

ارزیابی کارایی روش ماتریس انتقال در پیش‌بینی عملکرد آکوستیکی مافله‌های واکنشی و اتلافی

امید غنوی چاکانی^۱، سید عباس سادات سکاکی^{۱*}، علی رجب‌پور^۱

^۱ آقروین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sakak@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

کنترل نویز در سامانه‌هایی چون تهویه، اگزوز دیزل ژنراتورها و تجهیزات HVAC همواره چالش‌برانگیز بوده است. مافله‌های مجهز به لوله پرفوره و لایه‌های جاذب به دلیل کارایی مناسب در پهنای باند وسیع کاربرد گسترده‌ای دارند. در این پژوهش کارایی روش ماتریس انتقال (*Transfer Matrix Method*) برای پیش‌بینی عملکرد سه نوع مافله شامل واکنشی ساده، واکنشی با لوله پرفوره و اتلافی با لایه جاذب بررسی شد. نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه گردید و نشان داد که روش محاسباتی TMM در فرکانس‌های زیر فرکانس قطع دقت بالایی در پیش‌بینی افت انتقال (*Transmission Loss*) دارد، هرچند در فرکانس‌های بالاتر اختلاف‌ها افزایش می‌یابد. در مجموع، این روش می‌تواند ابزاری سریع و قابل اعتماد برای طراحی اولیه مافله‌های صنعتی باشد.

کلمات کلیدی: مافله؛ کاهش شدت صوت؛ ماتریس انتقال؛ لوله متخلخل و جاذب

مقدمه

کاهش نویز در سامانه‌های صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است و یکی از راهکارهای متداول، به‌کارگیری مافله‌هاست. این تجهیزات به دو دسته کلی واکنشی (*Reactive*) و اتلافی (*Dissipative*) تقسیم می‌شوند. نوع اتلافی که از لوله‌های پرفوره و مواد جاذب فیبری تشکیل می‌شود، به دلیل قابلیت عملکرد در پهنای باند گسترده و امکان کاهش ابعاد، کاربرد فراوانی به‌ویژه در شرایط محدودیت فضایی دارد. برای تحلیل رفتار آکوستیکی مافله‌ها روش‌های متعددی ارائه شده است. در میان آن‌ها، روش ماتریس انتقال (*TMM*) به دلیل سادگی، سرعت محاسبات و قابلیت اعمال بر هندسه‌های متنوع، از پرکاربردترین ابزارها به‌شمار می‌رود. در این روش هر المان آکوستیکی به صورت جداگانه مدل‌سازی شده و با ترکیب آن‌ها می‌توان پارامترهای عملکردی از جمله افت انتقال صوتی (*TL*) را پیش‌بینی کرد. با این حال، اعتبارسنجی نتایج عددی از طریق مقایسه با داده‌های تجربی برای مشخص شدن دقت و محدودیت‌های مدل ضروری است.

در این پژوهش، کارایی روش *TMM* در پیش‌بینی رفتار سه نوع مافلر شامل واکنشی ساده، واکنشی با لوله پرفوره و اتلافی مجهز به لایه جاذب مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده است.

پژوهش‌های متعددی در زمینه تحلیل آکوستیکی مافلرها انجام شده است. *Sullivan (1987)* با معرفی روابط تجربی برای لوله‌های پرفوره، چارچوبی پایه برای بررسی مافلرهای اتلافی ارائه داد. [1] در این زمینه *Chiu* و همکاران نیز مدل‌های تحلیلی متنوعی توسعه دادند که تأثیر هندسه و شرایط مرزی را بر عملکرد صوتی مافلرهای واکنشی و ترکیبی آشکار ساخت. [4], [5] در حوزه داده‌های تجربی، *Lee (2005)* با استفاده از آزمایش‌های لوله امپدانس دو میکروفونه، اطلاعات ارزشمندی از رفتار آکوستیکی انواع مافلر فراهم کرد که مبنای مقایسه‌های عددی و تحلیلی بعدی قرار گرفت. [6]

مدل سازی

در این پژوهش برای تحلیل آکوستیکی مافلرها از روش ماتریس انتقال (*TMM*) استفاده شد. در این روش هر المان آکوستیکی (مانند لوله پرفوره، محفظه‌ی توسعه یا لایه‌ی جاذب) به صورت یک سیستم خطی با ماتریس انتقال معرفی می‌شود. با ضرب متوالی این ماتریس‌ها، ماتریس کلی مافلر به دست آمده و بر اساس آن افت انتقال صوتی (*TL*) محاسبه می‌گردد. سه نوع مافلر در مدل‌سازی حاضر مورد بررسی قرار گرفت:

۱. مافلر واکنشی ساده (*Simple Expansion Chamber*)

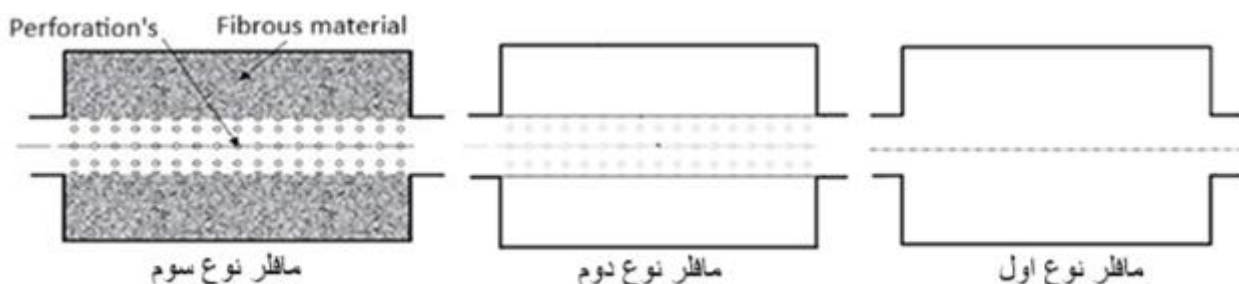
۲. مافلر واکنشی با لوله پرفوره داخلی

۳. مافلر اتلافی شامل لوله پرفوره و لایه جاذب فیبری

سه نوع مافلر نام برده شده در شکل ۱ نشان داده شده اند.

برای بخش پرفوره از روابط تجربی *Sullivan & Crocker (1978)* جهت محاسبه امپدانس تخلخل استفاده شد. در بخش مواد جاذب نیز مدل‌های *Johnson et al. (1987)* و *Allard & Champoux (1992)* برای تعیین چگالی و عدد موج مؤثر به کار گرفته شدند. [۱], [۲], [۳]

اعتبارسنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی پژوهش *Lee (2005)* انجام گرفت [۶]. در این آزمایش‌ها افت انتقال سه مافلر فوق با استفاده از روش استاندارد لوله امپدانس دو میکروفونه اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج عددی و تجربی امکان ارزیابی دقت و کارایی روش *TMM* را فراهم نمود.



شکل ۱: سه نوع مافلر مورد بررسی ذکر شده در این پژوهش (به ترتیب)

روش ماتریس انتقال

روش ماتریس انتقال (TMM) با نمایش هر المان آکوستیکی به صورت یک ماتریس 2×2 ، امکان ارتباط بین پارامترهای فشار و سرعت آکوستیکی در ابتدا و انتهای المان را فراهم می‌کند. با ضرب متوالی این ماتریس‌ها، ماتریس کلی مافلر به دست آمده و روابط مورد نیاز برای محاسبه افت انتقال صوتی (TL) استخراج می‌شود:

$$\begin{pmatrix} \bar{p}_0 \\ \rho_0 c_0 \bar{u}_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \bar{p}_3 \\ \rho_0 c_0 \bar{u}_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

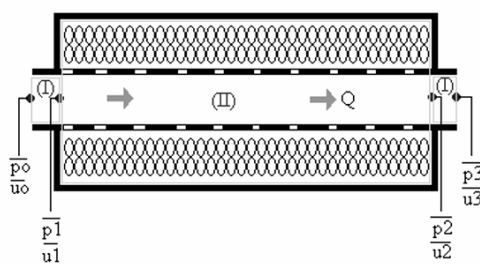
در رابطه (۱)، پارامتر c_0 سرعت صوت درون سیال و پارامتر ρ_0 چگالی سیال در شرایط کارکرد می‌باشد. به‌طور کلی، ماتریس انتقال کل سیستم از ضرب متوالی ماتریس‌های انتقال هر المان به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} = \prod_i [T_i] \quad (2)$$

بر اساس ماتریس انتقال نهایی، افت انتقال صوتی (Transmission Loss - TL) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TL = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{2} * (T_{1,1} + T_{1,2} + T_{2,1} + T_{2,2}) \right] + 10 * \log_{10} \left[\frac{S_{outlet}}{S_{inlet}} \right] \quad (3)$$

همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، گره‌های اصلی و نحوه‌ی اتصال المان‌های آکوستیکی در یک مافلر نمونه نمایش داده شده است.



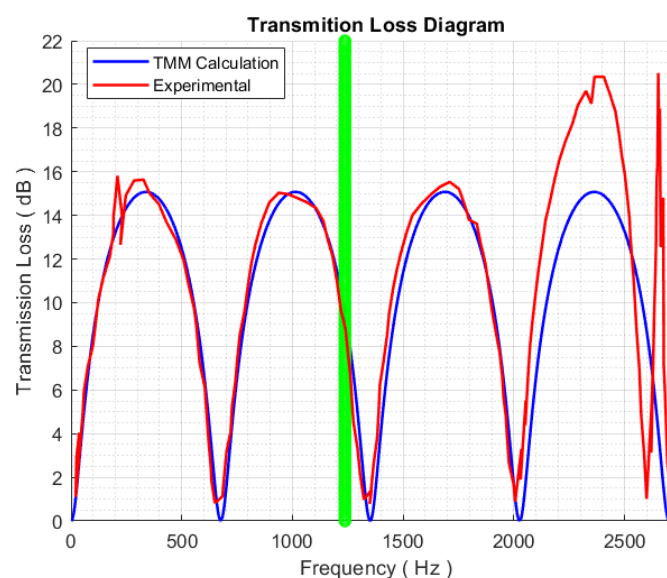
شکل ۲: نحوه اختصاص گره‌ها میان المان‌ها در مافلر

نتایج و بحث

به منظور ارزیابی کارایی روش ماتریس انتقال (TMM)، با استفاده از روش معرفی شده توسط $Chiu (2011)$ برای المان لوله پرفوره و جاذب و المان‌های محفظه‌ی ساده، نتایج از مدل‌سازی عددی محاسبه شده و با داده‌های تجربی منتشرشده توسط $Lee (2005)$ مقایسه شد. [4]، [6] در این پژوهش سه نوع مافلر بررسی گردید: مافلر واکنشی ساده به عنوان مرجع پایه، مافلر واکنشی با لوله پرفوره داخلی که بیانگر تأثیر تخلخل است، و مافلر اتلافی شامل لوله پرفوره و لایه جاذب که به واسطه ماده جاذب عملکرد موثرتر در پهنای باند گسترده تر دارد. این انتخاب امکان تحلیل نقش هر یک از مکانیزم‌های تضعیف صوتی را به صورت مرحله‌ای فراهم می‌سازد. برای هر مافلر که ساختار هندسی آن به صورت شماتیک در شکل ۱ ارائه شده است، نمودار افت انتقال (TL) حاصل از روش TMM در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نمایش داده خواهد شد.

مافلر نوع اول (مافلر ساده واکنشی با محفظه انبساطی)

برای مافلر نوع اول، نتایج حاصل از محاسبات طبق روش TMM بدست آمده و در کنار نتایج تجربی در نمودار زیر نشان داده شده است.

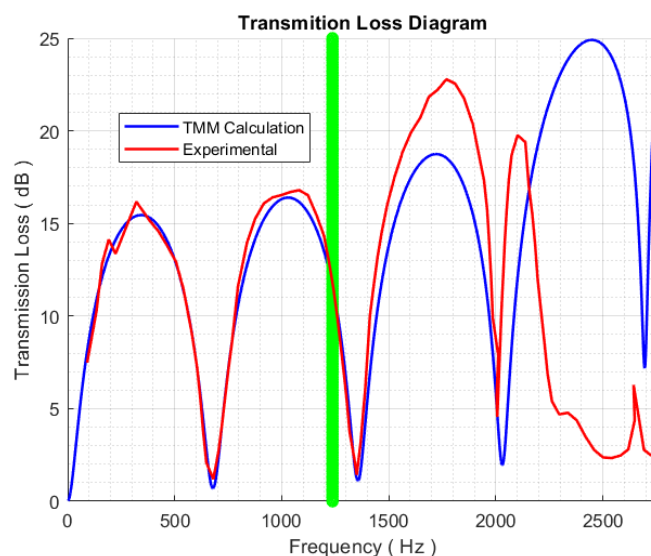


شکل ۳: نتایج افت انتقال در مافلر نوع اول

در نمودار بالا، خط سبز نشان‌دهنده‌ی فرکانس قطع ($Cut-off$) است؛ مرزی که در آن روش TMM اعتبار دارد. در محدوده‌ی زیر این خط، نتایج مدل با داده‌های تجربی تطابق خوبی داشته و اختلاف ناچیز است. اما پس از عبور از فرکانس قطع، به دلیل محدودیت فرضیات مدل و حضور پدیده‌های آکوستیکی پیچیده‌تر فراتر از موج صفحه‌ای، به تدریج اختلاف میان نتایج تحلیلی و تجربی افزایش می‌یابد. با این حال مشاهده می‌شود این اختلاف تا فرکانسی تقریباً ۲ برابر فرکانس قطع اولیه، اختلاف کمی با نتایج تجربی دارد.

مافلر نوع دوم (مافلر واکنشی با لوله پرفوره داخلی)

برای مافلر نوع دوم ، نتایج حاصل از محاسبات طبق روش *TMM* بدست آمده و در کنار نتایج تجربی در نمودار زیر نشان داده شده است.

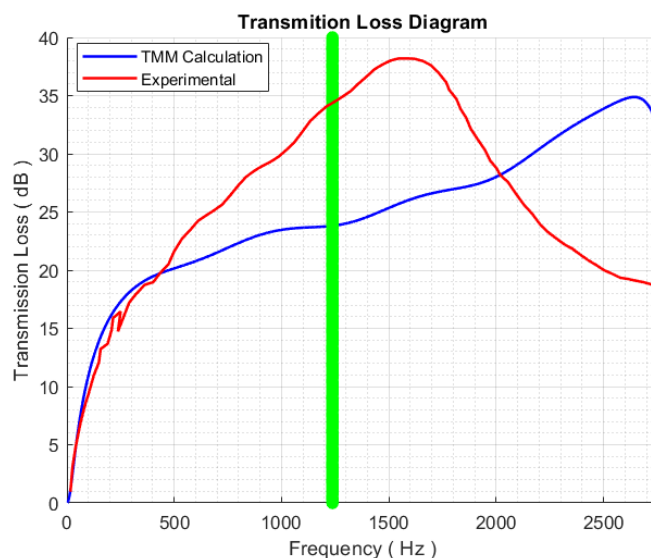


شکل ۴: نتایج افت انتقال در مافلر نوع دوم

در بررسی مافلر دوم نیز تا پیش از خط سبز (فرکانس قطع) هم‌خوانی قابل توجهی میان مدل تئوریک و داده‌های تجربی مشاهده می‌شود. اما پس از این مرز، اختلاف نتایج نمایان می‌گردد. در این نوع مافلر، حضور لوله پرفوره موجب می‌شود گذار از موج صفحه‌ای به مودهای غیرصفحه‌ای سریع‌تر رخ دهد؛ از این‌رو میزان اختلاف‌ها پس از فرکانس قطع نسبت به حالت بدون لوله پرفوره شدیدتر است.

مافلر نوع سوم (مافلر اتلافی با لوله پرفوره داخلی و جاذب)

برای مافلر نوع سوم ، نتایج حاصل از محاسبات طبق روش *TMM* بدست آمده و در کنار نتایج تجربی در نمودار زیر نشان داده شده است.



شکل ۵: نتایج افت انتقال در مافلر نوع سوم

در مافلر سوم که شامل لوله پرفوره و لایه جاذب است، عملکرد از نظر افت انتقال به وضوح در بازه وسیع‌تری از فرکانس‌ها افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به مانند نمودارهای قبل، پیش از فرکانس قطع (خط سبز) انطباق مناسبی میان مدل تئوریک و داده‌های تجربی وجود دارد. اما در فرکانس‌های بالاتر، اختلاف نتایج بیشتر می‌شود؛ به‌ویژه در نواحی اوج که مدل *TMM* توانایی بازتولید کامل رفتار آزمایشگاهی را ندارد.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش کارایی روش ماتریس انتقال (*TMM*) در پیش‌بینی افت انتقال صوتی سه نوع مافلر شامل واکنشی ساده، واکنشی با لوله پرفوره و اتلافی مجهز به جاذب مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان داد که این روش در محدوده‌ی فرکانس‌های زیر فرکانس قطع دقت بسیار خوبی دارد و توانسته روند تغییرات *TL* را به‌درستی بازتولید کند. در فرکانس‌های بالاتر، اختلاف میان نتایج تئوریک و آزمایشگاهی افزایش یافت که ناشی از محدودیت فرض موج صفحه‌ای و روابط تجربی به‌کاررفته برای مواد جاذب است. با این وجود، *TMM* به دلیل سادگی، سرعت محاسبات و دقت قابل قبول در محدوده عملیاتی، می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای طراحی اولیه و بهینه‌سازی مافلرهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری گروه مپنا به انجام رسیده است.

منابع

- [۱] Sullivan J.W. and Crocker M.J., "Analysis of concentric tube resonators having unpartitioned cavities," *J. Acous. Soc. Am.*, vol. 64, pp. 207–215, 1978.
- [۲] M. C. Chiu, "Optimization design of hybrid mufflers on broadband frequencies using the genetic algorithm," *Archives of Acoustics*, vol. 36, no. 4, pp. 795–822, 2011, doi: 10.2478/V10168-011-0053-5.
- [۳] M.-C. Chiu, "Simulated Annealing Optimization on Multi-Chamber Mufflers Hybridized with Perforated Plug-Inlet Under Space Constraints," 2009.
- [۴] Iljae Lee and Ahmet Selamet, "ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF PERFORATED DISSIPATIVE AND HYBRID SILENCERS," 2005, doi: 10.4271/2003-01-1643.
- [۵] B. D. DAVID Linton Johnson, J. Koplik, and R. D. A S H E N, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media," 1987.
- [۶] J.-F. Allard and Y. Champoux, "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials," Jan. 1992. [Online]. Available: <http://asadl.org/terms>