

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

امید غنوی چاکانی

کارشناس مهندسی مکانیک

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

omidghanavi@yahoo.com

سید عباس سادات سکاک*

دانشیار مهندسی مکانیک

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

sakak@eng.ikiu.ac.ir

علی رجب پور

دانشیار مهندسی مکانیک

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

rajabpour@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

کنترل نویز در سامانه‌های صنعتی مانند سیستم‌های تهویه، اگزوز دیزل ژنراتورها و تجهیزات تهویه مطبوع^۱ (HVAC) از مسائل مهم مهندسی آکوستیک است. مافله‌های مجهز به لوله پرفوره و لایه‌های جاذب فیبری، به دلیل تضعیف مؤثر صدا در گستره وسیعی از فرکانس‌ها، کاربرد فراوانی دارند. در این پژوهش، کارایی روش ماتریس انتقال^۲ (TMM) در پیش‌بینی عملکرد آکوستیکی سه نوع مافله شامل مافله واکنشی ساده، مافله واکنشی با لوله پرفوره و مافله اتلافی با جاذب فیبری بررسی شده است. در مدل‌سازی، امپدانس لوله پرفوره و خواص معادل محیط متخلخل با استفاده از مدل‌ها و روابط معتبر آکوستیکی محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از روش TMM با داده‌های تجربی مقایسه شده و سپس رفتار آکوستیکی مافله‌ها و اثر ویژگی‌های هندسی و ماده‌ای مؤثر بر عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش TMM در محدوده فرکانسی پایین، که در آن فرض انتشار موج صفحه‌ای اعتبار بیشتری دارد، تطابق مناسبی با نتایج تجربی ارائه می‌دهد. با افزایش فرکانس و افزایش اهمیت موده‌های بالاتر، اختلاف میان نتایج TMM و داده‌های تجربی افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که حضور لوله پرفوره و ماده جاذب متخلخل، با تغییر شرایط کوپل‌شدن و سازوکارهای اتلاف انرژی، ویژگی‌های فرکانسی افت انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس، روش TMM با وجود محدودیت در فرکانس‌های بالاتر، به دلیل سادگی و سرعت محاسبات، ابزاری مناسب برای تحلیل و طراحی اولیه مافله‌های صنعتی در محدوده کاربرد مدل است.

واژگان کلیدی: مافله، افت انتقال صوت، روش ماتریس انتقال، لوله پرفوره، جاذب فیبری، عملکرد آکوستیکی

۱. مقدمه

* نویسنده مسئول

کاهش نویز در سامانه‌های صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است و یکی از راهکارهای متداول، به‌کارگیری مافلرهاست. این تجهیزات به دو دسته‌ی کلی واکنشی^۳ و اتلافی^۴ تقسیم می‌شوند. نوع اتلافی که معمولاً 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 مافلرها 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^۵ (*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.

پژوهش‌های متعددی در زمینه تحلیل آکوستیکی مافلرها انجام شده است که هر یک به نوبه‌ی خود نقش مهمی در توسعه دانش موجود داشته‌اند. مونجال در کتاب مرجع خود، با استفاده از روش ماتریس انتقال (*TMM*) به‌عنوان چارچوب اصلی تحلیل، ساختارهای پایه‌ای و کلاسیک مافلرها از جمله محفظه‌های انبساطی منفرد و چندبخشی را به‌دقت مدل‌سازی و تحلیل کرد. کار او به‌ویژه در ارائه فرمول‌بندی دقیق برای محفظه‌های با سطح مقطع متغیر و بررسی اثر جریان میانگین بر عملکرد آکوستیکی، پایه‌ای برای بسیاری از پژوهش‌های بعدی شد [۱]. سولیوان و کراکر با معرفی روابط تجربی جدید برای محاسبه امپدانس ناشی از تخلخل لوله‌های پرفوره، چارچوبی پایه برای بررسی مافلرهای اتلافی ارائه دادند. این روابط که شامل اثرات ضخامت لوله، قطر سوراخ‌ها و درصد تخلخل بود، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر انتقال صوت از طریق سوراخ‌ها را فراهم کرد و به یکی از پراستندترین مراجع در حوزه مافلرهای پرفوره تبدیل شد [۲]. سولیوان نیز در ادامه، روش مدل‌سازی اجزای مافلر لوله پرفوره را با در نظر گرفتن شرایط مرزی واقعی‌تر توسعه داد و کارایی آن را برای پیکربندی‌های مختلف صنعتی به اثبات رساند [۳]. در این زمینه چو با استفاده از روش دی‌کوپل کردن معادلات کوپل‌شده در لوله‌های پرفوره و جاذب و بهره‌گیری از روش ماتریس انتقال، مدل‌های تحلیلی متنوعی توسعه داد که تأثیر هندسه و شرایط مرزی را بر عملکرد صوتی مافلرهای واکنشی و ترکیبی آشکار ساخت. وی همچنین بهینه‌سازی پارامترهای هندسی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داد که نشان‌دهنده‌ی اهمیت طراحی بهینه در دستیابی به عملکرد مطلوب است [۴، ۵]. از سوی دیگر، مدل‌سازی دقیق مواد جاذب فیبری نیازمند روابط تجربی معتبری است که جانسون و همکاران با ارائه مدلی فیزیکی برای محاسبه چگالی مؤثر و ترازوایی دینامیکی محیط متخلخل، گامی اساسی در این راستا برداشتند. مدل ایشان مبتنی بر ساختار میکروسکوپی ماده بوده و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار آکوستیکی را در فرکانس‌های مختلف فراهم می‌کند [۶]. همچنین آلارد و شامپو روابط جدیدی برای انتشار صوت در مواد فیبری با قاب صلب ارائه کردند که در فرکانس‌های پایین نیز معتبر بوده و به‌ویژه برای مواد با مقاومت جریان بالا کارایی مناسبی دارد [۷]. در حوزه داده‌های تجربی، لی با استفاده از آزمایش‌های لوله امپدانس دو میکروفون (روش استاندارد و دقیق در اندازه‌گیری افت انتقال)، اطلاعات ارزشمندی از رفتار آکوستیکی انواع مافلرهای پرفوره اتلافی و ترکیبی فراهم کرد. داده‌های تجربی وی که شامل پیکربندی‌های مختلف از نظر درصد تخلخل،

قطر سوراخ‌ها و چگالی جاذب می‌شود، مبنای مقایسه‌های عددی و تحلیلی بسیاری از پژوهش‌های بعدی قرار گرفت [۸]. در مجموع، مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش TMM با تکیه بر روابط تجربی معتبر برای امپدانس تخلخل و خواص جاذب، می‌تواند ابزاری کارآمد برای تحلیل عملکرد مافلرها باشد، هرچند اعتبارسنجی آن در برابر داده‌های تجربی برای هر پیکربندی جدید ضروری است.

هدف این پژوهش بررسی نظام‌مند قابلیت کاربرد و محدودیت‌های این روش برای پیکربندی‌های مختلف مافلر است. بدین منظور، سه پیکربندی شامل محفظه انبساطی ساده، مافلر مجهز به لوله پرفوره و مافلر اتلافی شامل لوله پرفوره و ماده جاذب متخلخل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از مقایسه نتایج تحلیلی با داده‌های تجربی، اثر پارامترهای مهم هندسی و ماده‌ای، از جمله قطر سوراخ، درصد تخلخل، خواص ماده جاذب و شرایط جریان، بر مشخصه انتقال صوت نیز بررسی شده است. همچنین، محدوده فرکانسی کاربرد فرض موج تخت و عوامل مؤثر بر کاهش دقت روش ماتریس انتقال در پیکربندی‌های پیچیده‌تر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مدل‌سازی

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^۶

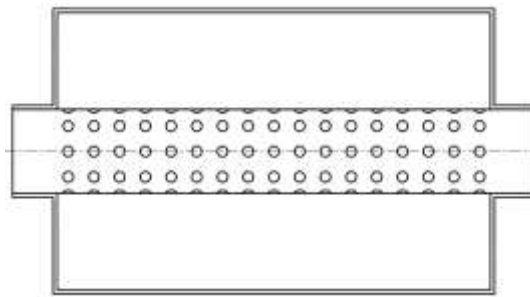
۲. مافلر واکنشی با لوله پرفوره داخلی

۳. مافلر اتلافی شامل لوله پرفوره و لایه جاذب فیبری

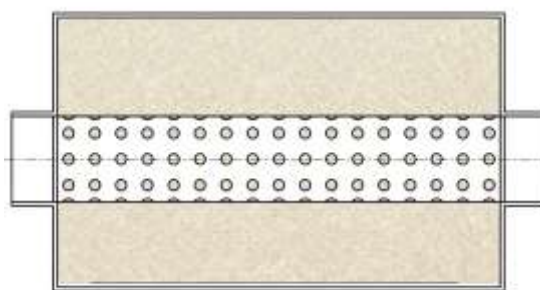
برای بخش پرفوره از روابط تجربی سالیوان و کروکر جهت محاسبه امپدانس تخلخل استفاده شد [۲]. در بخش مواد جاذب نیز مدل‌های آلارد و دشامپو [۷] و جانسون و همکاران [۶] برای تعیین چگالی و عدد موج مؤثر به کار گرفته شدند. اعتبارسنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی پژوهش انجام شده توسط لی صورت گرفت [۸]. در این آزمایش‌ها افت انتقال سه مافلر فوق با استفاده از روش استاندارد لوله امپدانس دو میکروفون اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج عددی و تجربی امکان ارزیابی دقت و کارایی روش TMM را فراهم نمود.



شکل ۱: نمای شماتیک مافلر واکنشی ساده (محفظه انبساطی)



شکل ۲: نمای شماتیک مافلر واکنشی مجهز به لوله پرفوره داخلی



شکل ۳: نمای شماتیک مافلر اتلافی مجهز به لوله پرفوره و لایه جاذب فیبری

۲.۲ روش ماتریس انتقال

در روش ماتریس انتقال، برای یک المان آکوستیکی ساده، به صورت یک ماتریس ۲ در ۲، امکان ارتباط بین پارامترهای فشار و سرعت آکوستیکی را در ابتدا و انتهای المان فراهم می‌کند. این امر در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ \rho_0 c_0 u_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} \\ T_{2,1} & T_{2,2} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} p_3 \\ \rho_0 c_0 u_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

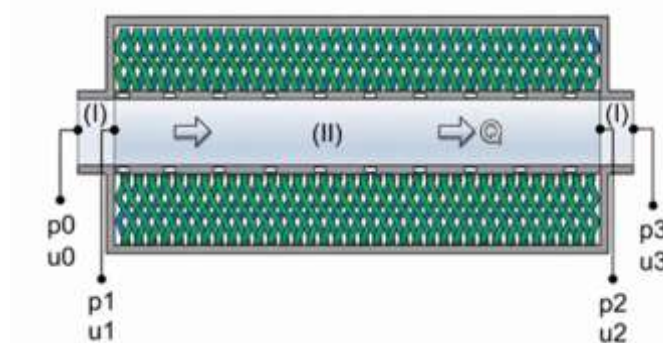
که در رابطه بالا p فشار آکوستیکی و u سرعت، c_0 سرعت صوت در سیال و ρ_0 چگالی سیال می‌باشد. با ضرب متوالی این ماتریس‌ها به ترتیب قرارگیری المان در مسیر جریان طبق رابطه ۲، ماتریس انتقال نهایی مافلر محاسبه می‌شود.

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

پس از محاسبه ماتریس انتقال کلی، میزان افت انتقال صوت به عنوان معیار اصلی بر عملکرد آکوستیکی مافلر، با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌گردد.

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

که در آن پارامتر S ، مساحت در ورودی و خروج جریان در مجموعه است. نحوه تقسیم مافلر به المان‌های آکوستیکی و اختصاص گره‌های مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: تفکیک المان‌های آکوستیکی و گره‌های محاسباتی

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای هر یک از این المان‌ها ماتریس انتقال محاسبه شده و در نهایت با ضرب آنها ماتریس انتقال مجموعه محاسبه می‌گردد.

در مافلرهای دارای لوله پرفوره، به دلیل کوپل شدن میدان آکوستیکی در داخل لوله و فضای پیرامونی، معادلات حاکم به صورت کوپل شده تشکیل می‌شوند. پس از اعمال شرایط مرزی در سطوح ابتدا و انتهای المان، ماتریس انتقال معادل مورد استفاده برای محاسبه افت انتقال به دست می‌آید. در مافلر اتلافی نیز اثر ماده جاذب متخلخل با استفاده از خواص معادل آکوستیکی آن در همین چارچوب وارد مدل شده است. جزئیات هندسی و پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات هندسی و پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی مافلرها

پارامتر	مقدار
طول مافلر	۲۵/۷۲ cm
قطر محفظه اصلی	۱۶/۴۴ cm
قطر لوله ورودی	۴/۹۰ cm
قطر لوله خروجی	۴/۹۰ cm
درصد تخلخل لوله پرفوره	۸.۴ %
قطر سوراخ‌های لوله پرفوره	۰/۲۴۹ cm

چگالی ماده جاذب	۱۰۰ kg/m ³
مقاومت جریان پشم سنگ	۴۸۹۶ Rayl/m

لازم به ذکر است که تمامی نتایج بدست آمده در این روش بر اساس فرض موج صفحه‌ای درون مجموعه انجام می‌شود. این فرض تا زمانی معتبر است که فرکانس صوت از فرکانس قطع پایین‌تر بماند. فرکانس قطع، فرکانسی است که در آن اولین مود عرضی در محفظه ظاهر می‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر از آن، تنها موج صفحه‌ای منتشر شده و توزیع فشار در سطح مقطع تقریباً یکنواخت است. از آنجا که روش ماتریس انتقال بر مبنای فرض موج صفحه‌ای بدست آمده، انتظار می‌رود این روش تا فرکانس پایین‌تر از فرکانس قطع نتایج قابل قبول ارائه دهد. فرکانس قطع با استفاده از رابطه معرفی شده در منابع و با رابطه ۴ قابل محاسبه است [۱].

$$f_c = \frac{1.84 * c_0}{\pi d} (1 - M^2)^{0.5} \quad (۴)$$

که در آن c_0 سرعت صوت در سیال، M عدد ماخ جریان و d قطر محفظه موردنظر است.

شایان ذکر است که فرکانس قطع در این پژوهش به‌عنوان مشخصه‌ای برای تعیین شروع انتشار مودهای بالاتر و در نتیجه بررسی محدودیت فرض انتشار موج تخت مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، برای مافله‌های دارای عناصر پرفوره و ماده جاذب متخلخل، فرکانس قطع به‌تنهایی نمی‌تواند مرز دقیق اعتبار مدل ماتریس انتقال را تعیین کند، زیرا کوپل شدن میدان آکوستیکی، امپدانس عناصر پرفوره و مدل‌سازی خواص معادل محیط متخلخل نیز می‌توانند بر دقت نتایج اثرگذار باشند. از این‌رو، محدوده اعتبار روش در این پژوهش علاوه بر ملاحظات مربوط به فرکانس قطع، بر اساس مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی نیز ارزیابی شده است.

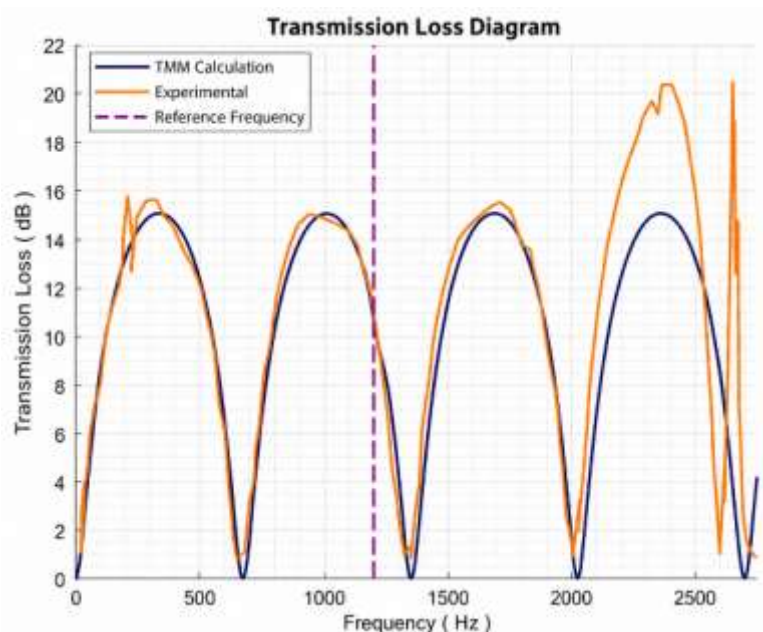
۳. نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی کارایی روش ماتریس انتقال (TMM)، مدل‌سازی المان‌های لوله پرفوره و لایه جاذب بر اساس روش ارائه‌شده توسط چو [۴،۵] انجام شد و نتایج عددی حاصل برای سه پیکربندی مافله با داده‌های تجربی منتشرشده توسط لی [۸] مقایسه گردید. در این پژوهش سه نوع مافله بررسی گردید: مافله واکنشی ساده به‌عنوان مرجع پایه، مافله واکنشی با لوله پرفوره داخلی که بیانگر تأثیر تخلخل است و مافله اتلافی شامل لوله پرفوره و لایه جاذب که به واسطه ماده جاذب عملکرد موثرتر در پهنای باند گسترده‌تر دارد. این انتخاب امکان تحلیل نقش هر یک از مکانیزم‌های تضعیف صوتی را به‌صورت مرحله‌ای فراهم می‌سازد.

ساختار هندسی سه مافله در شکل‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است. در ادامه، نتایج افت انتقال حاصل از روش TMM با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

۳-۱. مافلر نوع اول: مافلر واکنشی ساده 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.

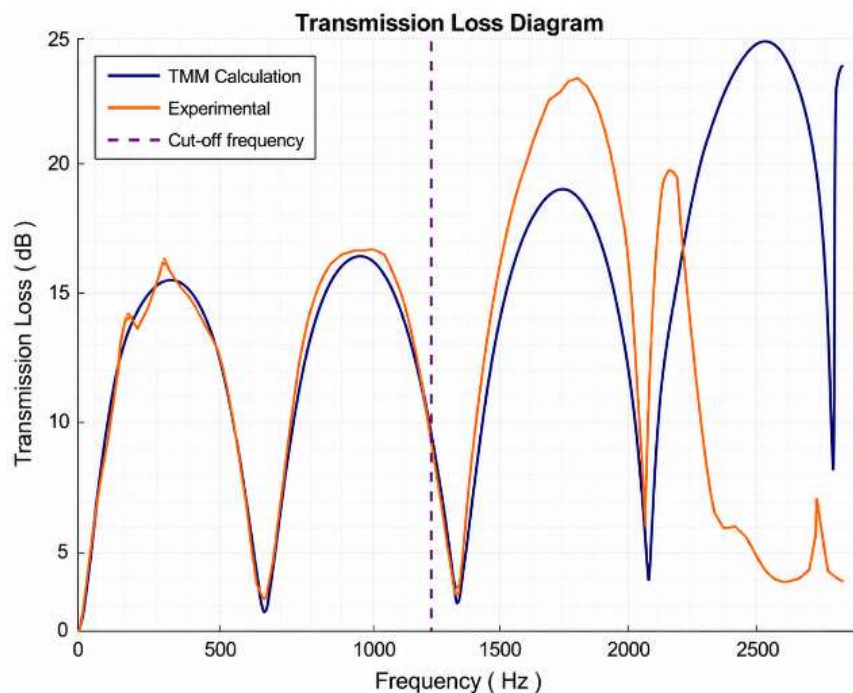


شکل ۵: مقایسه افت انتقال حاصل از روش TMM و داده‌های تجربی [۸] برای مافلر واکنشی ساده (محفظة انبساطی).

در نمودار شکل ۵، خط چین نشان‌دهنده‌ی فرکانس قطع^۷ است. این فرکانس شروع موده‌های بالاتر، مرزی برای اعتبار فرض موج صفحه‌ای محسوب می‌شود. با این حال، محدوده عملی اعتبار مدل TMM می‌تواند تحت تأثیر سایر تقریب‌های موجود در مدل، به‌ویژه در پیکربندی‌های دارای پرفوریشن و جاذب متخلخل، متفاوت باشد. 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 وجود، نتایج نشان می‌دهد که حتی تا حدود دو برابر فرکانس قطع نیز پیش‌بینی‌های روش TMM همچنان از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۳-۲. 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.



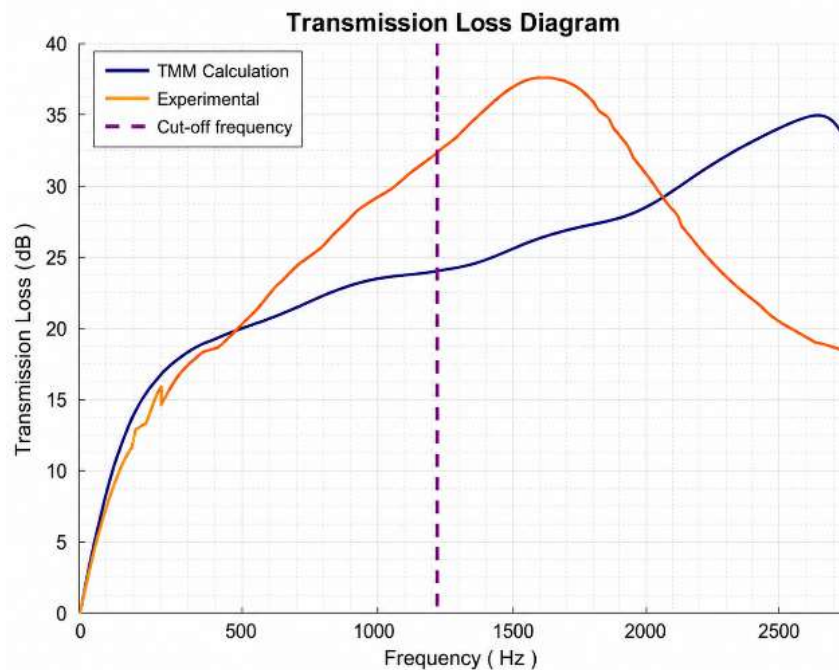
شکل ۶: مقایسه افت انتقال حاصل از روش TMM و داده‌های تجربی [۸] برای مافلر واکنشی مجهز به لوله پرفوره داخلی

در بررسی مافلر دوم نیز تا پیش از خط چین (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 این رو میزان اختلاف‌ها پس از فرکانس قطع نسبت به حالت بدون لوله پرفوره شدیدتر است.

شایان ذکر است در مافلر نوع دوم، حضور لوله پرفوره موجب ایجاد برهم‌کنش آکوستیکی میان میدان داخل لوله و میدان موجود در محفظه می‌شود. از این رو، فرمول‌بندی این بخش صرفاً بر اساس ماتریس انتقال یک مجرای منفرد انجام نشده است. معادلات حاکم برای دو ناحیه به صورت همزمان استخراج شده و اثر پرفوریشن از طریق امپدانس آکوستیکی سوراخ‌ها در دستگاه معادلات وارد شده است.

۳-۳. 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 شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه افت انتقال حاصل از روش TMM و داده‌های تجربی [۸] برای مافلر اتلافی مجهز به لوله پرفوره و لایه جاذب فیبری

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، همانند دو پیکربندی پیشین، پیش از فرکانس قطع (خط چین) انطباق مناسبی میان مدل تئوریک و داده‌های تجربی وجود دارد. اما در فرکانس‌های بالاتر، اختلاف نتایج بیشتر می‌شود؛ به‌ویژه در نواحی بالاتر از فرکانس قطع که مدل TMM توانایی بازتولید کامل رفتار آزمایشگاهی را ندارد.

شایان ذکر است در مافلر نوع سوم، اثر ماده جاذب از طریق خواص معادل وابسته به فرکانس شامل چگالی مؤثر و عدد موج مؤثر وارد مدل شده است. بنابراین، رفتار موج در ناحیه جاذب مستقیماً با موج داخل لوله پرفوره کوپل شده و ماتریس انتقال حاصل از حل دستگاه معادلات کوپل شده مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج حاصل از سه پیکربندی مورد بررسی نشان می‌دهد که افزایش پیچیدگی ساختار مافلر، علاوه بر تغییر مقدار افت انتقال، ویژگی‌های فرکانسی پاسخ آکوستیکی را نیز تغییر می‌دهد. در مافلر محفظه انبساطی، رفتار افت انتقال عمدتاً تحت تأثیر نسبت سطح مقطع محفظه به لوله و شرایط تشدید و ضدتشدید ناشی از تغییر ناگهانی سطح مقطع قرار دارد. با افزودن لوله پرفوره، بخشی از انرژی صوتی از طریق سوراخ‌ها میان لوله داخلی و محفظه مبادله می‌شود و در نتیجه، امپدانس آکوستیکی پرفوریشن و مشخصات هندسی آن نقش مهمی در تعیین پاسخ فرکانسی مافلر پیدا می‌کنند. در مافلر نوع سوم، حضور ماده جاذب متخلخل علاوه بر سازوکارهای مذکور، موجب اتلاف بخشی از انرژی آکوستیکی در محیط متخلخل می‌شود. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده میان سه پیکربندی را می‌توان ناشی از تغییر هم‌زمان شرایط انتشار، کوپل شدن میدان‌های آکوستیکی و سازوکارهای اتلاف انرژی دانست.

بررسی نتایج همچنین نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی و ماده‌ای مافلر تأثیر یکسانی بر پاسخ آکوستیکی ندارند. تغییر مشخصات لوله پرفوره، به‌ویژه قطر سوراخ‌ها و میزان تخلخل، با تغییر کوپل‌شدن آکوستیکی میان لوله داخلی و محفظه همراه است و از این طریق می‌تواند موقعیت فرکانسی تشدیدها و ضدتشدیدهای ایجادشده را جابه‌جا کند. از سوی دیگر، تغییر ویژگی‌های ماده جاذب، با تغییر امپدانس آکوستیکی و میزان اتلاف انرژی در محیط متخلخل، عمدتاً بر شدت و پهنای باند نواحی تضعیف صوت اثر می‌گذارد. این نتایج نشان می‌دهد که روش ماتریس انتقال، پس از صحت‌گذاری، می‌تواند علاوه بر پیش‌بینی افت انتقال، به‌عنوان ابزاری برای بررسی اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد آکوستیکی مافلر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۴. جمع‌بندی

در این پژوهش، کارایی روش ماتریس انتقال (TMM) در پیش‌بینی افت انتقال صوتی سه نوع مافلر شامل مافلر واکنشی ساده، مافلر واکنشی مجهز به لوله پرفوره و مافلر اتلافی مجهز به لوله پرفوره و لایه جاذب فیبری ارزیابی شد. مقایسه نتایج عددی و تجربی نشان داد که روش TMM در محدوده فرکانسی پایین، که در آن فرض انتشار موج صفحه‌ای اعتبار بیشتری دارد، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و روند تغییرات افت انتقال (TL) را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. با افزایش فرکانس و افزایش اهمیت موده‌های بالاتر، اختلاف میان نتایج عددی و تجربی افزایش می‌یابد. این اختلاف علاوه بر محدودیت فرض انتشار موج صفحه‌ای، می‌تواند تحت تأثیر تقریب‌های به‌کاررفته در مدل‌سازی لوله پرفوره و محیط جاذب متخلخل نیز قرار گیرد. همچنین، نتایج نشان داد که حضور لوله پرفوره و ماده جاذب با تغییر شرایط کوپل‌شدن آکوستیکی و سازوکارهای اتلاف انرژی، بر ویژگی‌های فرکانسی افت انتقال اثرگذار است. در مجموع، روش TMM با وجود محدودیت‌های مذکور، به دلیل سادگی و سرعت محاسبات، ابزاری کارآمد برای تحلیل و طراحی اولیه مافلرهای صنعتی در محدوده کاربرد مدل محسوب می‌شود.

۵. منابع

- [1] Munjal ML. *Acoustics of Ducts and Mufflers*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2014.
- [2] Sullivan JW, Crocker MJ. Analysis of concentric tube resonators having unpartitioned cavities. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1978;64(1):207–215.
- [3] Sullivan JW. A method of modeling perforated tube muffler components. I: Theory. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1979;66(3):772–778.
- [4] Chiu MC. Optimization design of hybrid mufflers on broadband frequencies using the genetic algorithm. *Archives of Acoustics*. 2011;36(4):795–822.
- [5] Chiu MC. Simulated annealing optimization on multi-chamber mufflers hybridized with perforated plug-inlet under space constraints. *Applied Acoustics*. 2009;70(7):967–981.

- [6] Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987;176:379–402.
- [7] Allard JF, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1992;91(6):3346–3353.
- [8] Lee I, Selamet A. Acoustic characteristics of perforated dissipative and hybrid silencers. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005;117(4):1972–1979.

-
- ¹ Heating, ventilating and air conditioning, HVAC
² Transfer matrix method, TMM
³ Reactive
⁴ Dissipative
⁵ Transmission loss, TL
⁶ Simple expansion chamber
⁷ Cut-off