۶
۹۷	۹۰	۹۱	۸۲	پژو ۴۰۵-سمند
۹۷	۹۰	۹۲	۸۲	سمند EF7
۱۰۹	۱۰۳	۱۰۵	۹۰	منبع میانی ال ۹۰



شکل ۱۱. خلاصه نتایج تست صداخفه‌کن‌ها

تست بدترین نتیجه را دارند که این نشان می‌دهد که ابعاد، حجم و سازوکار این صداخفه‌کن‌ها پارامتر مهمی در کاهش صدای خروجی هستند. با توجه به ابعاد صداخفه‌کن‌های خودروی ۴۰۵ و سمند EF7 و وجه تشابه آنها، مشاهده می‌شود که در تست هم دارای نتایج شبیه به هم هستند. می‌توان نتیجه گرفت که در یک شرایط مشابه، حجم صداخفه‌کن و ابعاد آن یکی از مهم‌ترین پارامترها جهت طراحی صداخفه‌کن است. با بیشتر شدن حجم موتور، دبی حجمی افزایش یافته و تغییر در افزایش حجم و هندسه صداخفه‌کن امری ضروری است.

۱۰. قدردانی

از همکاری شرکت آگزوسازی خراسان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

در شکل ۱۱ سطح صدای خروجی انباری خودروهای مختلف در فشارهای مختلف مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که منبع میانی خودرو ال ۹۰ در تمامی فشارها بیشترین سطح صدا را دارد و انباری کامپرسی واگن هود که فقط در فشار ۱۰ بار اندازه‌گیری شده است، کمترین سطح صدا را دارد. سطح صدای کم این انباری به حجم بزرگ آن مربوط می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد انباری خودرو پژو ۲۰۶ از انباری خودروهای پژو ۴۰۵ و سمند XU7 و انباری این خودروها از انباری سمند EF7 سطح صدای کمتری دارند.

۹. نتیجه‌گیری

نتایج تست تجربی نشان داد که صداخفه‌کن کامپرسی واگن هود بهترین نتیجه و منبع انبساط خودروی ال نود در این

۱۱. مأخذ

- [1] Muffler <http://en.wikipedia.org/wiki/Muffler>.
- [2] Isshiki, Y., Shimamoto, Y., & Wakisaka, T., "Simultaneous prediction of pressure losses and acoustic characteristics in silencers by numerical simulation" *SAE transactions*, 1996, pp.905-918.
- [3] Chaudhri, J. H., Patel, B. S., & Shah, S. A., "Muffler Design for Automotive Exhaust Noise Attenuation—A Review", *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, Vol.4, no.1, pp.220-223.

- [4] Hemond CJ., "Engineering acoustics and noise control". Prentice Hall, 1983.
- [5] پاکیان بوشهری مجتبی، کشتکار عبدالرحیم، سعادت آبادی محمدسعادت، روشن ضمیر مهران، زیبا عبدالعظیم، "طراحی سیستم صداخفه کن جهت کاهش صدای اگزوز موتورهای دیزل دریایی (نمونه مطالعاتی دیزل ژنراتور MTU 6V 183 AA53)"، هفدهمین همایش صنایع دریایی جزیره کیش (MIC 2015)، ۱۳۹۴.
- [6] Avcu M, Teke M, Kopuz Ş. "MTU 16V 4000 M90 BRAND/MODEL DIESEL ENGINE EXHAUST SYSTEM DESIGN". *Journal of Naval Science and Engineering*, 2010, Vol.6, no.1, pp.39-58.
- [7] Beranek LL, Ver IL. "Noise and vibration control engineering-principles and applications. Noise and vibration control engineering-Principles and applications" John Wiley & Sons, Inc., 1992, 814 p.
- [8] اسمعیلزاده عصمت، حکیمی حسینعلی، فرخی محمدنبی، "طراحی و اجرای راهکار کنترل آلودگی صوتی ناشی از blow-off های نیروگاه حرارتی"، چهارمین همایش سراسری بهداشت حرفه ای ایران-همدان، ۱۳۸۳.
- [9] سید مجید هاشمیان، سید مهدی جباری، "بررسی کاهش آلودگی صوتی مسیرهای تخلیه سیال به اتمسفر با استفاده از سایلنسرهای ونت به روش عددی"، دومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات، تهران، ۱۳۹۱.
- [۱۰] محمد مهدی مهدی، بزاززاده مهرداد، "کاهش نویز موتور کمکی هواپیما با استفاده از مافلر سوراخ دار"، فصلنامه مکانیک هوافضا، جلد ۱۱ شماره ۴ صفحات ۹۵ الی ۱۰۴، ۱۳۹۴.
- [۱۱] ملکی، علی، رضوانی میثم، مرادی محمد، "بررسی اکوستیکی رزوناتور چند خودرو متداول در ایران"، مجله مهندسی مکانیک، جلد ۳، شماره ۱، ۱۳۹۲.
- [12] Mohammed Ali AA, Ali YD, Jassim RK. "Using the swirl phenomenon in automotive engine mufflers" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2007, Vol.221, no.7, pp.837-43.
- [13] Nilsson D., "Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants", *Biomass and Bioenergy*, 1997, Vol.13, no.1-2, pp.63-73.
- [۱۴] قاضی خانی محسن، شهاب احمدی محمدصدیق، "بررسی تأثیر بازگشت ناپذیری های انباره اگزوز بر شدت صدای خروجی از اگزوز در موتورهای دیزل"، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۱۳۸۸.
- [15] Pratap A, Kalita U, Kumar S., "Optimization of Transmission Loss of Perforated Tube Muffler by Using CAE Tool ANSYS", *International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*, 2015, vol.2, Issue.5
- [16] Wu TW, Zhang P, Cheng CY., "Boundary element analysis of mufflers with an improved method for deriving the four-pole parameters", *Journal of sound and vibration*. 1998, vol.217, no.4, pp.767-79.
- [۱۷] شجاعی فرد، محمدحسن، طالبی توتی روح الله، یدالهی عارف، "محاسبه افت انتقال صوت مافلر به روش المان مرزی با استفاده از روش سه نقطه ای" نوزدهمین همایش سالانه مهندسی مکانیک ایران، بیرجند، ۱۳۹۰.
- [18] Umair M, Basit A, Prabhakar A, Gautam A., "Modification in Muffler Design to Reduce The Backpressure", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, (An ISO 3297: 2007 Certified Organization), 2007, P.3297.
- [19] Hemond CJ., "Engineering acoustics and noise control", Prentice Hall, 1983.
- [20] Bell, L.H., "Fundamentals of Industrial noise control", Marcel Dekker, Inc., 1982, p.572.
- [21] Acton WI., "Protection of Workers against Noise and Vibration in the Working Environment", *British journal of industrial medicine*, 1978, vol.35, no.1, p.80.

[22] Potente D., "General design principles for an automotive muffler", In *Proceedings of ACOUSTICS*, 2005 Nov, pp.9-11.

پی نوشت:

1. Accelerated Processing Unit
4. Baffle
5. Spectrum
4. Exhaust
5. Pressure Safety Valve
6. Mufflers
7. Khorasan Exhaust MFG Co