

## کاهش نویز فرکانس پایین با مافلرهای فرامواد مبتنی بر سلول‌های

## هزارتویی

سید اسداله پناهنده\*

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک

دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران

Asadpanahandeh5@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱۵

## چکیده

این مطالعه به طراحی و توسعه یک مافلر فرامواد برای کاهش نویز در فرکانس‌های پایین و محیط‌های کم‌حجم می‌پردازد. مافلر پیشنهادی از نوع فرامواد آکوستیکی (AMMs)<sup>۱</sup> است که از نه سلول هزارتویی<sup>۲</sup> تشکیل شده و هر سلول به‌طور خاص برای کاهش نویز در یک بازه فرکانسی طراحی شده‌است. طراحی با استفاده از شبیه‌سازی آکوستیکی در نرم‌افزار کامسول و بررسی فشار برگشتی در انسیس فلونت<sup>۳</sup> انجام شده‌است، سپس افت انتقال صوت با تست آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مافلر فرامواد، نویز را در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۵۰۰ هرتز بیش از ۲۵ دسی‌بل کاهش می‌دهد. مکانیزم اصلی کاهش نویز، تشدید صوتی در سلول‌های هزارتویی است که انرژی آکوستیکی را کاهش می‌دهد. همچنین طراحی بهینه این مافلر باعث ایجاد فشار برگشتی به میزان ۸۷۰۰ پاسکال است که بر عملکرد موتور تأثیر منفی کمی ندارد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تطابق قابل‌قبولی را نشان می‌دهد، اگرچه تفاوت‌هایی جزئی در یک بازه فرکانسی بالا به دلیل خطاهای ساخت سلول‌ها مشاهده می‌شود. یافته‌های این پژوهش پتانسیل استفاده از مافلرهای فرامواد در صنایع مختلف را برای کاهش نویز فرکانس پایین بدون افزایش حجم یا افت عملکرد نشان می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** مافلر فرامواد، فرامواد آکوستیکی، کاهش نویز فرکانس پایین، افت انتقال صوت، سلول‌های هزارتویی

## ۱. مقدمه

صداخفه‌کن‌های آکوستیک از دیرباز به‌عنوان مؤثرترین تجهیزات برای کاهش نویز، در عین اجازه عبور آزادانه جریان هوا، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مافلرها به دو دسته بازتابی و جذبی تقسیم‌بندی می‌شوند که نمونه

کاهش نویز در سیستم‌های مجرای، یکی از مسائل عمده در کاربردهای مهندسی، از جمله تهویه تونل‌ها و سیستم‌های اگزوز موتور به شمار می‌رود.

\* نویسنده مسنول

اخیر از مواد جاذب استفاده می‌کند [۱]. مواد متخلخل جاذب صوت رایج‌ترین جزء در مافله‌های جذبی هستند و می‌توانند نویز را به شکل مؤثری در بازه فرکانس‌های میانی و بالا کاهش دهند. موج صوتی وارد حفره‌های مواد متخلخل می‌شود و صوت را با تبدیل شدن به انرژی حرارتی کاهش می‌دهند [۲، ۳]. مافله‌های بازتابی دارای محفظه انبساط هستند که تغییر سطح مقطع محفظه انبساط باعث تشکیل موج صوتی تخریب‌گر می‌شود. به عبارتی، موج تخریب‌گر به دلیل ناهماهنگی در امپدانس آکوستیکی است که باعث بازتاب امواج صوتی می‌شوند [۴، ۵]. مافله‌های بازتابی در فرکانس‌های میانی (۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز) و پایین (کمتر از ۵۰۰ هرتز) بهتر از جذبی عمل می‌کنند. با این حال هیچکدام در فرکانس‌های پایین عملکرد خوبی ندارند و برای رفع این مشکل باید از محفظه انبساط پرحجم استفاده کرد.

فرامواد آکوستیکی (AMMs) ساختارهای مصنوعی هستند که برای تغییر و کنترل صوت در ابعاد کمتر از طول موج صوتی طراحی شدند. کنترل صوت در ابعاد کمتر از طول موج مزیتی است که مواد طبیعی از آن بهره‌مند نیستند. این مواد از سلول‌های تشدیدشونده با پیکربندی متناوب تشکیل شده‌اند. خواص غیر متعارف فرامواد آکوستیکی از جمله پراکندگی قوی اجزای تشدیدگر در آن‌ها منجر به طیف پیچیده‌ای از خواص مؤثر، از جمله مقادیر مثبت، منفی و نزدیک به صفر می‌شود و تشدید داخلی آن‌ها که با دقت طراحی می‌شوند، امکان تنظیم دقیق انتشار امواج صوتی را فراهم می‌کنند. این مواد در طول دو دهه گذشته

به‌عنوان جاذب‌ها و موانع صوتی استفاده می‌شوند [۶، ۷].

در دهه گذشته، استفاده از فرامواد آکوستیکی برای کاهش صوت در تهویه‌های مطبوع توسعه یافته‌اند که دارای مجرای برای عبور سیال هستند [۸-۱۰]. ساختارهای دولایه معمولاً در فرامواد آکوستیکی استفاده می‌شود که شامل یک مجرا مرکزی است که توسط تشدیدگرهای پیچی احاطه شده و برای کنترل امواج صوتی در فرکانس‌های خاص طراحی شده‌اند. مجرای مرکزی اجازه عبور امواج را در این پیکربندی می‌دهد، در حالی که تشدیدگرها در فرکانس‌هایی خاص تشدید می‌شوند. هنگامی که طول موج ورودی و تشدیدگر با هم تعامل داشته باشند، تداخل مخربی به نام تداخل فانو<sup>۴</sup> در فرکانسی خاص ایجاد می‌شود و باعث می‌شود صوت در آن فرکانس کاهش یابد. باین‌حال این ساختارها صدا را در بازه فرکانسی محدودی کاهش می‌دهند [۱۱-۱۳]. یکی دیگر از طرح‌های محبوب، مجرای مرکزی متقارن است که توسط ساختارهای تشدیدگرهای پیچی یک‌چهارم طول موج<sup>۵</sup> [۱۴-۱۶] و تشدیدگر هلمهولتز<sup>۶</sup> [۱۷، ۱۸] احاطه شده‌است. برهم‌کنش بین مجرای مرکزی و تشدیدگرها در فرکانس‌های پایین‌تر از اولین فرکانس تشدید فابری-پرو<sup>۷</sup> مناطقی را ایجاد می‌کند که در آن‌ها صدا به‌طور نسبی منعکس و جذب می‌شود.

فرامواد هزارتویی گونه‌ای شناخته شده هستند که قابلیت استفاده در مجراها را در فرکانس‌های پایین دارند [۱۴، ۱۹] زیرا برخلاف گونه‌هایی مانند فرامواد آکوستیکی مبتنی بر غشا<sup>۸</sup> (MAMs)، این ساختارها امکان عبور گازهای داغ‌گروز را نیز فراهم می‌کنند.

این دسته از فرامواد دارای چند فرکانس تشدید هستند، که بدان معناست که می‌توانند در چندین بازه فرکانسی افت انتقال صوت ایجاد کنند. از این رو به‌عنوان روشی مؤثر برای کنترل نویز در فرکانس‌های پایین معرفی شده‌اند [۲۰]. عملکرد مؤثر در ابعاد کوچک‌تر از طول موج یکی از ویژگی‌های برجسته این مواد است که استفاده از آن را برای فضاهای بسیار کوچک مناسب می‌سازد [۲۱]. قابلیت تنظیم و طراحی برای فرکانس‌های خاص ویژگی مهم دیگر فرامواد هزراتویی است که به ما اجازه می‌دهد بازه فرکانسی افت انتقال صوت را با تغییر پارامترهای هندسی سلول فرامواد به‌صورت دقیق تنظیم کنیم [۲۲].

تاکنون طرح‌های مختلفی از فرامواد آکوستیکی هزراتویی برای ساخت مافلر استفاده شده‌است که اساس آن‌ها استفاده از چندین سلول تنظیم‌شده برای ایجاد افت انتقال صوت در بازه‌ای وسیع است [۱۹، ۲۳، ۲۴]. نوع الگو و ضخامت سلول می‌تواند میزان افت انتقال صوت و فرکانس را تعیین کند. طرح‌های مختلف بر اساس اندازه و پیچیدگی می‌توانند افتی تا حدود ۱۰ دسی‌بل در بازه فرکانسی تقریبی ۲۳۰ تا ۸۰۰ هرتز [۲۴] و یا حداقل ۲۰ دسی‌بل در بازه فرکانسی ۳۰۰ تا ۳۵۰ هرتز ایجاد کنند [۲۳].

در این مطالعه از الگوی سلول‌های هزراتوی [۱۹] برای ساخت مافلر و کاهش صدا در بازه فرکانسی کمتر از ۵۰۰ هرتز استفاده شده‌است، بازه‌ای که فرکانس مرتبه اول احتراق موتور را شامل می‌شود. این نمونه افت انتقال صوت بالایی ایجاد می‌کند و نسبت به سلول‌های هزراتویی دیگر ساده‌تر است. مافلر ایجادشده دارای نه سلول فرامواد است و سه پارامتر برای تنظیم افت انتقال

صوت در فرکانس‌های مطلوب دارد. سلول‌ها به‌ترتیب از فرکانس پایین تا بالا چیده شده‌اند و پس از ترکیب نه سلول افت انتقال صوت یک بازه وسیع را پوشش می‌دهد. افت انتقال صوت مافلر فرامواد هم به‌صورت شبیه‌سازی و هم به‌صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و پاسخ آن با مافلر محفظه انبساط ساده مقایسه شده‌است. همچنین فشار برگشتی مافلر فرامواد به روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۹</sup> بررسی می‌شود.

## ۲. طراحی و شبیه‌سازی

### ۱.۲. تئوری آکوستیکی حاکم بر مافلر

معادله هلمهولتز بر تئوری آکوستیکی مافلر حاکم است که از نوع دیفرانسیل پاره‌ای است. معادله هلمهولتز به‌صورت زیر است [۱]

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \right] p = 0 \quad (1)$$

که در آن  $p$  و  $c_0$  به ترتیب فشار آکوستیکی بر حسب پاسکال و سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه هستند. افت انتقال صوت تعریفی برای بررسی کارایی آکوستیکی مافلر است که نسبت توان صوتی ورودی به مافلر به خروجی است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱]

$$STL = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{in}}{W_{out}} \right) \quad (2)$$

که در آن  $W$  توان صوتی بر حسب وات و زیرنویس‌های in و out به‌ترتیب ورودی و خروجی هستند. موج به‌صورت صفحه‌ای وارد مافلر می‌شود و توان ورودی و خروجی از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$W = \int \frac{p}{2\rho c_0} dA \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  و  $A$  به ترتیب چگالی هوا و مساحت ورودی یا خروجی است. هر سلول بر اساس تداخل فانو عمل می‌کند و انرژی آکوستیکی درون آن در فرکانس‌های طراحی شده به گرما تبدیل می‌شود. بنابراین سطوح تمامی سلول‌ها باید با لایه مرزی ویسکوز مدل شود که تئوری آن در [۲۵] آمده است.

بازه فرکانسی طراحی مافلر را نرخ احتراق موتور تعیین می‌کند که در آن فرکانس‌ها موتور بیشترین صوت را بر اثر احتراق تولید می‌کند. برای به دست آوردن حداکثر نرخ احتراق موتور دوزمانه بر حسب فرکانس می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۶]

$$EFR = n N_{cyl} \frac{RPM}{60} \quad (4)$$

که در آن RPM و  $N_{cyl}$  به ترتیب دور موتور بر دقیقه و تعداد سیلندر است. همچنین  $n$  تناوب‌های نرخ احتراق است که اعدادی طبیعی هستند.

برای طراحی مافلر، ابتدا باید فرکانس‌های احتراق موتور محاسبه شوند، چرا که موتور در مرتبه اول بیشترین میزان تولید صوت را دارد و مرتبه‌های بالاتر به تدریج صدای کم‌تری ایجاد می‌کنند. حجم مافلرهای مرسوم باید ۶ تا ۱۲/۵ برابر حجم موتور باشد [۲۶] و مافلر فرامواد به ما کمک می‌کند تا از حجمی کمتر از استاندارد استفاده شود. حجم مافلر را فضای در دسترس تعیین کرده است. پیکربندی هر سلول برای یک فرکانس خاص تنظیم می‌شود و میزان افت انتقال صوت، به ضخامت سلول بستگی دارد. سلول‌های قبلی باعث تقویت افت انتقال صوت سلول‌های بعدی می‌شوند، بنابراین می‌توان ضخامت سلول‌های انتهایی را با حفظ عملکرد آکوستیکی کاهش داد.

نرخ احتراق موتور با در نظر گرفتن حداکثر دور موتور ۵۵۰۰ دور بر دقیقه برای یک موتور چهار سیلندر دو زمانه برای سه مرتبه اول، دوم و سوم برابر با ۳۶۷، ۷۳۳ و ۱۱۰۰ هرتز هستند که موتور بیشترین صدا را در مرتبه اول تولید می‌کند. با افزایش مرتبه ( $n$ ) سطح فشار صوتی احتراق موتور نیز کاهش می‌یابد.

## ۲.۲. معادلات دینامیک سیالات محاسباتی

فشار برگشتی یا افت فشار اثری جانبی است که بر اثر نصب مافلر بر موتور وارد می‌شود و ناشی از تغییرات سطح مقطع مانند انقباض و انبساط؛ تغییر مسیر سیال و اصطکاک سیال با بدنه‌ی مافلر ایجاد می‌شود. فشار برگشتی به صورت افت دینامیکی در مکانیک سیالات نوشته می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P = \frac{1}{2} K \rho U^2 \quad (5)$$

که در آن  $K$ ،  $\rho$  و  $U$  به ترتیب ضریب افت دینامیکی، چگالی و سرعت میانگین سیال هستند. ضریب  $K$  تابع اصطکاک در طول مسیر، تغییرات سطح مقطع و محیط مجرا است [۲۷].

برای محاسبه فشار برگشتی مافلر از دینامیک محاسبات سیالاتی (CFD) استفاده می‌شود. مدل‌های گوناگونی بر اساس معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز<sup>۱۰</sup> (RANS) وجود دارد که از آن برای حل پایا استفاده می‌شود.  $k-\omega$  با انتقال تنش برشی منتر<sup>۱۱</sup> (SST) مدلی مناسب برای مدل‌سازی جریان‌های داخلی است که از ترکیب  $k-\varepsilon$  و  $k-\omega$  ایجاد شده است و جدایش جریان را نسبت به اکثر مدل‌های RANS بهتر پیش‌بینی می‌کند. همچنین

تشدید تلف شود. افت انتقال صوت تا فرکانس ۳۰۰۰ هرتز محاسبه می‌شود و سائز المان یک‌دهم طول موج است که حجم درون مافلر در مجموع دارای ۵۲۹۰۰ المان است. شکل ۱ هندسه شبکه‌بندی شده و پورت‌های ورودی و خروجی را نشان می‌دهد.

برای محاسبه فشار برگشتی از انسیس فلونت استفاده می‌شود که معادلات RANS را به روش حجم محدود محاسبه می‌کند. مدل سیال SST k- $\omega$  و برای شرط مرزی ورودی و خروجی به ترتیب جریان جرمی ورودی<sup>۱۷</sup> و فشار خروجی<sup>۱۸</sup> استفاده می‌شود. همچنین حلگر کوپل شده<sup>۱۹</sup> و گسسته‌سازی بالادست مرتبه دوم<sup>۲۰</sup> است. شبکه از نوع پلی هسگر<sup>۲۱</sup> با دو میلیون سلول است که پنج لایه شبکه با ارتفاع ۱۰ میکرومتر تمام دیوارها را پوشانده و بیشترین  $y^+$  را به کمتر از ۵ کاهش داده است (شکل ۲). مشخصات سیال استفاده شده در شبیه‌سازی آکوستیکی و سیالاتی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات سیال استفاده شده در شبیه‌سازی

مقادیر	پارامترها
هوا (Ideal gas)	سیال
۱ (Pa)	فشار آکوستیکی ورودی
۱ (atm)	فشار محیط
۲۹۳ (K)	دمای محیط
۰/۱۷۱۲ (kg/m <sup>3</sup> )	دبی جرمی

رفتار سیال را در گرادین‌های فشار معکوس به خوبی نشان می‌دهد و معادلات آن به صورت زیر است [۲۸]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (6)$$

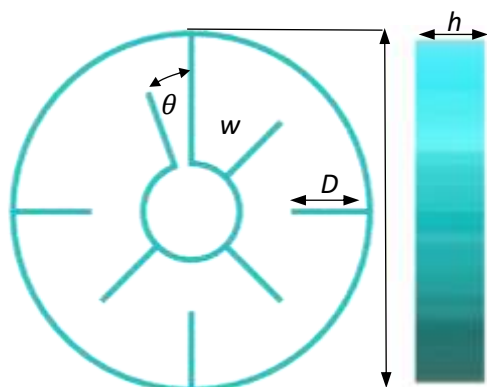
$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \text{grad} \omega \right] + \gamma_2 \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega 2}} \omega \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (7)$$

که در آن‌ها مقدار ثابت‌های مدل  $\sigma_{\omega 1} = \sigma_k = 1.00$ ،  $\beta_2 = 0.083$  و  $\gamma_2 = 0.44$ ،  $\sigma_{\omega 2} = 2$ ، همچنین  $\varepsilon$  نرخ اتلاف انرژی آشفته<sup>۱۲</sup>، چگالی  $\rho$ ،  $k$  انرژی جنبشی آشفته،  $\mathbf{U}$  بردار سرعت،  $\omega$  فرکانس آشفته<sup>۱۳</sup>،  $\mu_t$  ویسکوزیته گردابه آشفته<sup>۱۴</sup>،  $S_{ij}$  نرخ تغییر شکل متوسط سیال و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر است.

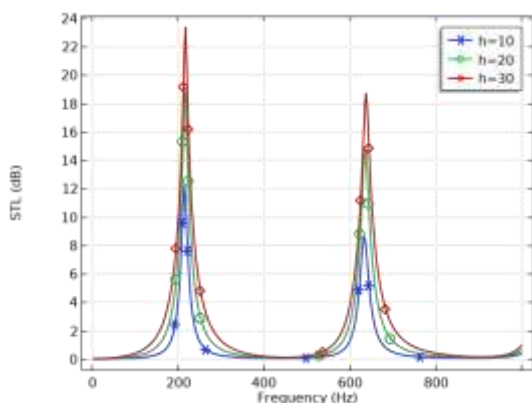
### ۳.۲. شبیه‌سازی مافلر

شبیه‌سازی شامل حل آکوستیکی و سیالاتی است که به ترتیب با کامسول و انسیس فلونت اجرا می‌شوند. برای محاسبه افت انتقال صوت از فیزیک فشار آکوستیکی، حوزه فرکانس<sup>۱۵</sup> و حلگر پایا استفاده می‌شود. از شرط مرزی پورت برای ورودی و خروجی استفاده می‌شود که به صورت پیش فرض قابلیت محاسبه افت انتقال صوت را فراهم می‌کند. برای تمامی سلول‌ها از شرط مرزی امیدانس لایه مرزی ترموویسکوز<sup>۱۶</sup> استفاده می‌شود تا صوت در فرکانس

انتقال مافلر محفظه انبساط تابع سطح مقطع آن و مستقل از طول است، بنابراین سلول فراسطح این



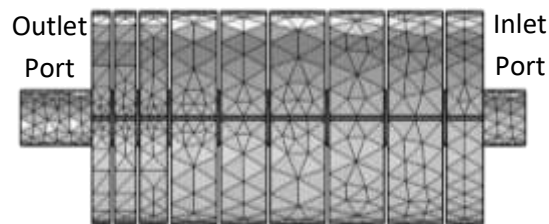
شکل ۳. سلول فرامواد با سه پارامتر طراحی



شکل ۴. اثر ضخامت سلول بر افت انتقال صوت سلول نخست

برتری را نسبت به مافلرهای مرسوم دارد که افت انتقال صوت را با افزایش طول می‌توان زیاد کرد و فرکانس تشدید نیز ثابت بماند.

طول شاخه ( $w$ ) باعث تغییر مساحت سطح می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود که بر فرکانس تشدید اثرگذار باشد. چهار طول شاخه ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر انتخاب شده‌است که اثر آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. فرکانس تشدید و افت انتقال صوت با افزایش طول شاخه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین افزایش طول



شکل ۱. شبکه و شرایط مرزی حل آکوستیکی



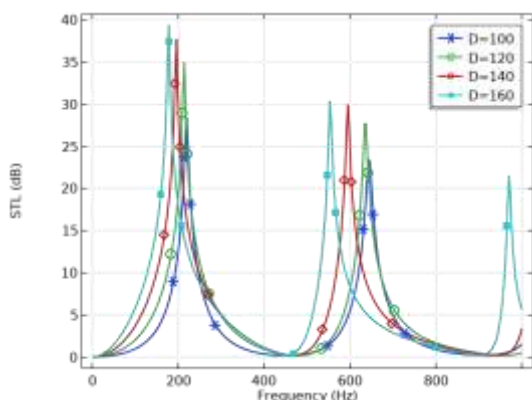
شکل ۲. شبکه و شرط مرزی در حل سیالاتی

### ۳. بررسی پارامترهای طراحی

مافلر با ترکیب نه سلول نمایش داده شده در شکل ۳ ایجاد می‌شود. چهار پارامتر تاثیرگذار سلول بر فرکانس تشدید، ضخامت سلول ( $h$ )، طول شاخه ( $w$ )، زاویه گلوبی ( $\theta$ ) و قطر سلول ( $D$ ) هستند که سه پارامتر اول برای طراحی استفاده می‌شوند و قطر ( $D$ ) ثابت در نظر گرفته می‌شود. ابتدا اثر سلول‌ها بر افت انتقال صوت باید بررسی شود. بنابراین هر پارامتر با ثابت بودن بقیه پارامترها بررسی می‌شود. ابعاد  $h$ ،  $w$  و  $D$  برای بررسی به ترتیب ۵۰، ۲۲/۵ و ۱۰۰ میلی‌متر و زاویه  $\theta$  برابر با ۳۰ درجه است.

پهنای سلول ( $h$ ) به ازای سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر و ثابت ماندن سایر پارامترها بررسی شده‌است که نتایج آن در شکل ۴ آمده‌است. افت انتقال صوت با افزایش پهنای تقریباً به صورت خطی زیاد می‌شود. افت

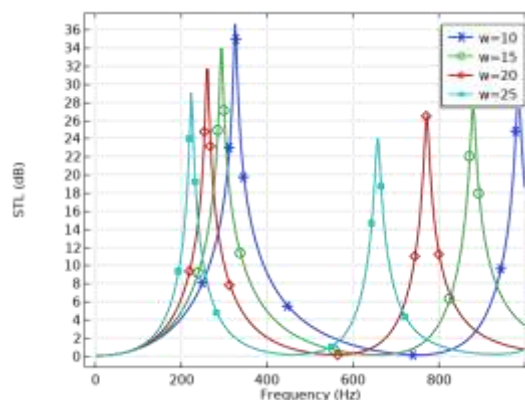
قطر سلول ( $D$ ) بر افت انتقال صوت اثرگذار است، هرچند پارامتر طراحی محسوب نمی‌شود. شکل ۷ اثر چهار قطر ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰ و ۱۶۰ میلی‌متر را بر افت انتقال صوت و فرکانس نشان می‌دهد. تمامی پارامترهای دیگر ثابت هستند و افزایش قطر باعث افزایش افت انتقال و کاهش فرکانس می‌شود. افزایش قطر باعث افزایش حجم می‌شود و مطابق با انتظار باید فرکانس تشدید کاهش یابد. در صورتی که افت انتقال صوت مطلوب نبود، می‌توان با افزایش طول هر سلول آن را افزایش داد. اثر تغییرات چهار پارامتر بررسی شده بر افت انتقال صوت و فرکانس در جدول ۲ مشاهده می‌شود که فرایند طراحی را بر اساس پارامترها ساده‌تر می‌کند.



شکل ۷. اثر قطر سلول بر افت انتقال صوت سلول نخست

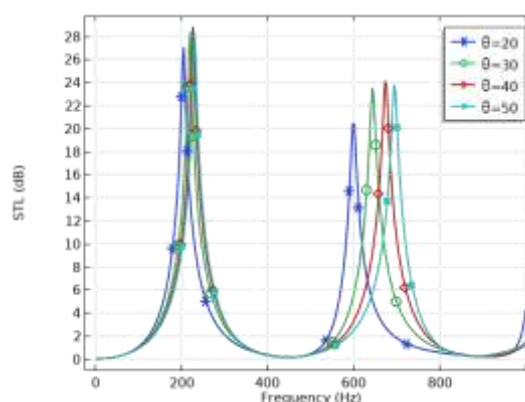
جدول ۲. اثر افزایش مقادیر پارامترها بر فرکانس تشدید و افت انتقال صوت

پارامتر	فرکانس	افت انتقال صوت
زاویه تتا* ( $\theta$ )	افزایش	افزایش
پهنای سلول* ( $h$ )	بدون تغییر	افزایش
طول شاخه‌ها* ( $w$ )	کاهش	کاهش
قطر سلول ( $D$ )	کاهش	افزایش



شکل ۵. اثر طول شاخه‌ها بر فرکانس و افت انتقال صوت

شاخه فاصلهٔ میان دو قله تشدید را کاهش می‌دهد. این ویژگی امکان تنظیم مکان قله‌های افت انتقال صوت را برای هر سلول از مافلر فراهم می‌کند تا یک بازه فرکانسی وسیع را پوشش دهد. زاویه  $\theta$  برای تنظیم فرکانس استفاده می‌شود و سطح مقطع دهانه لوله را تغییر می‌دهد. بنابراین، مطابق با انتظار، فرکانس تشدید باید با افزایش زاویه نیز افزایش یابد. شکل ۶ نمودار افت انتقال صوت را در چهار زاویه مختلف نشان می‌دهد. همچنین افزایش زاویه دهانه فاصلهٔ دو قله را از همدیگر افزایش می‌دهد و اثر ناچیزی بر افت انتقال صوت دارد.



شکل ۶. اثر زاویه بر فرکانس و افت انتقال صوت

#### ۴. بحث و نتایج

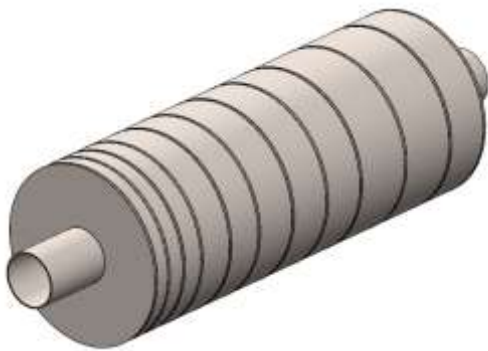
هر سلول چند فرکانس تشدید دارد و افت انتقال صوت در آن فرکانس‌ها ایجاد می‌شود. تعداد سلول‌ها بازه فرکانسی طراحی را مشخص و ضخامت هر سلول میزان افت انتقال صوت را تعیین می‌کند. برای طراحی ابتدا باید سلول اول را برای پایین‌ترین فرکانس تشدید طراحی کرد. سپس به ترتیب سلول‌های دیگر برای فرکانس‌های بالاتر طراحی می‌شوند تا در کنار یکدیگر بازه وسیعی را پوشش دهند. نه سلول برای مافلر طراحی شده‌است. شکل ۸ مافلر را پس از مونتاژ نشان می‌دهد و قطر و طول آن به ترتیب ۱۲۰ و ۲۱۷ میلی‌متر است. مشخصات تمامی سلول‌ها در جدول ۳ آمده است. قله‌های سلول اول تا نهم در بازه ۱۸۷ تا ۴۶۱ هرتز باعث ایجاد افت انتقال صوت می‌شوند و پس از آن قله‌های دوم از سلول اول تا قله دوم سلول نهم نیز افت انتقال صوت ایجاد می‌کنند. بنابراین هنگام طراحی باید قله دوم از سلول اول را در نزدیکی قله اول از سلول آخر قرار داد تا افت انتقال صوت صفر در نمودار ایجاد نشود. شکل ۹ افت انتقال صوت سلول اول و آخر را نشان می‌دهد که قله دوم از سلول اول در نزدیکی قله اول از سلول آخر قرار داد و این شرط طراحی را تأیید می‌کند.

جدول ۳. پارامترهای طراحی هر سلول مافلر فرامواد برای

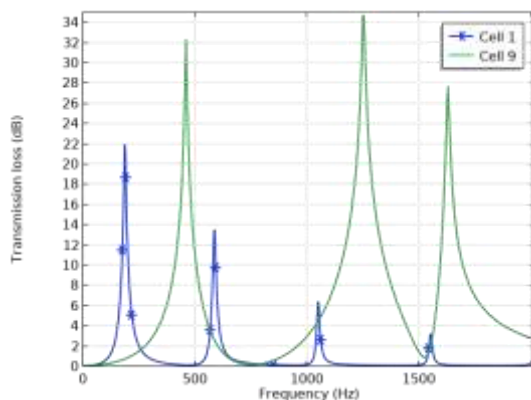
فرکانس مطلوب

سلول	$f(\text{Hz})$	$\theta(^{\circ})$	$w(\text{mm})$	$h(\text{mm})$
۱	۱۸۷	۲۰	۲۵/۵	۲۰
۲	۲۱۱	۳۰	۲۵	۳۰
۳	۲۲۶	۳۰	۲۱	۳۰

۴	۲۵۱	۳۰	۱۵	۳۰
۵	۲۸۱	۵۰	۱۵	۲۵
۶	۳۲۱	۶۰	۱۰	۲۵
۷	۳۷۶	۸۰	۵	۱۵
۸	۴۲۶	۱۱۵	۵	۱۲
۹	۴۶۱	۱۳۵	۵	۱۰



شکل ۸. هندسه نهایی مافلر فرامواد



شکل ۹. افت انتقال صوت سلول ۱ و ۹

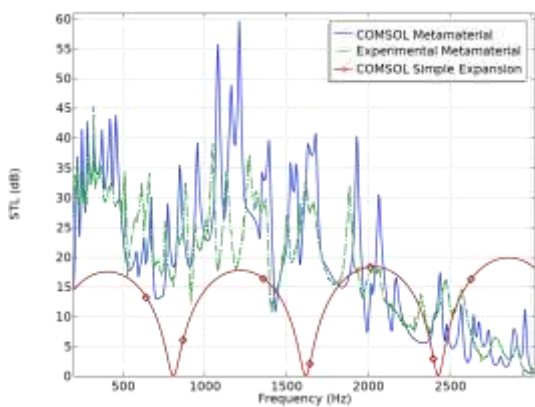
برای محاسبه افت انتقال صوت از تست آزمایشگاهی لوله امپدانس استفاده شده‌است که دارای چهار میکروفن یک‌چهارم اینچی با پاسخ فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز و خطای  $\pm 3\%$  دسی‌بل است. همچنین

زیادی در پاسخ می‌شود. همچنین به دلیل ساخت یکپارچه مافلر و عدم دسترسی به فضای داخلی سلول‌ها، امکان شست‌وشو با الکل ایزوپروپیل و حذف حفره‌های احتمالی فراهم نبود که این موضوع نیز می‌تواند منبعی برای خطا باشد.

فرکانس تشدید سوم سلول‌ها افت انتقال صوت کمی ایجاد می‌کند. بنابراین افت انتقال صوت در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد و به سمت صفر میل می‌کند.



شکل ۱۰. تجهیزات آزمایشگاهی و مافلر طراحی شده متصل به لوله امپدانس



شکل ۱۱. مقایسه تست آزمایشگاهی افت انتقال صوت و شبیه‌سازی در شرایط یکسان

افت انتقال صوت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی برای مقایسه خطا از حوزه فرکانس به یک سوم اکتاو تبدیل شده‌است تا امکان مقایسه فراهم شود. نتایج نشان

داده‌های لوله امپدانس با دستگاه داده‌بردار سیریسوس برند دوسافت<sup>۲۲</sup> پردازش می‌شوند. بلندگو به دلیل محدودیت، بازه فرکانسی بالای ۲۰۰ هرتز را تولید کرده‌است و دقت فرکانسی داده‌بردار ۱ هرتز است. مافلر نمونه با پرینتر سه‌بعدی از جنس رزین استاندارد ساخته شده‌است که از لوله مخروطی در ابتدا و انتهای آن برای اتصال به لوله امپدانس استفاده شده‌است تا بر افت انتقال صوت اثر نگذارد. تجهیزات تست آزمایشگاهی و مافلر متصل به لوله امپدانس در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

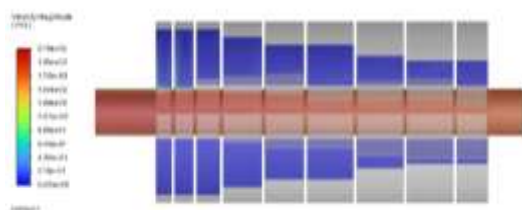
شکل ۱۱ افت انتقال صوت شبیه‌سازی شده (خط آبی) و آزمایشگاهی (خط سبز) مربوط به مافلر فرامواد را نشان می‌دهد که در بازه فرکانسی ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ هرتز رسم شده است. همچنین، برای مقایسه اثر سلول‌ها بر عملکرد صوتی یک محفظه انبساط ساده و بدون سلول، با همان ابعاد، شبیه‌سازی شده‌است. چگالی هوای شبیه‌سازی نیز مطابق با شرایط آزمایشگاهی ۰/۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شده‌است. قله اول سلول‌ها افت انتقال صوت را تا نزدیکی فرکانس ۵۰۰ هرتز ایجاد کرده‌اند و پس از کاهش ناگهانی افت انتقال صوت، دوباره به سبب تشدیدهای دوم سلول‌ها افزایش یافته‌است. با وجود آن که طول مافلر تست شده در این نمونه نسبت به [۲۴] سه میلی‌متر کم‌تر و ساده‌تر است، میزان افت انتقال صوت قابل توجهی ایجاد کرده‌است. افت انتقال صوت در بازه ۱۰۵۰ تا ۱۲۵۰ هرتز اختلاف چشم‌گیری با شبیه‌سازی دارد که ممکن است به دلیل خطا در ساخت سلول هفتم یا هشتم با پرینتر سه‌بعدی باشد، زیرا این دو سلول ضخامت کم و طول شاخه (W) کوتاهی دارند و خطای جزئی در ساخت باعث اختلاف

می‌دهند که شبیه‌سازی تا فرکانس مرکزی ۸۰۰ هرتز دقت مناسبی دارد که فرکانس‌های مرتبه اول و دوم احتراق موتور را پوشش می‌دهد و پس از آن به دقت به شدت کاهش می‌یابد و پس از فرکانس مرکزی ۱۲۵۰ هرتز دقت دوباره افزایش می‌یابد.

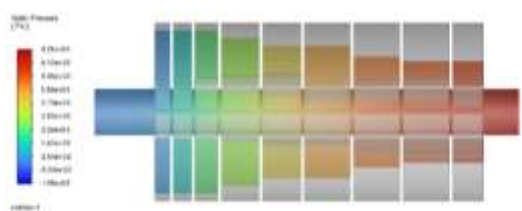
جدول ۴. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در بازه یک سوم اکتاو

فرکانس مرکزی	نتیجه شبیه‌سازی	نتیجه آزمایشگاهی	درصد خطا
۲۵۰	۳۴/۲	۳۰/۰	-۱۳/۸
۳۱۵	۳۷/۲	۳۳/۸	-۹/۹
۴۰۰	۳۵/۸	۳۱/۲	-۱۴/۷
۵۰۰	۳۰/۲	۲۴/۲	-۲۴/۷
۶۳۰	۲۲/۲	۲۳/۸	۶/۹
۸۰۰	۲۳/۷	۲۰/۱	-۱۷/۹
۱۰۰۰	۴۱/۵	۲۳/۱	-۷۵/۶
۱۲۵۰	۴۶/۶	۲۵/۲	-۸۴/۹
۱۶۰۰	۲۷/۴	۲۱/۵	-۲۴/۴
۲۰۰۰	۲۱/۱	۱۷/۲	-۲۲/۷
۲۵۰۰	۸	۷/۶	-۴/۶

و به بهینه‌سازی افت فشار کمک می‌کند، زیرا جریان اصلی بدون مانع جدی ادامه می‌یابد. از آنجایی که مقدار بسیار کمی از سیال درون سلول‌ها وارد می‌شود، می‌توان انتظار داشت که افت فشار زیادی ایجاد نشود. شکل ۱۳ توزیع فشار را در مافلر نشان می‌دهد. افت فشار در مافلر ۸/۷ کیلوپاسکال است که کمتر از ۲۰ کیلوپاسکال و عددی مطلوب برای موتور موردنظر است [۲۹].



شکل ۱۲. توزیع سرعت شبیه‌سازی شده در مافلر



شکل ۱۳. توزیع فشار شبیه‌سازی شده در مافلر

## ۵. نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف طراحی و توسعه یک مافلر فرامواد هزارتویی برای مقابله با چالش کاهش نویز فرکانس پایین در پیکربندی کم‌حجم انجام شد. سلول‌های فرامواد هزارتویی برای بازه فرکانسی‌های مختلف طراحی شدند و از تداخل فانو برای کاهش صوت استفاده می‌کنند که امکان کنترل مؤثر نویز را با حداقل فضای مورد نیاز فراهم می‌کنند. مافلر برای موتور چهارسیلندر دوزمانه ساخته شد که قادر به کاهش

افت فشار در مافلر یکی از عوامل کلیدی در تعیین عملکرد و کارایی سیستم اگزوز است. فشار برگشتی بیش از حد می‌تواند منجر به کاهش توان خروجی موتور و افزایش مصرف سوخت شود، زیرا مانعی برای خروج گازهای خروجی ایجاد می‌کند. مافلر دارای سلول‌های متعدد و پیچیده است. بنابراین بررسی فشار برگشتی الزامی است. همان‌طور که شکل ۱۲ توزیع سرعت را در مافلر نشان می‌دهد، بخش عمده‌ای از سیال به‌صورت متمرکز در مسیر لوله اصلی حرکت کرده و تنها مقدار کمی از سیال وارد سلول‌ها می‌شود

سلول‌ها را به صورت جداگانه ساخت تا امکان شست‌وشوی داخلی آن‌ها با الکل ایزوپروپیل فراهم شود و سپس آن‌ها را مونتاژ کرد. همچنین پاسخ شبیه‌سازی دارای قله‌های تیز و ناپایدار است که می‌توان آن‌ها را با هموارسازی سیگنال بهبود داد و پاسخ را به نتایج واقعی نزدیک‌تر کرد.

### قدردانی

مایلم صمیمانه‌ترین سپاس خود را از گروه آزمایشگاه آوا لب به ویژه سرپرست آن، دکتر علی لقمانی، به دلیل انجام تست آزمایشگاهی محاسبه افت انتقال صوت ابراز نمایم.

حدقلی صوت ۲۰ دسی‌بل در فرکانس‌های مرتبه اول و دوم موتور با رعایت محدودیت فضا است و نتایج آزمایشگاهی نیز کاهش نویز را در طیف وسیعی از فرکانس‌ها تأیید کرد. همچنین مافلر به علت وارد شدن جزئی سیال به درون سلول‌ها افت فشار پایینی دارد.

یافته‌ها نشان می‌دهد که فرامواد پتانسیل استفاده در طراحی مافلرهای کم‌حجم را برای کاربردهای صنعتی دارند و آن‌ها را برای کاهش نویز خودروها برجسته می‌کند. افت انتقال صوت بدون در نظر گرفتن حرکت سیال محاسبه شده‌است. جریان سیال اثر قابل توجهی بر افت انتقال صوت دارد و این محدودیت مطالعه حاضر است. برای افزایش دقت در تست آزمایشگاهی، می‌توان

### منابع

- [1] Munjal, Manchar Lal. *Acoustics of ducts and mufflers*. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] Glav, Ragnar. "The transfer matrix for a dissipative silencer of arbitrary cross-section." *Journal of Sound and Vibration* 236, no. 4 (2000): 575-594.
- [3] Cao, Leitao, Qiuxia Fu, Yang Si, Bin Ding, and Jianyong Yu. "Porous materials for sound absorption." *Composites Communications* 10 (2018): 25-35.
- [4] Rafique, Faisal, Jiu Hui Wu, Chong Rui Liu, and Fuyin Ma. "Transmission Loss analysis of a simple expansion chamber muffler with extended inlet and outlet combined with inhomogeneous micro-perforated panel (iMPP)." *Applied Acoustics* 194 (2022): 108808.
- [5] Xue, Yaqiang, Guoyong Jin, Tianguai Ye, Kangkang Shi, Saifeng Zhong, and Chuanmeng Yang. "Isogeometric analysis for geometric modelling and acoustic attenuation performances of reactive mufflers." *Computers & Mathematics with Applications* 79, no. 12 (2020): 3447-3461.
- [6] Kaina, Nadège, Fabrice Lemoult, Mathias Fink, and Geoffroy Lerosey. "Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials." *Nature* 525, no. 7567 (2015): 77-81.
- [7] Lee, Dongwoo, Duc Minh Nguyen, and Junsuk Rho. "Acoustic wave science realized by metamaterials." *Nano convergence* 4, no. 1 (2017): 3.
- [8] Wang, Xiaole, Xudong Luo, Bin Yang, and Zhenyu Huang. "Ultrathin and durable open metamaterials for simultaneous ventilation and sound reduction." *Applied Physics Letters* 115, no. 17 (2019).

- [9] Nguyen, Huy, Qian Wu, Xianchen Xu, Hui Chen, Sharon Tracy, and Guoliang Huang. "Broadband acoustic silencer with ventilation based on slit-type Helmholtz resonators." *Applied Physics Letters* 117, no. 13 (2020).
- [10] Xiang, Xiao, Xiaoxiao Wu, Xin Li, Peng Wu, Hong He, Qianjin Mu, Shuxia Wang, Yingzhou Huang, and Weijia Wen. "Ultra-open ventilated metamaterial absorbers for sound-silencing applications in environment with free air flows." *Extreme Mechanics Letters* 39 (2020): 100786.
- [11] Chen, Ao, Xiaoguang Zhao, Zhiwei Yang, Stephan Anderson, and Xin Zhang. "Broadband labyrinthine acoustic insulator." *Physical Review Applied* 18, no. 6 (2022): 064057.
- [12] Ghaffarivardavagh, Reza, Jacob Nikolajczyk, Stephan Anderson, and Xin Zhang. "Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-like interference." *Physical Review B* 99, no. 2 (2019): 024302.
- [13] Sun, Man, Xinsheng Fang, Dongxing Mao, Xu Wang, and Yong Li. "Broadband acoustic ventilation barriers." *Physical Review Applied* 13, no. 4 (2020): 044028.
- [14] Kumar, Sanjay, and Heow Pueh Lee. "Labyrinthine acoustic metastructures enabling broadband sound absorption and ventilation." *Applied Physics Letters* 116, no. 13 (2020).
- [15] Xiao, Zhenqian, Penglin Gao, Dongwei Wang, Xiao He, and Linzhi Wu. "Ventilated metamaterials for broadband sound insulation and tunable transmission at low frequency." *Extreme Mechanics Letters* 46 (2021): 101348.
- [16] Yang, Jieun, Joong Seok Lee, Hyeong Rae Lee, Yeon June Kang, and Yoon Young Kim. "Slow-wave metamaterial open panels for efficient reduction of low-frequency sound transmission." *Applied physics letters* 112, no. 9 (2018).
- [17] Gao, Yong-Xin, Yi Cheng, Bin Liang, Yong Li, Jing Yang, and Jian-Chun Cheng. "Acoustic skin meta-muffler." *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 64, no. 9 (2021): 294311.
- [18] Kumar, Sanjay, Tiong Bang Xiang, and Heow Pueh Lee. "Ventilated acoustic metamaterial window panels for simultaneous noise shielding and air circulation." *Applied Acoustics* 159 (2020): 107088.
- [19] Liu, Chenkai, Huijun Wang, Bin Liang, Jian-chun Cheng, and Yun Lai. "Low-frequency and broadband muffler via cascaded labyrinthine metasurfaces." *Applied Physics Letters* 120, no. 23 (2022).
- [20] Krushynska, A. O., F. Bosia, M. Miniaci, and N. M. Pugno. "Spider web-structured labyrinthine acoustic metamaterials for low-frequency sound control." *New Journal of Physics* 19, no. 10 (2017): 105001.
- [21] Liu, Xuwei, Mingyu Duan, Maolin Liu, Fengxian Xin, and Chuanzeng Zhang. "Acoustic labyrinthine porous metamaterials for subwavelength low-frequency sound absorption." *Journal of Applied Physics* 129, no. 19 (2021).
- [22] Zhang, Chi, and Xinhua Hu. "3D single-port labyrinthine acoustic metamaterial." *arXiv preprint arXiv:1608.04599* (2016).
- [23] Du, Shengnan, Dacheng Zhang, Xianming Sun, Xiaoping Chen, and Guowei Zhang. "Model analysis and experiment study for effects of thermal viscous and fluid flow on ventilated acoustic metamaterials labyrinth." *Scientific Reports* 14, no. 1 (2024): 27200.

- [24] Qi, Hao-Bo, Shi-Wang Fan, Mu Jiang, Xiao-Lei Tang, and Yue-Sheng Wang. "Low-frequency ultra-broadband ventilated muffler based on a resonance-labyrinthine metamaterial." *Extreme Mechanics Letters* 67 (2024): 102120.
- [25] Berggren, Martin, Anders Bernland, and Daniel Noreland. "Acoustic boundary layers as boundary conditions." *Journal of Computational Physics* 371 (2018): 633-650.
- [26] Shah, Shital, Saisankaranarayana Kuppili, Kalyankumar Hatti, and Dhananjay Thombare. *A practical approach towards muffler design, development and prototype validation*. No. 2010-32-0021. SAE Technical Paper, 2010.
- [27] Bies, David A., Colin H. Hansen, Carl Q. Howard, and Kristy L. Hansen. *Engineering noise control*. CRC press, 2023.
- [28] Versteeg, Henk Kaarle. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method, 2/E*. Pearson Education India, 2007.
- [29] Srinivas, P., Venkata Ramesh Mamilla, G. Lakshmi Narayana Rao, and Sowdager Moin Ahmed. "Design and analysis of an automobile exhaust muffler." *Industrial and Systems Engineering* 1, no. 1 (2016): 10-15.

پی‌نوشت

- 
1. Acoustic metamaterials
  2. Labyrinthine
  3. Ansys Fluent
  4. Fano interference
  5. Quarter wave resonator
  6. Helmholtz resonator
  7. Fabry-Pérot
  8. Membrane-Type Acoustic Metamaterials (MAMs)
  9. Computational Fluid Dynamics (CFD)
  10. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
  11. Menter's Shear Stress Transport (SST)
  12. Dissipation rate of turbulence kinetic energy
  13. Turbulence frequency
  14. Turbulent eddy viscosity
  15. Pressure Acoustics, Frequency Domain
  16. Thermoviscous Boundary Layer Impedance
  17. Mass flow inlet
  18. Pressure outlet
  19. Coupled
  20. Second-order upwind
  21. Poly hexcore
  22. Dewesoft