

بهینه‌سازی ابعاد هندسی مؤثر و مطالعه مواد جاذب در عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز

تینا حسن‌ولی، سالار زمانی، روح‌الله طالبی توتی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

امروزه مسئله نوفه و صداهای مزاحم، از جمله چالش‌های اساسی در طراحی صداخفه‌کن‌ها یا انباره‌های آگزوز می‌باشد، که برای کاهش تراز نوفه حاصله از جریان خروجی موتور خودروها استفاده می‌شود. بنابراین، نوفه تولیدی توسط سامانه آگزوز را می‌توان از طریق پیش‌بینی و محاسبه تراز افت تراگسیل صدا، که قابل ملاحظه و غیرقابل اغماض است، مهار نمود. گزارش شده که انباره آگزوز بررسی شده، دارای سطح مقطع بیضوی، سه لوله هم‌راستای متخلخل، چهار محفظه انبساط و سه صفحه جداکننده می‌باشد. به‌طور کلی، هدف از این تحقیق، تحلیل عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی انباره آگزوز با استفاده از روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) می‌باشد. هم‌چنین، به‌منظور نزدیک شدن به تراز بیشینه افت تراگسیل، مؤلفه‌های هندسی مؤثر با استفاده از شیوه‌های سطح پاسخ و تاگوچی بهینه‌سازی شدند. نتایج حاصل از این شیوه با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت، با توجه به عدم وابستگی تراز افت تراگسیل صدا در بسامدهای بازآوایش (تشدید) به تغییر ابعاد مؤلفه‌های هندسی، با افزودن مواد جاذب صدا به پوسته انباره آگزوز، عملکرد تنک شدن (میرایی) صوتی بیش از دو برابر افزایش یافت و تأثیر مواد جاذب مختلف در این شبیه‌سازی عددی، بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: انباره آگزوز، افت تراگسیل صدا، روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی)، بهینه‌سازی، ماده جاذب.

۱. مقدمه

آلودگی صوتی ناشی از جریان خروجی حاصل از احتراق داخلی موتور خودروها، از جمله نگرانی‌های زندگی بشری به شمار می‌آید که می‌توان با نصب انباره آگزوز در سامانه آگزوز خودروها و با در نظر گرفتن عملکرد موتور، تراز نوفه خروجی را کاهش داد و انتشار صوتی را در محدوده مناسب مهار نمود. به‌طور کلی انباره آگزوز، نامی عمومی برای محفظه‌های مهار صدا است که می‌تواند تراز صدای ناشی از خروج پرفشار شاره را در خروجی سامانه آگزوز کاهش دهد.

به‌منظور افزایش کارایی و بهبود عملکرد انباره آگزوز در بسامدهای گوناگون و هم‌چنین برای کاهش نوفه ایجادشده توسط جریان، از مجاری و لوله‌های روزنه‌دار استفاده می‌گردد. هم‌چنین تغییر مؤلفه‌هایی از قبیل تغییر شکل سطح مقطع عرضی انباره آگزوز به شکل‌های دایره‌ای، بیضی، مربع، مستطیل و هم‌چنین تغییر قطر

لوله‌های داخلی، طول محفظه‌های انبساط، طول لوله روزنه‌دار، میزان تخلخل لوله‌ها، قطر روزنه‌ها و صفحات داخلی روزنه‌دار از جمله عواملی هستند که می‌توانند تراز افت تراگسیل صدا را تحت تأثیر خود قرار دهند [۱]. از جمله مؤلفه‌های اصلی برای پیش‌بینی عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی انباره آگزوز، تراز افت تراگسیل صدا است که نسبت توان ورودی به توان انتقال‌یافته در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی در این مقاله به‌منظور محاسبه تراز افت تراگسیل صدا و کاهش تراز فشار صدا، از روش عددی اجزاء مرزی استفاده شده است [۲].

جی و همکاران در سال ۲۰۰۵، با استفاده از روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی)، رفتار صوتی محفظه‌های انبساط دوگانه و سه‌گانه انباره‌های آگزوز را مطالعه کردند و تأثیر آن‌ها را بر روی تراز افت تراگسیل صدا و عملکرد میرایی صوتی بررسی نمودند [۳]. هم‌چنین آن‌ها تأثیر برخی از مؤلفه‌های مؤثر هندسی مانند طول لوله متصل‌کننده داخلی و طول لوله‌های ورودی و خروجی را

* نویسنده پاسخگو: rtalebi@iust.ac.ir

مورد بررسی را با به‌کارگیری روش تاگوچی بهینه‌سازی نمودند.

به‌طور کلی در این مقاله در ابتدا به بررسی شبیه‌سازی عددی انباره آگزوز که دارای سطح مقطع بیضی، چهار محفظه انبساط، سه لوله روزنه‌دار، سه صفحه جداکننده و لوله‌های ورودی و خروجی می‌باشد، با استفاده از نرم‌افزار طراحی و به‌صورت پارامتریک پرداخته شده است. هم‌چنین عملکرد میرایی صوتی و تراز افت تراگسیل صدای انباره آگزوز مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از تحقیقات پیشین اعتبارسنجی شده است. در ادامه ابعاد مؤلفه‌های هندسی انباره آگزوز مورد بررسی با استفاده از دو روش تاگوچی و سطح پاسخ بهینه‌سازی شده و نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در نهایت به دلیل عدم وابستگی تراز افت تراگسیل صدا در نقاط بازآوایش (تشدید) به تغییر ابعاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر، تأثیر اعمال مواد جاذب صوتی با ضخامت‌ها و مقاومت جریان‌های متفاوت بر تراز افت تراگسیل صدا پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. تحلیل عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز با استفاده

از روش اجزاء مرزی

روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک روش عددی مناسب برای محاسبه نوفه در داخل محفظه‌های صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش اجزاء مرزی به حل معادلات مشتقات جزئی در اجزاء و گره‌های مرزهای محدوده شاره صوتی مورد نظر می‌پردازد. بدین‌منظور برای تمامی عناصر و شبکه‌بندی‌های به وجود آمده، معادله افتراقی (دیفرانسیل) با مشتقات جزئی محاسبه می‌گردد. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر تحلیل، این است که معادلات مشتقات جزئی مربوط به دامنه مورد بررسی، تنها در مرزها در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین برای انجام تحلیل، تنها به گسسته‌سازی معادلات مرزهای مربوطه می‌پردازد. بدین جهت این روش نسبت به سایر روش‌ها همانند روش اجزاء محدود از لحاظ

بررسی نمودند. نتایج حاصل از تحقیق این پژوهشگران نشان می‌دهد، انباره‌های آگزوز که دارای محفظه انبساط چندگانه می‌باشند، دارای عملکرد میرایی صوتی بهتری نسبت به حالت ساده آن در اکثر بسامدهای مورد بررسی می‌باشند.

ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳، با استفاده از روش اجزاء محدود، عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز که دارای لوله میکرو متخلخل است را مورد بررسی قرار دادند و با به‌کارگیری روش اجزاء محدود، رابطه‌ای میان بسامد بازآوایش (تشدید) و طول لوله روزنه‌دار در بازه بسامد ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز ارائه دادند [۴].

کاناده و همکاران در سال ۲۰۱۴، با استفاده از روش چهار قطبی و با به‌کارگیری روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) به تجزیه و تحلیل تراز افت انتقال و افت جاگذاری صوتی انباره آگزوز پرداختند [۵]. انباره آگزوز مورد بررسی دارای یک محفظه انبساط و دو لوله میانی روزنه‌دار هم‌مرکز با لوله‌های ورودی و خروجی که توسط یک دیواره از یکدیگر جدا شده است، می‌باشد. مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل صدا شامل طول لوله روزنه‌دار، ضخامت آن‌ها، درصد تخلخل و طول محفظه انبساط است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی شده‌اند.

بوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷، به‌منظور کاهش تراز نوفه صوتی، به بررسی اثر مؤلفه‌های هندسی انباره آگزوز بر تراز فشار صدا، با در نظر گرفتن کم‌ترین میزان فشار برگشتی، پرداختند [۶]. به‌طور کلی با توجه به این پژوهش، نمونه انباره آگزوز مورد بررسی دارای سه محفظه انبساط، دو صفحه جداکننده و سه لوله موازی است که بر روی امتداد لوله داخلی ورودی روزنه‌هایی تعبیه شده است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهند که با کاهش تعداد و طول لوله‌های روزنه‌دار می‌توان تراز نوفه را کاهش داد.

پراوین و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی و تحلیل تأثیر تغییرات ابعاد مؤلفه‌های هندسی مختلف هم‌چون طول محفظه انبساط، قطر آن و قطر لوله خروجی بر روی تراز افت تراگسیل صدای انباره آگزوز واکنشی پرداختند [۷]. این پژوهشگران با استفاده از روش ماتریس افت انتقال تعمیم‌یافته و با تغییر ابعاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل صدا، عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز

اولین شرط مرزی لازم برای حل اجزاء مرزی، برای سطوح ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است. به گونه‌ای که جریان هوا هنگام برخورد با این سطوح کاملاً از آن‌ها عبور کند. با توجه به تعریف فوق، شرط مرزی در قسمت‌های ورودی و خروجی به ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$\left(-\frac{\nabla \varphi(p)}{\rho} \right) = \frac{i\omega}{\rho c} \varphi(p) - \frac{\tau i\omega}{\rho c} \varphi(p) \quad (7)$$

$$\left(-\frac{\nabla \varphi(p)}{\rho} \right) = \frac{i\omega}{\rho c} \varphi(p) \quad (8)$$

دومین شرط مرزی لازم برای حل اجزاء مرزی، برای سطوح داخلی به گونه‌ای تعریف شده است که جریان هوا در برخورد با آن‌ها، کاملاً منعکس شده و نمی‌تواند از آن‌ها عبور نماید؛ بنابراین این سطوح را می‌توان تحت عنوان دیواره در نظر گرفت. شرط مرزی در نظر گرفته شده برای این سطوح با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید.

(۹)

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

سومین شرط مرزی برای سطوح روزنه‌دار در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که بخشی از جریان هوا در برخورد با این سطوح، از روزنه‌ها عبور کرده و بخشی دیگر منعکس شده و به مسیر خود ادامه می‌دهند. در این شرط مرزی تنها درصد تخلخل، قطر روزنه‌ها و ضخامت لوله‌ی روزنه‌دار حائز اهمیت می‌باشد [۱۵]. روابط نیمه تجربی مرتبط با مقاومت ظاهری برای یک صفحه روزنه‌دار با استفاده از رابطه (۱۰) به دست آمده است.

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{1}{\sigma}(\theta + iX) + \theta_r \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۱۰) نماد σ بیانگر تخلخل ناحیه روزنه‌دار می‌باشد که نسبت مساحت روزنه به مساحت سطح روزنه‌دار در نظر گرفته شده است. هم‌چنین نماد θ و X و به ترتیب بیانگر مقاومت ویژه^۱، رکتانس ویژه^۲ و مقاومت جریانی ویژه می‌باشند و با استفاده از روابط (۱۱)

حجم محاسباتی و مدت زمان تحلیل دارای برتری است [۸].

برای به دست آمدن روابط مربوط به حل اجزاء مرزی، هدف اصلی جای‌گذاری معادلات مربوط به شبیه‌سازی برای حل مرزها است. برای انجام تحلیل صوتی مربوط به مطالعه فوق، از معادله هلمهولتز استفاده شده است [۹]. فرم کلی معادله هلمهولتز با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\nabla^2 \varphi(p) + k^2 \varphi(p) = 0 \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، $\varphi(p)$ پتانسیل سرعت صوتی، p مختصات نقطه مقید در دامنه و k تعداد موج می‌باشد.

با توجه به این که شار مورد بررسی در انباره آگزوز، هوا در نظر گرفته شده است، مقدار فشار صوتی نقطه p در دامنه شار صوتی وابسته به پتانسیل سرعت با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$P(p) = i\rho\omega\varphi(p) \quad (2)$$

هم‌چنین برای محاسبه تراز فشار صدا بر حسب دسی‌بل در جایی که P^* فشار مرجع شار در نظر گرفته شده است، از فرمول (۳) استفاده می‌شود.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{P(p)}{P^*} \right| \right) \quad (3)$$

برای حل معادله هلمهولتز با استفاده از روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) در دامنه شار، نیاز به گسسته‌سازی و تشکیل روابط برای هر جزء از سطح بسته انباره آگزوز می‌باشد [۱۰-۱۴]. در نهایت رابطه مربوط به افت تراکسیل صدا برای دامنه شار صوتی بسته انباره آگزوز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴) مقدار P_{in} فشار صوتی در قسمت ورودی و P_{out} فشار صوتی در قسمت خروجی انباره آگزوز است، که با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست آورده می‌شود.

$$P_{in} = \int_s \frac{P_c^*}{\rho c} dA \quad (5)$$

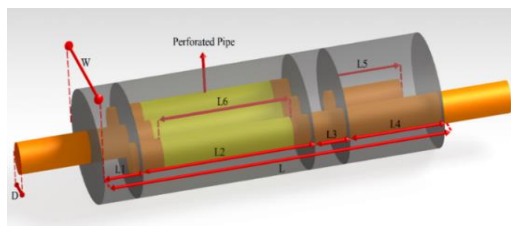
$$P_{out} = \int_s \frac{P_c}{\rho c} dA \quad (6)$$

۲-۲. شرایط مرزی حاکم بر مسئله

¹ Specific resistance

² Specific reactance

می‌شود. در حالت دوم به کمک لوله روزنه‌دار خروجی، انباره آگزوز را ترک می‌نماید و یا وارد محفظه انبساط اول می‌شود. هم‌چنین جریان هوا می‌تواند بدون این‌که از روزنه‌های لوله مرکزی خارج شود، به مسیر خود ادامه دهد و وارد محفظه انبساط سوم و یا چهارم شود. در این صورت جریان هوا دوباره به محفظه انبساط دوم بازمی‌گردد و از طریق لوله روزنه‌دار لوله خروجی انباره آگزوز را ترک می‌نماید.



شکل ۱ هندسه انباره آگزوز مورد بررسی دارای ابعاد پارامتریک.

با توجه به شکل ۱، طول کلی محفظه انبساط که با نماد L نمایش داده شده است، از مجموع طول‌های چهار محفظه انبساط که با نمادهای L_1, L_2, L_3, L_4 نشان داده شده‌اند، به‌دست می‌آید. طول لوله‌های روزنه‌دار با رنگ زرد و با نماد L_e نشان داده شده است. لازم به ذکر است که طول هر سه لوله روزنه‌دار یکسان در نظر گرفته شده، هم‌چنین مؤلفه‌های σ, d_h و t_w متغیرهای مرتبط با لوله‌های روزنه‌دار و به‌ترتیب بیانگر درصد تخلخل، قطر روزنه و ضخامت دیواره می‌باشند. سطح مقطع محفظه انبساط انباره آگزوز دارای قطر بزرگ W و قطر کوچک H که ضریبی از قطر بزرگ در نظر گرفته شده، می‌باشد. هم‌چنین سطح مقطع لوله‌های داخلی به‌صورت دایره و با قطر D فرض شده است. L_e بیانگر طول امتداد یافته لوله داخلی در محفظه چهارم است. در جدول ۱ ابعاد مؤلفه‌های هندسی انباره آگزوز شبیه‌سازی شده، نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در تحلیل صوتی انباره آگزوز، هندسه مورد بررسی با استفاده از عناصر سه‌ضلعی شبکه‌بندی شده است. بدیهی است که کاهش طول عناصر و افزایش تعداد آن‌ها دقت حل را افزایش می‌دهد، اما سبب افزایش زمان محاسبات توسط

و (۱۲) به‌دست می‌آیند. لازم به ذکر است که مقاومت ویژه جریان وابسته به نوع ماده و شماره مورد بررسی می‌باشد و مقدار آن عددی بین صفر تا ۱ است. هم‌چنین مقاومت جریانی این امکان را فراهم می‌نماید تا سهم اضافی برای مقاومت ظاهری مشخص بر روی انباره آگزوز اعمال شده و تأثیر آن را بررسی نماید.

$$\theta = \sqrt{\lambda \mu K \left(1 + \frac{t_p}{d_h}\right)} \quad (11)$$

$$X = K (t_p + \delta_h) \quad (12)$$

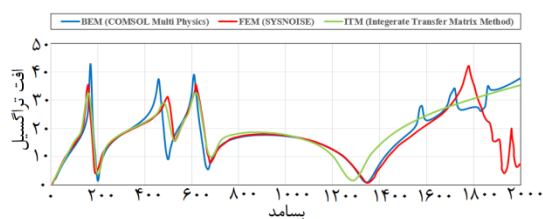
با توجه به روابط (۱۱) و (۱۲)، نمادهای μ, K, t_p, d_h و δ_h به‌ترتیب بیانگر لزجت دینامیکی، عدد موج، ضخامت صفحه، قطر روزنه‌ها و درصد خطای نهایی^۱ است. لازم به ذکر است که δ_h ، عموماً یک چهارم قطر روزنه در نظر گرفته می‌شود [۱۶-۱۷].

۳. نتایج

۳-۱. شبیه‌سازی تراز افت تراگیل صدای انباره آگزوز
به‌طور کلی شماره موجود در داخل انباره آگزوز مورد بررسی، هوا در نظر گرفته شده است که دارای دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس و سرعت صوتی ۶۰۰ متر بر ثانیه است [۱۸]. علت در نظر گرفتن این مقادیر برای مؤلفه‌های دما و سرعت صوتی، مطابقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تراز افت تراگیل صدا در انباره آگزوز مورد بررسی با نتایج به‌دست آمده توسط مونجال و همکاران می‌باشد. شکل ۱ هندسه انباره آگزوز را که به‌صورت پارامتریک در نرم‌افزار الگوسازی کتیا طراحی شده، نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ انباره آگزوز مورد مطالعه دارای سطح مقطع بیضی و چهار محفظه انبساط است. هم‌چنین محفظه‌های انبساط توسط سه صفحه جداکننده از یکدیگر مجزا شده‌اند. در داخل محفظه انبساط دوم، سه لوله روزنه‌دار به‌صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند. جریان هوا از طریق لوله مرکزی وارد انباره آگزوز می‌شود و سپس از بخش روزنه‌دار آن خارج می‌شود و به کمک سایر لوله‌های روزنه‌دار، جذب می‌گردد. در این صورت جریان هوا به دو حالت انتقال پیدا می‌کند. در حالت اول به کمک یکی از لوله‌های روزنه‌دار وارد محفظه‌های انبساط اول یا سوم

^۱ End correction

در محدوده بسامد ۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز به‌دست آمده است. با توجه به شکل ۳، نتایج عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی حاصل از حل روش اجزاء مرزی در نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول^۱، با نتایج حاصل از حل الگوی مشابه در نرم‌افزار سیسنویز^۲ که توسط ویجاپاسره و مونجال [۱۸] به‌دست آمده و نتایج تحلیلی ماتریس انتقال، مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، هر سه نمودار در بازه بسامدی ۱۰ تا ۱۷۳۰ هرتز با یکدیگر تطابق نسبتاً مناسبی داشته‌اند. دو نمودار حاصل از نتایج عددی در محدوده بسامدی ۱۷۳۰ تا ۲۰۰۰ هرتز از یکدیگر کمی انحراف دارند. دلیل میزان کم انحراف این است که در روش اجزاء محدود به دلیل افزایش میزان محاسبات، دقت حل افزایش می‌یابد.



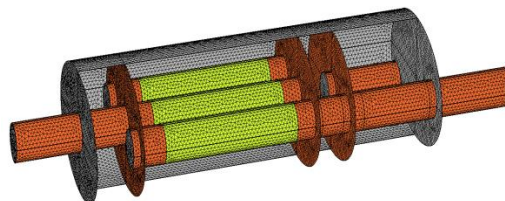
شکل ۳ مقایسه عملکرد میرایی صوتی با استفاده از روش اجزاء محدود در دو نرم‌افزار کامسول و سیسنویز.

نقشه‌های رنگی تراز فشار صدا در بسامدهای بازآوایش (تشدید) ۲۰۰، ۶۷۰ و ۱۳۵۰ در سطح انباره آگزوز به‌ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که در این بسامدها تراز افت تراگسیل صدا در کم‌ترین میزان خود قرار گرفته است. لازم به ذکر است که فشار صوتی در بخش ورودی یک پاسکال در نظر گرفته شده است.

نرم‌افزار می‌شود. بدین جهت بیشینه طول هر عنصر یک‌ششم طول موج در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ ابعاد مؤلفه‌های هندسی انباره آگزوز مورد بررسی [۱۸].

مؤلفه‌ها	ابعاد	توضیحات
L	۴۸۵ (میلی‌متر)	طول محفظه انبساط
W	۲۰۰ (میلی‌متر)	عرض محفظه انبساط
H	$0.65 \times W$ (میلی‌متر)	ارتفاع محفظه انبساط
D	۴۰ (میلی‌متر)	قطر بزرگ لوله داخلی
L_{i0}	۱۰۰ (میلی‌متر)	طول لوله ورودی و خروجی
L_1	۵۵ (میلی‌متر)	طول محفظه انبساط اول
L_2	۲۴۵ (میلی‌متر)	طول محفظه انبساط دوم
L_3	۵۰ (میلی‌متر)	طول محفظه انبساط سوم
L_4	۱۳۵ (میلی‌متر)	طول محفظه انبساط چهارم
L_5	۹۵ (میلی‌متر)	طول لوله صلب
L_6	۱۸۵ (میلی‌متر)	طول لوله روزنه‌دار
d	۲۰ (میلی‌متر)	فاصله لوله‌ها
t_w	۱ (میلی‌متر)	ضخامت دیواره‌ها
σ	۰/۰۴۵	درصد تخلخل
d_h	۳ (میلی‌متر)	قطر روزنه



شکل ۲ نمایی از هندسه شبکه‌بندی‌شده انباره آگزوز دارای سه لوله موازی روزنه‌دار و صفحات جداکننده.

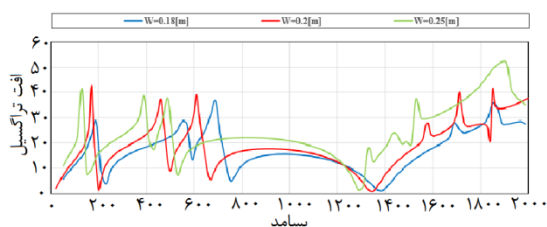
۲-۳. صحت‌سنجی

در این مطالعه عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی انباره آگزوز با استفاده از روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) و

^۱ Comsol

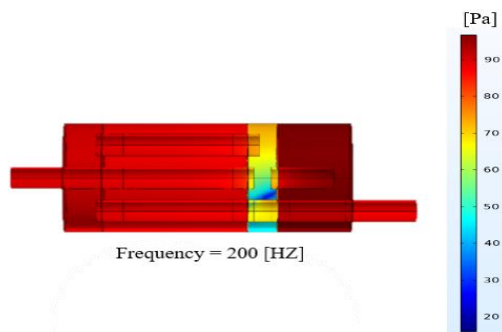
^۲ Sysnoise

نمودن نمودار میرایی صوتی در بازه بسامدی مورد بررسی دارا می‌باشند. به منظور دستیابی به بازه تغییرات شش مؤلفه هندسی مؤثر بر عملکرد میرایی صوتی، میزان تأثیر هر یک از آن‌ها به صورت جداگانه بررسی شده است؛ بنابراین تأثیر افزایش و کاهش هر یک از مؤلفه‌ها روی تراز افت تراگسیل صدا در نظر گرفته شده است. در این بخش تنها تحلیل و بررسی سه مؤلفه هندسی شامل قطر بزرگ محفظه انبساط، شعاع داخلی لوله‌ها و قطر روزه‌ها که بیش‌ترین میزان تأثیر را داشته، به‌عنوان نمونه ذکر شده‌اند. شکل ۷ به بررسی میزان تأثیر تغییر قطر بزرگ محفظه انبساط بر عملکرد میرایی صوتی پرداخته است.

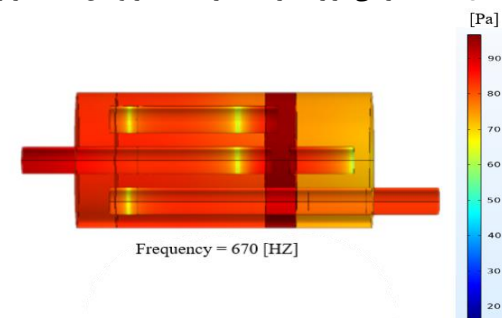


شکل ۷ بررسی اثر قطر بزرگ محفظه انبساط بر تراز افت تراگسیل صدا.

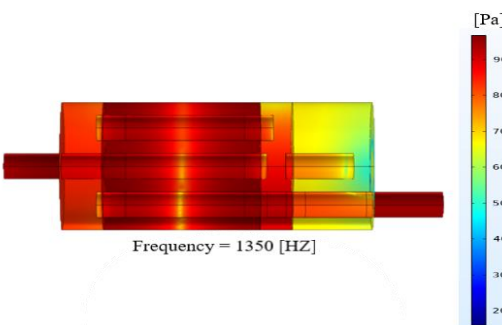
همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش قطر بزرگ محفظه انبساط، افزایش تراز افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی گسترده‌تری صورت گرفته است. این بدین معنا می‌باشد که با افزایش قطر بزرگ محفظه انبساط، افت و خیز تراز افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی ۲۰ تا ۵۳۰ هرتز اتفاق افتاده است. هم‌چنین در بازه بسامدی ۵۳۰ تا ۱۲۹۰ هرتز تراز افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی گسترده‌تری به مقدار بیشینه خود دست پیدا کرده است. در بازه بسامدی ۱۲۹۰ تا ۲۰۰۰ هرتز تراز افت تراگسیل صدا با افزایش قطر بزرگ بیضی، افزایش چشم‌گیری نسبت به حالت اولیه داشته است. با توجه به شکل ۸ میزان تأثیر شعاع لوله‌های داخلی بر عملکرد میرایی صوتی نشان داده شده است.



شکل ۴ نقشه رنگی تراز فشار صدا در بسامد بازآوایش ۲۰۰ هرتز.



شکل ۵ نقشه رنگی تراز فشار صدا در بسامد بازآوایش ۶۷۰ هرتز.



شکل ۶ نقشه رنگی تراز فشار صدا در بسامد بازآوایش ۱۳۵۰ هرتز.

۳-۳. بررسی ابعاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز

عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی در انباره آگزوز مورد بررسی که در شکل ۱ نمایش داده شده است، وابسته به مؤلفه‌های هندسی متفاوتی است. با توجه به تعداد زیاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل، تنها شش مؤلفه هندسی که بیش‌ترین میزان تأثیر را روی عملکرد میرایی صوتی داشته‌اند، در نظر گرفته شده‌اند. شش مؤلفه اصلی که شامل طول لوله روزه‌دار، طول محفظه انبساط دوم، درصد تخلخل، قطر روزه‌ها، شعاع لوله‌های داخلی و قطر بزرگ محفظه انبساط می‌باشند، بیش‌ترین تأثیر را در دستیابی به بیشینه تراز افت تراگسیل صدا و یکنواخت

بهبود عملکرد سامانه و فرآیند طراحی می‌گردد. در این مطالعه ابعاد شش مؤلفه هندسی مؤثر بر عملکرد میرایی صوتی، با استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش و با به‌کارگیری روش سطح پاسخ و تاگوچی بهینه‌سازی شده و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اجزای تشکیل‌دهنده طراحی آزمایش شامل سه بخش اصلی مؤلفه‌ها، سطوح و پاسخ هستند. در این مسئله شش مؤلفه هندسی شامل شعاع لوله‌های داخلی، درصد تخلخل، قطر روزنه‌ها، طول محفظه انبساط دوم، طول لوله‌های روزنه‌دار و قطر بزرگ محفظه انبساط که به ترتیب با نمادهای R_{i0} , σ_p , dh , L_2 و G نمایش داده می‌شوند، به‌عنوان مؤلفه‌های مورد بررسی در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۲ بازه تغییرات هر یک از مؤلفه‌های مؤثر بر تراز افت گسیل صدا را نشان می‌دهند. سطوح مؤلفه‌های در نظر گرفته شده بیانگر بازه تغییرات هر مؤلفه است و پاسخ سامانه بیانگر خروجی آزمایش می‌باشد [۱۷].

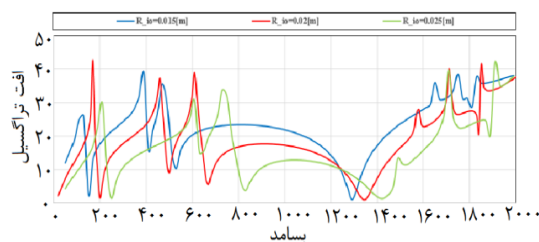
جدول ۲ بازه تغییرات مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل صدا.

d_h (متر)	σ_p (متر)	W (متر)	R_{i0} (متر)	G (متر)	L_2 (متر)	
۰٫۰۰۲	۰٫۰۳۵	۰٫۲۴	۰٫۰۱۵	۰٫۱۹۵	۰٫۲۶۵	۱
۰٫۰۰۳	۰٫۰۴	۰٫۲۴۵	۰٫۰۱۶	۰٫۲	۰٫۲۷	۲
۰٫۰۰۴	۰٫۰۴۵	۰٫۲۵	۰٫۰۱۷	۰٫۲۰۵	۰٫۲۷۵	۳
۰٫۰۰۵	۰٫۰۵	۰٫۲۵۵	۰٫۰۱۸	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۴
۰٫۰۰۶	۰٫۰۵۵	۰٫۲۶	۰٫۰۱۹	۰٫۲۱۵	۰٫۲۸۵	۵

۳-۵. بهینه‌سازی مؤلفه‌های هندسی با استفاده از روش

سطح پاسخ

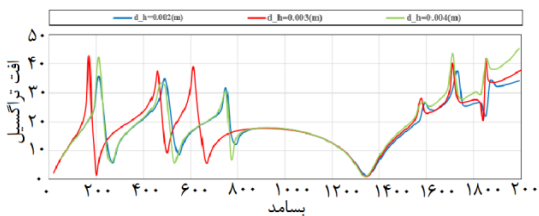
این روش با معیار قرار دادن تعداد متغیرها و حدود بیشینه و کمینه تعیین شده برای هر متغیر، ماتریس آزمایش را طراحی می‌کند. بدین ترتیب تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر در هر آزمون مشخص می‌شوند. لازم به ذکر است که از روش مرکب مرکزی که یکی از روش‌های اصلی سطح پاسخ است، استفاده شده است. شش مؤلفه با پنج بازه متغیر به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده‌اند. دامنه هر مؤلفه می‌بایست کدبندی شده و در محدوده مورد نظر قرار گیرد. بدین جهت برای کدبندی نمودن



شکل ۸ بررسی اثر شعاع لوله‌های داخلی بر عملکرد میرایی صوتی.

با توجه به شکل ۸ با کاهش شعاع لوله‌های داخلی، میانگین افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی ۵۳۰ تا ۲۰۰۰ هرتز افزایش یافته است و بازآوایش‌های (تشدیدهای) اولیه نمودار افت تراگسیل صدا را به بسامدهای پایین‌تری انتقال داده است. هم‌چنین تراز افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی ۱۲۹۰ تا ۲۰۰۰ هرتز افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که به دلیل برخورد لوله‌های داخلی با یکدیگر، نمی‌توان شعاع لوله‌های داخلی را بزرگ‌تر از مقدار ۰٫۰۲۵ متر در نظر گرفت. هم‌چنین به دلیل باریک شدن لوله‌های داخلی و افزایش حجم جریان عبوری، با در نظر گرفتن شعاع لوله‌های داخلی کم‌تر از ۰٫۰۱۵ متر، نتایج حاصل از تراز افت تراگسیل صدا معکوس خواهد شد. در شکل ۹ به بررسی تغییر قطر روزنه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی تراز افت تراگسیل صدا پرداخته شده است.

با توجه به شکل ۹ با در نظر گرفتن تخلخل ۰٫۰۳۵ برای لوله‌های متخلخل، با کاهش قطر روزنه‌های موجود بر سطح لوله‌های متخلخل، نمودار تراز افت تراگسیل صدا در بازه بسامدی مورد بررسی، حالت یکنواخت‌تری نسبت به دو حالت دیگر داشته است.



شکل ۹ بررسی اثر قطر روزنه‌ها بر عملکرد میرایی صوتی.

۳-۴. بهینه‌سازی

به‌طور کلی بهینه‌سازی روشی جهت تعیین بهترین راه‌حل موجود برای دست‌یابی به بالاترین کیفیت طراحی با وجود شرایط و معیارهای خاص آن است. هم‌چنین منجر به

حداقل مربعات^۱ حل شده و ضرایب معادله به‌دست آورده شده و پاسخ پیش‌بینی می‌شود.

با انجام ۳۳ آزمایش طراحی شده و جای‌گذاری پاسخ‌های تراز افت تراگسیل صدا در بسامدهای بازآوایش (تشدید) که کمینه مقدار خود را داشته است، می‌توان به بررسی و تحلیل هر پاسخ که شامل تراز افت تراگسیل صدا در بسامد مربوطه است، پرداخت. ۱۰ نمونه از آزمایش‌های طراحی شده مطابق این روش در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

مطابق با جدول ۳ در هر آزمایش، برای شش مؤلفه هندسی منتخب، مقادیر متفاوتی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳ نمونه آزمایش‌های حاصل از روش سطح پاسخ.

G (متر)	W (متر)	L _r (متر)	d _h (متر)	σ _p	R _{io} (متر)	نمونه
۰٫۲۱	۰٫۲۴۵	۰٫۲۸	۰٫۰۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۱۸	۱
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۷	۲
۰٫۲۱	۰٫۲۵۵	۰٫۲۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۱۶	۳
۰٫۲	۰٫۲۴۵	۰٫۲۸	۰٫۰۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۱۸	۴
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۷	۵
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۷	۶
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۲	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۷	۷
۰٫۲۱	۰٫۲۵۵	۰٫۲۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱۸	۸
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۴۵	۰٫۰۱۵	۹
۰٫۲۰۵	۰٫۲۵	۰٫۲۷۵	۰٫۰۰۴	۰٫۰۳۵	۰٫۰۱۷	۱۰

مقدار بهینه افت تراگسیل صدا برای شش مؤلفه بررسی شده، براساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش سطح پاسخ، در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۴ مقادیر بهینه شش مؤلفه هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل

صدا با استفاده از روش سطح پاسخ.

ابعاد (متر)	مؤلفه‌ها
۰٫۲۷	L _r (متر)
۰٫۲۰۵	G (متر)
۰٫۰۱۶	R _{io} (متر)
۰٫۲۵۵	Ω (میکرو)
۰٫۰۳۵	σ _p

دامنه تغییرات هر مؤلفه می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده نمود.

$$X = \frac{x - \frac{[x_{max} + x_{min}]}{2}}{\frac{[x_{max} - x_{min}]}{2}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) نمادهای X، x، x_{min} و x_{max} به‌ترتیب نشان‌دهنده کد مؤلفه، مؤلفه واقعی، مقادیر کمینه و بیشینه مؤلفه می‌باشند.

به‌طور کلی تحلیل صورت گرفته بر روی داده‌های ورودی با استفاده از روش استاندارد انجام شده است. پس از انتخاب طرح، معادله الگوی تعیین‌شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌گردد. به‌طور کلی مرتبه الگوی استفاده‌شده در این روش، عموماً با توجه به تعداد مؤلفه‌ها و میزان حساسیت پاسخ به سطح، در نظر گرفته می‌شود و مرتبه معادله با توجه به تعداد متغیرهای مستقل آن معین می‌شود. شکل کلی این معادلات به‌صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود [۱۹].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) نمادهای β₀، β_i، β_{ij} و β_{ii} به‌ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل ضرایب در نظر گرفته شده است. x_i، x_j و y به‌ترتیب نماد متغیرهای مستقل کدبندی شده و پاسخ معادلات مرتبه‌های بررسی شده می‌باشند. با به‌دست آوردن ضرایب معادله و با استفاده از رابطه (۱۵) پاسخ پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین نمادسازی ماتریس در رابطه (۱۶) نشان داده شده است.

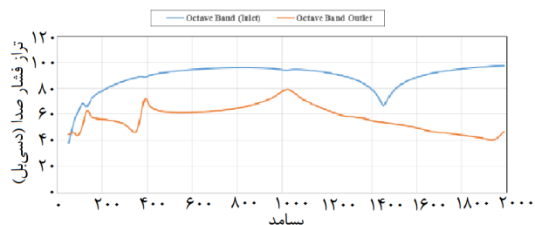
$$y = X\beta + \varepsilon \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، ε نماد درصد خطای در نظر گرفته شده است. دستگاه معادلات رابطه (۱۶)، با استفاده از روش

¹ Least square

به شدت کاهش یافته است و در محدوده استاندارد^۲ مربوط [۲۰] به نوفه حاصل از خودروهای سواری قرار گرفته است. طبق این استاندارد نوفه خروجی از سامانه آگروز خودروها کم‌تر از ۸۶ دسی‌بل است.



شکل ۱۱ بررسی نوفه منتشرشده قبل از ورود و بعد از خروج از انباره آگروز مورد بررسی.

۳-۶. بهینه‌سازی مؤلفه‌های هندسی با استفاده از روش تاگوچی

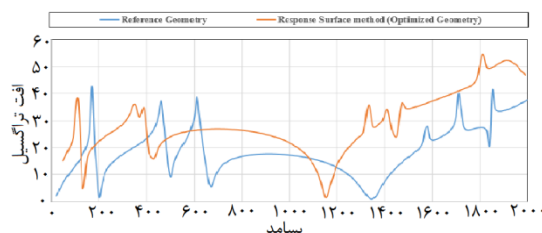
در این بخش مقادیر شش مؤلفه هندسی مؤثر بر تراز افت تراگسیل صدا، با استفاده از روش تاگوچی بهینه‌سازی شده‌اند. روش تاگوچی، برای رسیدن به پاسخ مناسب، فرآیند سه مرحله‌ای طراحی دستگاه‌ها، طراحی مؤلفه‌ها و طراحی بازه بیشینه و کمینه را پیشنهاد می‌نماید. این روش با به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها، امکان بررسی میزان اثرگذاری مؤلفه‌های متفاوت را برای طراحی دستگاه‌هایی با عملکرد بهینه فراهم می‌کند [۲۱]. با قرار دادن شش مؤلفه مؤثر بر تراز افت تراگسیل صدا و تعیین بازه تغییرات مطلوب برای هر مؤلفه مطابق با جدول ۲، تعداد آزمایش‌ها تعیین می‌گردد.

براساس آزمایش‌های طراحی شده مطابق جدول ۵ یک ماتریس با آرایه‌های متعامد تشکیل می‌شود. سطرهای این ماتریس شرایط آزمایش است. با استفاده از محاسبات مربوط به آزمایش‌های آرایه می‌توان جواب را در شرایط بهینه تعیین نمود. در این روش پس از مشخص شدن ۲۵ آزمایش در روش تاگوچی، به بررسی تراز افت تراگسیل صدا در ۱۰ بسامد متفاوت پرداخته می‌شود. در جدول ۵ تنها به سه نمونه آزمایش از ۲۵ آزمایش اشاره شده است که تراز افت تراگسیل صدا به ترتیب در بسامدهای ۱۰، ۱۶۰، ۳۹۰، ۴۲۰، ۱۰۵۰ و ۱۲۰۰ آورده شده است.

۰٫۰۰۲	d_{11} (میکرو)
-------	------------------

تراز افت تراگسیل صدای انباره آگروز در دو حالت اصلی و بهینه که ابعاد هندسی مؤثر به ترتیب دارای مقادیر اولیه و مقادیر بهینه می‌باشند، در شکل ۱۰ با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به کمک بهینه‌سازی ابعاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر عملکرد میرایی صوتی، می‌توان تراز افت تراگسیل صدا را تا حد مناسبی افزایش داد. نسبت افزایش میانگین تراز افت تراگسیل صدای حالت بهینه در مقایسه با حالت اولیه در برخی از نقاط، در حدود ۵۸ درصد افزایش یافته است. در بسامدهای کم‌تر از ۱۱۳۰ هرتز تراز افت تراگسیل صدا حالت یکنواخت‌تری داشته و هم‌چنین پهنای باند بسامد افزایش یافته است. در بازه بسامدی ۱۱۳۰ تا ۲۰۰۰ هرتز تراز افت تراگسیل صدا به صورت پیوسته افزایش چشم‌گیری یافته و در بسامد ۲۰۰۰ هرتز بیشینه افت تراگسیل صدا ۵۲٫۴۱ دسی‌بل است.

لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۱۰ با بهینه‌شدن ابعاد مؤلفه‌های هندسی، نمی‌توان تراز افت تراگسیل صدا را در بسامدهای بازآوایش (تشدید) افزایش داد، زیرا این نقاط تنها وابسته به تغییرات اساسی در هندسه انباره آگروز می‌باشند؛ بنابراین با اعمال ماده جاذب صوتی^۱ به دورتادور محفظه انبساط انباره آگروز، تراز افت تراگسیل صدا در بسامدهای بازآوایش به صورت یکنواخت گسترش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰ مقایسه تراز افت تراگسیل صدای انباره آگروز اصلی با حالت بهینه، با استفاده از روش سطح پاسخ.

شکل ۱۱ به بررسی نوفه منتشرشده، قبل از ورود و بعد از خروج از انباره آگروز پرداخته است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان دریافت که نوفه در بخش خروجی از انباره آگروز

^۲ ECC/388/70

^۱ Absorptive material

بررسی تأثیر بهینه‌سازی بر عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز و مقایسه آن با حالت اصلی برای شش مؤلفه مؤثر، براساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی، صورت گرفته است. مقادیر ابعاد بهینه مؤلفه‌های هندسی در انباره آگزوز مورد بررسی، در جدول ۶ ذکر شده‌اند. با توجه به جدول ۶ قطر بهینه روزنه‌های موجود بر روی لوله‌های متخلخل، ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در صورت کوچک نمودن بیش از اندازه قطر

برای تحلیل آزمایش‌های طراحی شده، از روش استاندارد استفاده شده است. این روش میزان پراکندگی را حول یک مقدار مشخص بیان می‌نماید. به عبارتی دیگر از این مقدار برای بررسی تغییرات پاسخ‌ها در میان ۲۵ آزمایش استفاده می‌شود.

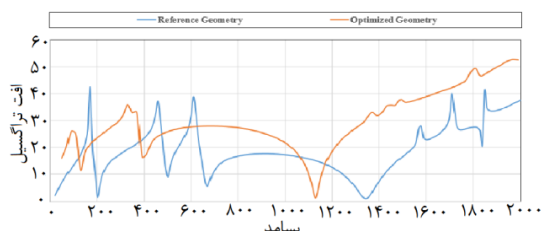
۳-۷. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی

جدول ۵ سه نمونه آزمایش حاصل از روش تاگوچی.

R_{i0} (متر)	σ_p (متر)	d_h (متر)	L_r (متر)	G (متر)	W (متر)
۰٫۰۱۵	۰٫۰۳۵	۰٫۰۰۲	۰٫۲۶۵	۰٫۱۹۵	۰٫۲۴
۰٫۰۱۷	۰٫۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۲۸۵	۰٫۲۱	۰٫۲۶
۰٫۰۱۶	۰٫۰۵۵	۰٫۰۰۴	۰٫۲۶۵	۰٫۲۱	۰٫۲۵۵
TL ₁ (دسی‌بل)	TL ₂ (دسی‌بل)	TL ₃ (دسی‌بل)	TL ₄ (دسی‌بل)	TL ₅ (دسی‌بل)	TL ₆ (دسی‌بل)
۲۹	۱۸	۳۸	۱۵٫۵	۲۰٫۵	۹٫۲۵
۳۲	۱۷	۳۲٫۷	۱۶٫۹	۱۲٫۵	۲۰٫۸
۳۲	۱۷٫۵	۳۱	۳۲	۱۹٫۷	۶٫۵

۰٫۰۰۲	d_h (متر)
-------	-------------

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با بهینه‌شدن ابعاد مؤلفه‌های هندسی از طریق روش تاگوچی، نمی‌توان تراز افت تراگیل صدا را در بسامدهای بازآوایش (تشدید) افزایش داد؛ بنابراین اعمال ماده جاذب صوتی بر پوسته انباره آگزوز سبب بهبود عملکرد میرایی صوتی می‌گردد.



شکل ۱۲ مقایسه تراز افت تراگیل صدای انباره آگزوز اصلی با حالت بهینه آن از طریق روش تاگوچی.

۳-۸. مقایسه نتایج بهینه‌سازی مؤلفه‌های هندسی با استفاده از دو روش سطح پاسخ و تاگوچی

با به‌کارگیری روش سطح پاسخ و تاگوچی در نرم‌افزار طراحی آزمایش، می‌توان به روند انجام بهینه‌سازی سرعت

روزنه‌ها فشار برگشتی ایجاد می‌شود. در این مقاله فشار برگشتی موجود بررسی نشده است. تراز افت تراگیل صدای انباره آگزوز اصلی در مقایسه با حالت بهینه آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به کمک بهینه‌سازی ابعاد مؤلفه‌های هندسی مؤثر بر عملکرد میرایی صوتی می‌توان تراز افت تراگیل صدا را تا حد مناسبی افزایش داد. در بسامدهای کم‌تر از ۱۱۳۰ هرتز تراز افت تراگیل صدا حالت یکنواخت‌تری دارد و پهنای باند بسامد افزایش یافته است. هم‌چنین در بازه بسامد ۱۲۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز، تراز افت تراگیل صدا به‌صورت پیوسته افزایش چشم‌گیری یافته است.

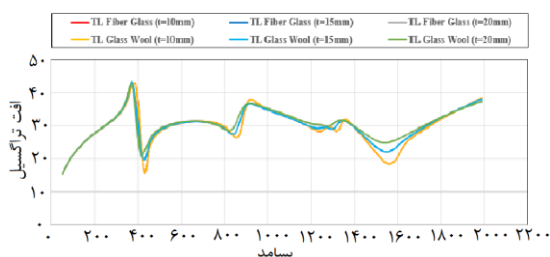
جدول ۶ مقادیر بهینه شش مؤلفه هندسی مؤثر بر افت تراگیل صدا با استفاده از روش تاگوچی.

مؤلفه‌ها	ابعاد (متر)
L_r (متر)	۰٫۲۷۵
G (متر)	۰٫۲۰۵
R_{i0} (متر)	۰٫۰۱۵
W (متر)	۰٫۲۵
σ_p	۰٫۰۳۵

که با توجه به این که نتایج حاصل از بهینه‌سازی ابعاد مؤلفه‌های هندسی به‌کاربرده شده در انباره آگزوز با استفاده از دو روش سطح پاسخ و تاگوچی، دارای نتایج کاملاً مشابه با یکدیگر بوده‌اند، بنابراین ابعاد به‌کاربرده شده در جدول ۶، تحت عنوان ابعاد بهینه استفاده شده و برای بررسی اثر مواد جاذب صوتی، به‌کاربرده شده‌اند. مواد جاذب صوتی، شدت نوفه عبوری را به‌صورت مؤثری کاهش داده‌اند. در این مطالعه مواد جاذب صوتی مورد استفاده پشم‌شیشه و الیاف شیشه^۱ فرض شده و رابطه مقاومت جریانی این مواد با استفاده از رابطه (۱۸) به‌دست آمده است. لازم به ذکر است که در رابطه (۱۸) ρ_{ap} چگالی ظاهری و d_{av} قطر بافت میانی می‌باشد.

$$R_f = \frac{3.18 \times 10^{-9} \times \rho_{ap}^{1/2} \Delta T}{d_{av}^2} \quad (18)$$

با اعمال مواد جاذب صوتی بر پوسته انباره آگزوز مورد بررسی و وابستگی این مواد به بسامد کاری، تأثیر این مواد بر تراز افت تراگسیل صدا در شکل ۱۴ بررسی شده‌اند.



شکل ۱۴ مقایسه تراز افت تراگسیل صدا با اعمال پشم‌شیشه و الیاف شیشه بر پوسته انباره آگزوز با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، اعمال ماده جاذب سبب افزایش بیش از دو برابر تراز افت تراگسیل صدای بسامدهای بازآوایش (تشدید) شده است. هم‌چنین به‌طور کلی عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی توزیع یکنواخت‌تری دارد. از آنجایی که دو ماده جاذب صوتی به‌کاربرده شده، دارای مقاومت جریانی نزدیک به هم می‌باشند، میزان تأثیر ضخامت مواد به‌کاربرده شده در شکل ۱۴ مشخص است. باید توجه داشت که با افزایش بیش از حد ضخامت ماده جاذب صوتی به‌کاربرده شده در پوسته انباره آگزوز، امکان خفگی هوا به وجود خواهد آمد.

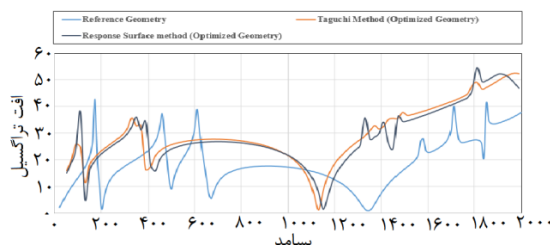
^۱ Fiber glass

بخشید. در واقع این دو روش در مقایسه با سایر روش‌های زمان‌بر اولویت دارند؛ بنابراین این دو روش سبب تسهیل در روند تحقیق، کاهش زمان و هزینه‌ها خواهند شد. به‌طور کلی تعداد آزمایش‌های در نظر گرفته شده در حالت کلی با استفاده از رابطه (۱۷) به‌دست می‌آیند.

$$N = K^M \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، نماد N ، K و M به‌ترتیب بیانگر تعداد کل آزمایش‌ها، تعداد سطوح انتخابی متناسب با هر مؤلفه مؤثر و تعداد مؤلفه‌ها می‌باشند. در این پژوهش شش مؤلفه به‌عنوان مؤثرترین مؤلفه‌های هندسی و برای هر مؤلفه پنج سطح متغیر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین تعداد کل آزمایش‌ها برابر ۱۵۶۲۵ در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تراز افت تراگسیل صدا در انباره آگزوز با ابعاد بهینه در هر دو روش سطح پاسخ و تاگوچی نتایج نسبتاً مشابهی با یکدیگر داشته‌اند؛ بنابراین می‌توان این دو روش را جای‌گزین روش‌های زمان‌بر محاسباتی نمود و بدین ترتیب به روند بهینه‌سازی سهولت بخشید.



شکل ۱۳ مقایسه تراز افت تراگسیل صدای انباره آگزوز با ابعاد مؤلفه‌های هندسی بهینه از طریق دو روش سطح پاسخ و تاگوچی.

۳-۹. بررسی مواد جاذب صوتی مختلف بر عملکرد میرایی صوتی انباره آگزوز

همان‌طور که از نتایج بهینه‌سازی مؤلفه‌های هندسی انباره آگزوز با استفاده از دو روش تاگوچی و سطح پاسخ مشخص است، تراز افت تراگسیل صدا در بسامدهای بازآوایش (تشدید) که تنها وابسته به هندسه آن می‌باشد، بهبود نیافته است. به همین علت اثر استفاده از مواد جاذب صوتی بر روی پوسته انباره آگزوز با اعمال شرط مرزی مربوطه، برای افزایش تراز افت تراگسیل صدا در بسامدهای بازآوایش مطالعه شده است. لازم به ذکر است

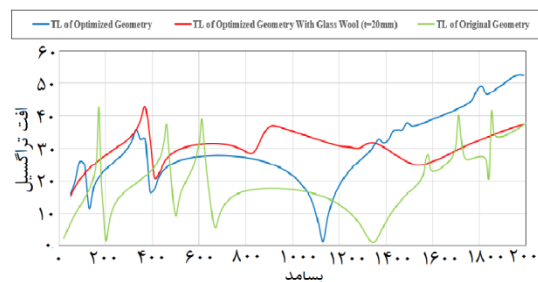
تخلخل لوله‌های روزنه‌دار، در افزایش بیشینه تراز افت تراگیسل صدا در بسامدهای بالا مؤثر بوده‌اند. مؤلفه‌هایی هم‌چون طول محفظه انبساط دوم، طول لوله‌های متخلخل و قطر روزنه‌ها سبب یکنواخت شدن و افزایش پهنای باند در بسامدهای پایین شده‌اند. هم‌چنین تغییرات قطر بیضی و شعاع لوله‌های داخلی، تأثیر به‌سزایی بر بهبود عملکرد میرایی صوتی در تمامی بازه‌های بسامد داشته‌اند.

بهینه‌سازی شش مؤلفه هندسی مؤثر، میانگین تراز افت تراگیسل صدا را تا حدود ۵۸ درصد بهبود بخشید. لازم به ذکر است که افزایش افت تراگیسل صدا در بسامدهای بازآوایش (تشدید) تنها وابسته به تغییرات اساسی هندسه انباره آگزوز است و با بهینه‌سازی ابعاد آن، میسر نمی‌شود؛ بنابراین جهت افزایش تراز افت تراگیسل صدا در بسامدهای بازآوایش، ماده جاذب صوتی بر پوسته انباره آگزوز اعمال گردید. با اعمال ماده جاذب، تراز افت تراگیسل صدا در بسامدهای بازآوایش بیش از دو برابر افزایش یافت.

فهرست منابع

- [1] S.S. Tambe, H.D. Lagdive, "Analysis of reactive muffler by experimental and numerical method," *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 4, no. 8, pp. 31-37, 2017.
- [2] A. Prasad, R.C. Thiagarajan, "Acoustic Performance Design of Automotive Muffler," *ATO Scientific Technologies*, 2019.
- [3] Z.L. Ji, "Acoustic attenuation performance analysis of multi chamber reactive silencers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 283, pp. 459-466, 2005.
- [4] L. Xiang, S. Zuo, M. Zhang, J. Hu, G. Long, "Study of micro-perforated tube mufflers with adjustable transmission," *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 20, no. 1, 2013.
- [5] S.V. Kanade, V. Shantanu, A.P. Bhattu, "Optimization of sound transmission loss and prediction of insertion loss of single chamber perforated plug muffler with straight duct," *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 2014.
- [6] M. Mohammad, M.M.A. Buang, A.A. Dahlan, M.H. Khairuddin, M.F.M. Said, "Simulation of automotive exhaust muffler for tail pipe noise reduction," *Journal of Technology*, vol. 79, no. 7-4, 2017.

به‌طور کلی همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با اعمال ماده جاذب صوتی می‌توان تراز افت تراگیسل صدا را در نقاط بازآوایش (تشدید) در مقایسه با حالت بهینه و اولیه تا بیش از دو برابر افزایش داد. در صورتی که میانگین تراز افت تراگیسل صدا در مقایسه با حالت بهینه، تنها ۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۵ بررسی میزان تأثیر ماده جاذب صوتی به‌کاربرده شده در پوسته انباره آگزوز در مقایسه با حالت اولیه و بهینه.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل صوتی انباره آگزوز با استفاده از روش اجزاء مرزی (شیوه عنصر مرزی) انجام شده است. در این روش معادلات مربوط به دامنه شاره صوتی تنها در مرزها مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، این روش نسبت به سایر روش‌ها از لحاظ حجم، مدت زمان و دقت نسبی تحلیل، برتری داشته است. هم‌چنین با به‌کارگیری روش عددی اجزاء مرزی می‌توان تأثیر سه‌بعدی امواج صوتی را در تحلیل صوتی نوفه و عملکرد میرایی (تنک‌شدن) صوتی انباره آگزوز مورد بررسی و مطالعه قرار داد. در این روش میزان محاسبات و دقت حل، در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی و عددی افزایش یافته است و مدت زمانی که صرف شبیه‌سازی نمونه مورد بررسی می‌شود تا حدودی افزایش یافته است.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل صورت گرفته، شش مؤلفه هندسی از میان دوازده مؤلفه موجود که شامل قطر بزرگ محفظه انبساط، طول محفظه انبساط دوم، طول لوله‌های متخلخل، شعاع لوله‌های داخلی، میزان تخلخل لوله‌های روزنه‌دار و قطر روزنه‌ها می‌باشد، انتخاب شده است. شش مؤلفه هندسی ذکر شده، تأثیر به‌سزایی روی عملکرد میرایی صوتی داشته‌اند، در این میان درصد

- Applied Acoustics, vol. 45, no. 3, pp.193-210, 1995.
- [15] E.J. Rice, "Theoretical study of the acoustic impedance of orifices in the presence of a steady grazing glow," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 59, no. 51, 1976.
- [16] T. Elnady, "Modelling and characterization of perforates in lined ducts and mufflers," Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, 2004.
- [17] R. Kirby, "Simplified techniques for predicting the transmission loss of a circular dissipative silencer," Journal of Sound and Vibration, vol. 243, no. 3, pp. 403-426, 2001.
- [18] N.K. Vijayasree, M.L. Munjal. "On an integrated transfer matrix method for multiply connected mufflers," Journal of Sound and Vibration, vol. 331, no. 8, pp. 1926-1938, 2012.
- [19] D.A. Bies, C.H. Hansen, "Flow resistance information for acoustical design," Journal of Applied Acoustics, vol. 13, no. 5, pp. 357-391, 1980.
- [20] EEC/70/157, "Permissible sound level and exhaust system of motor vehicles," 1970.
- [21] S. Niakwad, A. Sahunkhe, M. Bamane, A. Bhoite, "Design, assesment and optimization of automotive muffler," International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, vol. 6, no. 5, pp. 7384-97 2017.
- [7] R. Praveen, N.M. Ramshad, S. Sagar, T.K. Vakkachan, "Parametric design optimization of a reactive muffler," International Journal of Pure and Applied Mathematics, vol. 118, 2018.
- [8] S.M. Kirkup, "The Boundary Element Method in Acoustics, Integrated Sound Software," 2007.
- [9] W.S. Hall, "The Boundary Element Method, Kluwer Academic Publishers Group, The Netherlands," Springer Netherlands, 1994.
- [10] R.J. Bernhard, B.K. Gardner, C.G. Mollo, C.R. Kipp, "Prediction of sound fields in cavities using boundary-element methods," Journal of AIAA, vol. 25, no. 9, pp. 1176-1183, 1987.
- [11] C.R. Kipp, R.J. Bernhard, "Prediction of acoustical behaviour in cavities using an indirect boundary element method," Journal of Vibration and Acoustics, pp. 22-28, 1987.
- [12] A.F. Seybert, T.K. Rengarajan, "Application of the boundary element method to acoustic cavity response and muffler analysis," Journal of Vibration and Acoustics, vol. 109, no. 1, pp. 15-21, 1987.
- [13] C.Y.R. Cheng, A.F. Seybert, T.W.Wu, "A multi domain boundary element solution for silencer and muffler performance prediction," Journal of Sound and Vibration, vol. 151, no. 1, pp. 119-129, 1991.
- [14] S. Kopuz, N. Lalor, "Analysis of interior acoustic fields using the finite element method and the boundary element method," Journal of

توجه

نویسندگان مقالات موظف به استفاده از نرم‌افزارهای دارای مجوز^۱ می‌باشند؛ لذا در صورت عدم رعایت این مهم،
مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران از هر گونه مسئولیتی مبرا است.

¹ Licence

Optimization of effective geometrical dimensions and studying on absorptive materials for acoustic attenuation performance of muffler

T. Hasanvali, S. Zamani, R. Talebitooti*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

Nowadays, the issue of noise and annoying sounds is one of the major challenges in design of mufflers, that is used to reduce the noise level generated by output current of vehicles' engines. Therefore, the noise generated by the exhaust system can be controlled through predicting and calculating the transmission loss level, which is considerable and cannot be neglected. The investigated muffler has been reported to have an elliptical cross section, three straight porous tubes, four expansion chamber and three divisive plates. Generally, the main purpose of this study is to analyze the acoustic attenuation performance by using the Boundary Element Method. Also, in order to approach maximum transmission loss level, the effective geometrical parameters are optimized by using Response Surface and Taguchi methods. The results of this two methods are compared with each other. Finally, due to non-dependence of the Sound Transmission Loss level at the resonant frequencies on dimensions variation of geometrical parameters, by adding sound absorbing materials to the muffler's shell, the acoustic attenuation performance is increased more than double and the effect of different absorptive materials in this numerical simulation is investigated.

Keywords: Muffler, Sound transmission loss level, Boundary element method, Optimization, Absorptive material.

pp. 56-68 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: rtalebi@iust.ac.ir