

# بررسی اثرات پارامترهای هندسی مافلر واکنشی در کاهش آلاینده‌گی صوتی با در نظر گرفتن افت فشار

سید اسماعیل رضوی  
 محیا محمدی\*  
 استاد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
 کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

## چکیده

در این مقاله، اثرات پارامترهای هندسی در مافلر واکنشی روی کارایی میرایی آکوستیکی و افت فشار توسط روش المان محدود بررسی شده است. این اثرات عبارتند از: امتداد دادن لوله ورودی به درون محفظه انبساط و افزایش طول آن، افزودن سوراخ به تورفتگی‌ها و تغییر تعداد و موقعیت آن‌ها. معادلات با روش غیرخطی نیوتن مستهلک شده، حل شده‌اند و مدل آشفتگی مورد استفاده در تحلیل جریان، مدل  $k-\epsilon$  می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که کارایی میرایی آکوستیکی با افزودن تورفتگی و افزایش طول آن بهبود می‌یابد و افت فشار مافلر نیز کمتر می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که افزودن سوراخ به تورفتگی، افزایش تعداد سوراخ‌ها و نزدیکتر کردن آن‌ها به انتهای محفظه انبساط، فرکانس مربوط به اوج میرایی آکوستیکی را بدون تغییر چشم‌گیر افت فشار، افزایش می‌دهند. لذا می‌توان از آن‌ها برای بهبود طراحی مافلر در بازه فرکانس مورد نظر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: مافلر واکنشی، کارایی میرایی آکوستیکی، افت فشار، المان محدود، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ .

## Investigation of the Geometrical Parameters Effects of Reactive Muffler on Noise Reduction by Considering the Pressure Drop

S. E. Razavi  
 M. Mohammadi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
 Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

In this paper, the influences of the geometrical parameters of reactive muffler on acoustic attenuation performance and pressure drop have been investigated by using FEM. These effects consist of: to extend the inlet tube into the expansion chamber and increasing its length, adding holes to the extension and changing their number and position. The equations have been solved along with damped Newton method. The  $k-\epsilon$  turbulent model was used for flow field analysis. The results show that the acoustic attenuation performance improves and the pressure drop decreases by extending the inlet tube and increasing its length. Moreover adding holes to extension, increasing their number and setting the holes near the end of expansion chamber increase the maximum attenuation frequency without considerable change of the pressure drop. So they can be used to improve the design of muffler at target frequency range.

**Keywords:** Reactive muffler, Acoustic attenuation performance, Pressure drop, FEM,  $k-\epsilon$  model.

### ۱- مقدمه

می‌باشند. همچنین مقداری از انرژی آکوستیکی را توسط المان‌های آکوستیکی مقاومتی جذب می‌کنند [۲]. در حالت کلی در طراحی مافلر باید توجه داشت که مافلر دارای حداکثر کارایی میرایی آکوستیکی و حداقل افت فشار باشد.

در این زمینه مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. ناکارا و همکاران [۳] کارایی برخی از مافلرهای واکنشی (محفظه انبساط و مافلر تشدیدگر مرکزی) و ترکیبات سری و موازی آن‌ها با هم و با ماده جاذب را به صورت تجربی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که مافلرهای ترکیبی دارای کارایی میرایی آکوستیکی بالا در محدوده پهن‌بند می‌باشند. پیت [۴] با روش عددی تجزیه و اصلاحاتی راجع به جریان متوسط در محفظه و لوله مرکزی و تغییر امپدانس آکوستیکی سوراخ در جهت لوله و حفره، کارایی آکوستیکی صداگیر لوله مرکزی سوراخ‌دار را بررسی کرد و نتیجه گرفت که روش ارائه شده وی می‌تواند میرایی را به صورت دقیق‌تر و سریع‌تر نسبت به روش‌های تحلیلی جداسازی پیش‌بینی کند. سلامت و جی [۵] با سه روش (روش تحلیلی، روش المان مرزی زیرساختاری و آزمایشات) اثر طول محفظه انبساط، طول تورفتگی‌ها و مکان انحراف لوله‌های ورودی و خروجی را روی کارایی

صدای مزاحم به وجود آمده از موتورهای احتراق داخلی، ماشین‌آلات صنعتی مانند توربین‌های گازی و سیستم‌های تهویه در خودروها و ساختمان‌ها، سلامتی انسان را به خطر می‌اندازد. لذا طراحی درست صداگیرها به منظور کاهش صداهای مزاحم حائز اهمیت می‌باشد. صداگیرها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: (۱) صداگیرهای غیرفعال: که صدای مزاحم در آنها با انعکاس و جذب انرژی آکوستیکی میرا می‌گردد. (۲) صداگیرهای فعال: که صدای مزاحم را با روش‌های الکتریکی بازخورد و پیش‌خورد از بین می‌برند [۱]. صداگیرهای غیرفعال که مافلر نامیده می‌شوند، خود به دو بخش تقسیم می‌گردند: (۱) مافلرهای واکنشی: که مکانیزم اصلی آن‌ها انعکاس امواج آکوستیکی به سمت منبع می‌باشد. (۲) مافلرهای جذبی: که بر مبنای میرایی انرژی آکوستیکی توسط تلفات در ماده‌های جاذب صدا عمل می‌کنند. صداگیرهایی نیز برای میرا کردن صدا از هر دو روش بهره می‌برند مانند صداگیرها با لوله‌های سوراخ‌دار که در درجه اول انرژی آکوستیکی را به سمت منبع منعکس می‌کنند لذا جز دسته صداگیرهای واکنشی

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mahya69\_m@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۳۰

میرایی اکوستیکی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با انتخاب طول تورفتگی‌ها به نحوی که تشدیدها در فرکانس‌هایی اتفاق بیافتد که افت انتقال برابر صفر است، یک رفتار میرایی خوب به دست می‌آید.

گرگس و همکاران [۶] با روش ماتریس انتقال و آزمایشات، کارایی میرایی اکوستیکی برخی از مافلرهای واکنشی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که روش ماتریس انتقال می‌تواند تا حدی برای پیشگویی کارایی اکوستیکی، بدون روش‌های عددی زمان‌بر مانند المان محدود، مفید باشد. جی [۷] با روش المان مرزی چند منطقه‌ای رفتار اکوستیکی محفظه‌های دوگانه و سه‌گانه را مطالعه کرد. او اثرات برخی پارامترها مانند طول لوله متصل‌کننده داخلی و طول تورفتگی‌های ورودی و خروجی را بررسی کرد و نتیجه گرفت که در حالت کلی صداگیرهای محفظه چندگانه میرایی بیشتری را نسبت به حالت ساده در اکثر فرکانس‌ها از خود نشان می‌دهند. رضوی و همکاران [۸] جریان سیال درون محفظه انبساط ساده و دوگانه و کاهش صدای مزاحم آن‌ها را با نرم‌افزار FLUENT مطالعه کردند. آن‌ها جریان سیال را آشفتنه و ناپایا فرض کردند و نتیجه گرفتند که کاهش صدای مزاحم محفظه دوگانه بیشتر از حالت ساده است، درحالی‌که افت فشار در این حالت تا حدی افزایش می‌یابد. لی و ایچ [۹] کارایی میرایی اکوستیکی مافلر تشدیدگر مرکزی با الگوهای مختلف برای آرایش سوراخ‌ها را به صورت تجربی و با روش تجزیه جزیه‌جز بررسی کردند. آن‌ها همچنین فشار پشت مافلرهای مطالعه شده را با یک کد دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه کردند و نتیجه گرفتند که آرایشی که در آن، سوراخ‌ها به صورت یکنواخت تا وسط لوله افزایش و تا انتها کاهش می‌یابند بهترین افت انتقال و کمترین فشار پشت را در حالت کلی داراست. مطالعه اثرات هندسی در مافلرهای با لوله(های) تورفته سوراخ‌دار نیز می‌تواند موثر باشد که در این مقاله، این مورد مطالعه می‌شود.

یاسودا و همکاران [۱۰] با مدل یک بعدی دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار GT-Power و کار تجربی صدای مزاحم لوله اگزوز یک مافلر را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل ساده شده که دقت قابل قبولی دارد و می‌تواند مقدار زیادی از زمان اجرا را بکاهد ارائه دادند. میمانی و مونجال [۱۱] رفتار اکوستیکی مافلر با مقطع بیضی را با به‌دست آوردن پارامترهای ماتریس امپدانس با تابع گرین، بررسی کردند. آن‌ها اثرات طول محفظه و جهات محوری و زاویه‌ای لوله‌های ورودی و خروجی را مطالعه کرده و نتیجه گرفتند که در مافلرهای با طول بلند، قرار دادن لوله خروجی در وسط طول محفظه و لوله ورودی در مرکز، سبب ایجاد یک رفتار پهن‌بند می‌گردد. خیانتگ و همکاران [۱۲] کارایی میرایی اکوستیکی مافلر با لوله سوراخ‌دار میکرو را با روش المان محدود مطالعه کردند و رابطه‌ای بین فرکانس تشدید و طول بخش سوراخ‌دار در یک بازه فرکانس خاص ارائه دادند. یو و چنگ [۱۳] افت انتقال مافلرهایی با طرح‌های داخلی پیچیده را با روش تحلیلی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که قرارگیری بخش‌های عمودی درون محفظه انبساط خالی روی افت انتقال تاثیر می‌گذارد و ورودی/خروجی غیر هم‌مرکز سبب می‌گردد که مودها در فرکانس‌های دیگری اتفاق بیافتند.

در این مقاله اثرات امتداد دادن لوله ورودی و افزایش طول آن، افزودن سوراخ به تورفتگی و تعداد و تغییر موقعیت سوراخ‌ها روی کارایی میرایی اکوستیکی و افت فشار مطالعه شده است. همچنین برای

اعتبارسنجی روش عددی به‌کار رفته، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود در ادبیات فن مقایسه شده است.

## ۲- مبانی و مفاهیم

### ۲-۱- معادلات حاکم

معادله حاکم بر تحلیل اکوستیکی، معادله هلمولتز می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla p \right) + \frac{k^2 p}{\rho} = 0 \quad (1)$$

که در این معادله،  $k = 2\pi f/c_0$  تعداد موج،  $\rho$  چگالی سیال،  $c_0$  سرعت صوت و  $p$  فشار صوت می‌باشند. برای تحلیل اکوستیکی با حل معادله هلمولتز، پارامتر افت انتقال<sup>۱</sup> (یکی از پارامترهایی که کارایی میرایی اکوستیکی را نشان می‌دهد) به صورت زیر در فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌گردد [۲].

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

که  $W_{in}$  و  $W_{out}$  به ترتیب بیانگر انرژی اکوستیکی ورودی به و خروجی از محفظه انبساط می‌باشند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$W_{in} = \int_{\partial\Omega} \frac{p_0^2}{2\rho c_0} dA, \quad W_{out} = \int_{\partial\Omega} \frac{p^2}{2\rho c_0} dA \quad (3)$$

که در آن  $p_0$  برابر  $1 \text{ Pa}$  در نظر گرفته شده است. با توجه به مقدار CFM گازهای خروجی از موتور، سرعت در مرز ورودی برابر  $7.5 \text{ m/s}$  می‌باشد، با احتساب اعداد رینولدز و ماخ در مرز ورودی، مشاهده می‌شود که جریان تراکم‌ناپذیر و آشفتنه می‌باشد لذا معادلات حاکم بر جریان معادلات ناویر-استوکس میان‌گیری شده رینولدز می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۴]. مشخصات عملکردی موتور انتخابی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho u'_j u'_i) \quad (5)$$

که در این روابط،  $U_i$  بیانگر عبارت‌های سرعت میانگین،  $P$  فشار میانگین و  $\mu$  لزجت مولکولی می‌باشند.  $\rho u'_j u'_i$  تانسور تنش رینولدز است که با نماد  $\tau_{ij}$  نشان داده می‌شود و  $S_{ij}$  تانسور نرخ کرنش می‌باشد که با معادله (۶) بیان می‌گردد.

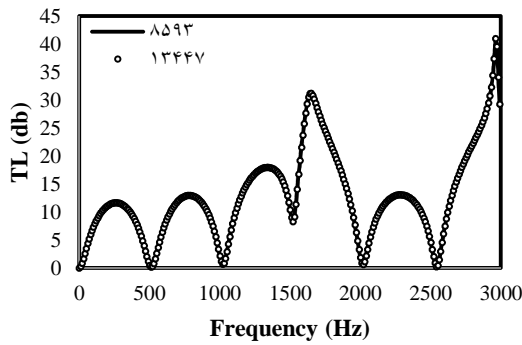
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

معادلات ناویر-استوکس توسط مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  حل می‌شوند که طبق معادلات زیر بیان می‌گردند.

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

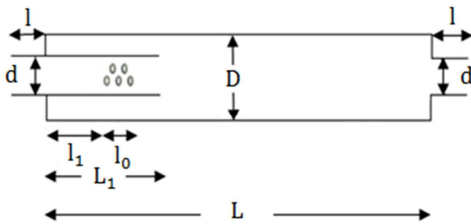
<sup>۱</sup> Transmission loss



شکل ۲- بررسی استقلال حل از شبکه در مافلر با طول تورفتگی ۴۰mm، اعداد بیانگر تعداد المان‌ها

### ۳- نتایج و بحث

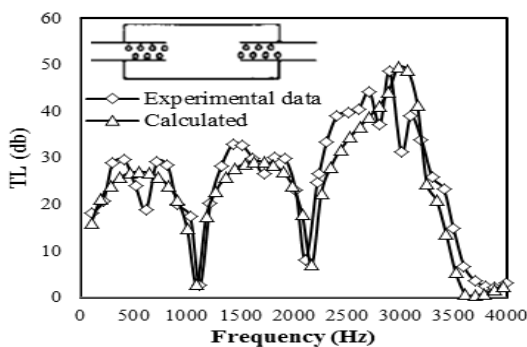
در این مقاله اثرات هندسی در مافلهای با تورفتگی سوراخ‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که امتداد دادن لوله ورودی نسبت به لوله خروجی، باعث بهبود بیشتر افت فشار می‌شود و در این مقاله، هدف بررسی پارامترهای هندسی بر روی کارایی میرایی آکوستیکی با در نظر گرفتن افت فشار است، لذا تورفتگی از طرف لوله ورودی می‌باشد. مقطعی از مافلهای مطالعه شده و ابعاد آن‌ها به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- مقطعی از مافلهای مطالعه شده

جدول ۲- ابعاد هندسه‌های مطالعه شده

۲،۴،۶	n (تعداد سوراخ‌ها)
۵ mm	d <sub>1</sub> (قطر سوراخ‌ها)
۳۰-۹۰ mm	L <sub>1</sub>
۱۰۰ mm	l
۵۰ mm	d
۳۴۰ mm	L
۱۳۵ mm	D
۱۰۰ mm	l <sub>0</sub>



شکل ۴- اعتبارسنجی روش عددی با نتایج کار Wang [۱۵]

که در این معادلات  $\mu_T$  لزجت آشفته‌گی بوده و طبق معادله زیر بیان می‌شود.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۹)$$

ضرایب این معادلات عبارتند از [۱۴]:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (۱۰)$$

جدول ۱- مشخصات عملکردی موتور انتخابی

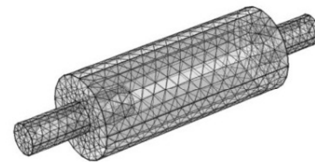
موتور احتراق جرقه‌ای A۱۲	نام موتور
inline	نوع
۴	تعداد سیلندر
۶۹ hp@ ۶۰۰۰ rpm	حداکثر قدرت
۹۴٫۹ N.m@ ۳۶۰۰ rpm	حداکثر گشتاور
۹	نسبت تراکم
۷۳ mm	قطر سیلندر
۷۰ mm	کورس پیستون
۱۱۷۱ cm <sup>3</sup>	حجم موتور
C.C.W	جهت چرخش

### ۲-۲- مدل‌سازی و روش حل عددی

در تحقیق حاضر، سیال کاری هوا می‌باشد. شبکه‌ها به صورت چهاروجهی تولید شده‌اند و استقلال حل از شبکه برای تمام هندسه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمایی از هندسه شبکه‌بندی شده و استقلال حل از شبکه را برای مافلر با طول تورفتگی ورودی ۴۰mm به عنوان مثال نشان می‌دهند.

شرایط مرزی تحلیل جریان عبارتند از: ورودی سرعت، فشار خروجی و شرط جامد (دیواره) برای باقی مرزها. در تحلیل آکوستیکی شرط فشار برای تعریف مرز ورودی، شرط صفحه سوراخ‌دار برای تعریف بخش‌های سوراخ‌دار و شرط مرز جامد صوتی<sup>۵</sup> برای تعریف باقی مرزها به کار می‌روند.

المان‌های خطی و مربعی به ترتیب برای گسسته‌سازی در تحلیل‌های جریان و آکوستیکی استفاده می‌شوند. معادلات با روش غیرخطی نیوتن مستهلک شده با نرم‌افزار COMSOL با معیار همگرایی<sup>۵</sup> ۱۰<sup>-۵</sup> حل شده‌اند.



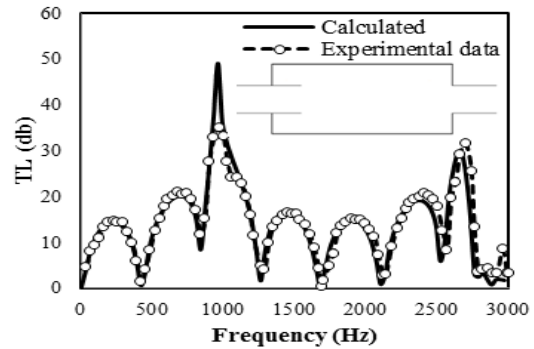
شکل ۱- نمایی از هندسه مورد بررسی شبکه‌بندی شده

<sup>۵</sup> Sound hard wall

جدول ۴- افت فشار محفظه انبساط ساده و مافلر با طول تورفتگی مختلف

افت فشار (Pa)	نوع مافلر
۴۸۲۰٫۶۶	مافلر ساده
۴۴۴۸٫۵۵	$L_1 = 20$ mm
۴۲۹۱٫۱۹	$L_1 = 40$ mm
۴۱۴۱٫۵۱	$L_1 = 50$ mm
۳۹۸۸٫۱۶	$L_1 = 60$ mm
۳۸۳۳٫۲۶	$L_1 = 70$ mm
۳۶۷۷٫۱۸	$L_1 = 80$ mm
۳۵۲۰٫۶۹	$L_1 = 90$ mm

با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که افزودن بخش تورفته به محفظه انبساط ساده سبب ایجاد تشدیدهایی در نمودار افت انتقال می‌گردد که به دلیل به وجود آمدن تشدیدگر بین بخش تورفته و دیواره محفظه انبساط می‌باشد. این مافلرها رفتار نوار عبوری محفظه انبساط ساده را بسته به فرکانس رخداد تشدید که به طول بخش تورفته وابسته است، از بین می‌برند و سبب ایجاد رفتار پهن‌بند می‌شوند که سودمند می‌باشد. هرچه طول تورفتگی بیشتر می‌شود، با افزایش در حجم تشدیدگر، تشدیدها در فرکانس‌های پایین‌تری رخ می‌دهند و لذا تعداد آن‌ها در بازه فرکانسی مورد مطالعه (قبل از فرکانس مربوط به شروع مود شعاعی اول) افزایش می‌یابد [۵]. همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، با افزودن تورفتگی به محفظه انبساط ساده، افت فشار به دلیل به تاخیر افتادن تغییر ناگهانی مساحت، کاهش یافته است و با افزایش طول تورفتگی و نزدیکتر شدن به حالتی که در آن، سیال درون لوله مستقیم حرکت می‌کند، کاهش افت فشار ادامه می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزودن تورفتگی به محفظه انبساط ساده روشی کارا و مفید می‌باشد چراکه سبب بهبود کارایی میرایی آکوستیکی و کاهش افت فشار می‌گردد.



شکل ۵- اعتبارسنجی روش عددی با نتایج کار Ji و Selamet [۵]

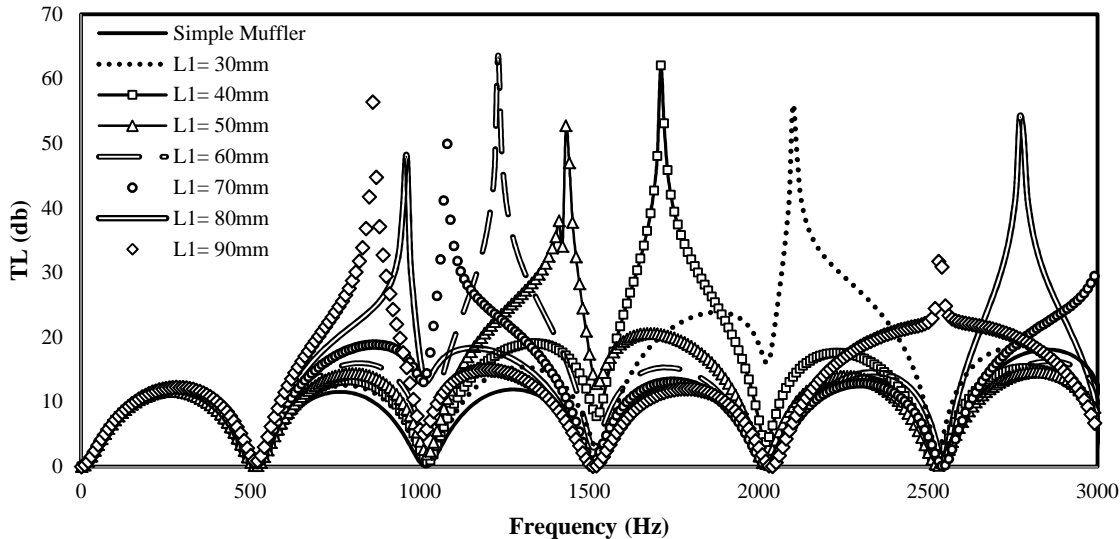
جدول ۳- ابعاد مافلرهای اعتبارسنجی شده

ابعاد مافلر	شماره شکل
$L=16$ cm	شکل ۴
$D=11.8$ cm	
$d=1.8$ cm	
$L_1=4$ cm	
$d_1=0.3$ cm	
% تخلخل = ۳٫۳۷۵	
$L=40.84$ cm	شکل ۵
$D=15.32$ cm	
$d=4.86$ cm	
$L_1=8$ cm	

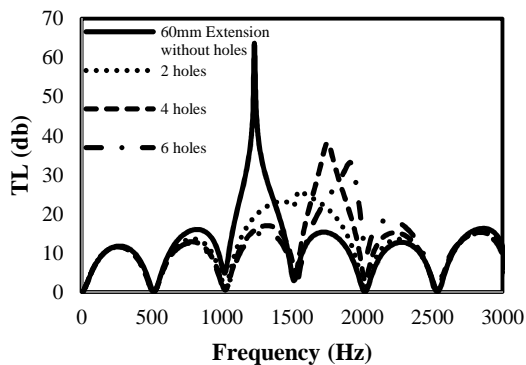
### ۳-۱- مطالعه اثر تورفتگی

محفظه انبساط با لوله‌های تورفته از ورودی یا خروجی یا هر دو سمت، نسبت به محفظه انبساط ساده دارای این مزیت است که بخشی از محفظه انبساط بین بخش تورفته و دیواره کناری مانند یک تشدیدگر عمل می‌کند و لذا افت انتقال بهبود می‌یابد. در این مافلرها فاصله بین بخش‌های تورفته باید حداقل ۱٫۵ برابر قطر محفظه انبساط باشد [۱۶]. لذا در این مقاله از این فاکتور به عنوان عامل تعیین‌کننده طول‌های تورفتگی استفاده شده است. شکل ۶ افت انتقال مافلر ساده و مافلر با طول تورفتگی ۳۰-۹۰ mm را نشان می‌دهد. اثر امتداد لوله ورودی به درون محفظه انبساط و افزایش طول آن روی افت فشار نیز بررسی شده است که مقادیر بدست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی حل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی منتشر شده، در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه شده‌اند. مقطعی از مافلرهای بررسی شده در کارهای تجربی و ابعاد آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

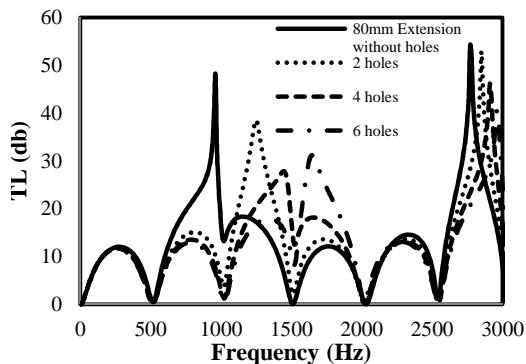
همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، توافق خوب و قابل قبولی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای مافلر با تورفتگی و مافلر با لوله تورفته سوراخ‌دار وجود دارد که بیانگر اعتبار روش عددی به کار رفته می‌باشد. لازم به ذکر است منظور از تخلخل در جدول ۳، نسبت مساحت سوراخ‌ها به مساحت کل بخش تورفته می‌باشد.



شکل ۶- افت انتقال مافلر ساده و مافلر با طول تورفتگی مختلف



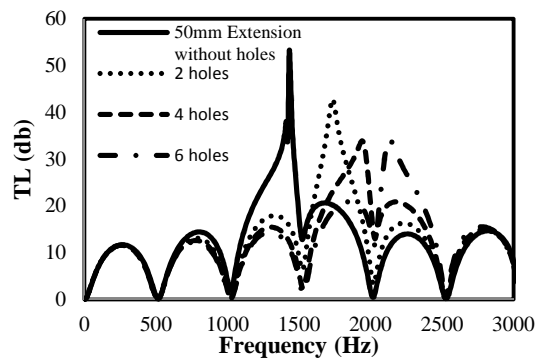
شکل ۸- افت انتقال مافلر با طول تورفتگی ۶۰mm با تعداد سوراخ‌های مختلف و حالت بدون سوراخ



شکل ۹- افت انتقال مافلر با طول تورفتگی ۸۰mm با تعداد سوراخ‌های مختلف و حالت بدون سوراخ

### ۳-۲- مطالعه اثر افزودن سوراخ به تورفتگی و تعداد و موقعیت آن

مافلهای دارای بخش سوراخ‌دار با ایجاد مافلهای شاخه-کناری توسط سوراخ‌ها علاوه بر انعکاس موج اکوستیکی به سمت منبع، مقداری از انرژی اکوستیکی را نیز با خنثی کردن تپش‌های فشار<sup>۱</sup> جذب می‌کنند که بسته به فرکانس هدف می‌توان از آن بهره برد [۲]. در این مقاله اثر افزودن سوراخ به تورفتگی و افزایش تعداد و تغییر موقعیت آن در تمام طول‌های تورفتگی بررسی شده است. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ و بخش اول جدول ۵ اثر افزایش سوراخ به تورفتگی و تعداد آن را برای مافلر با طول‌های تورفتگی ۵۰، ۶۰ و ۸۰ نشان می‌دهند.



شکل ۷- افت انتقال مافلر با طول تورفتگی ۵۰mm با تعداد سوراخ‌های مختلف و حالت بدون سوراخ

با توجه به شکل‌های ۷ الی ۹، با افزودن سوراخ به تورفتگی و افزایش تعداد آن‌ها، تشدید و لذا اوج میرایی به سمت فرکانس‌های بالاتر میل می‌کند. افزایش فرکانس تشدید با اضافه شدن سوراخ‌ها به دلیل کاهش حجم تشدیدگر نسبت به حالت بدون سوراخ می‌باشد. با افزایش تعداد سوراخ‌ها امواج صوتی بیشتری از آن‌ها عبور کرده و با کاهش فضای حرکت امواج، تشدیدها در فرکانس‌های بالاتر رخ می‌دهند. با توجه به جدول ۵، از آنجایی که تعداد سوراخ‌ها کم است، تغییرات زیادی در

<sup>۱</sup> Pressure pulses

نظر باشند بدون این که سبب افزایش افت فشار شوند.

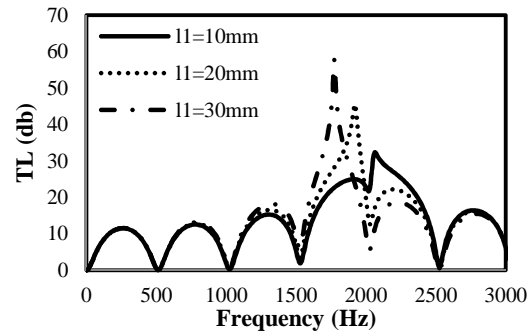
جدول ۵- افت فشار مافلهای سوراخ‌دار برای بررسی اثر افزودن سوراخ به تورفتگی و تغییر تعداد و موقعیت آن

افت فشار (Pa)	نوع مافلر	(۱)
۴۱۵۸,۷۸	n=۲	
۴۱۶۰,۱۴	n=۴	L <sub>1</sub> =۵۰ mm
۴۱۵۹,۹۲	n=۶	
۴۰۰۴,۵۸	n=۲	
۴۰۰۵,۵۹	n=۴	L <sub>1</sub> =۶۰ mm
۴۰۰۶,۹۳	n=۶	
۳۶۹۱,۵۸	n=۲	
۳۶۸۷,۵۷	n=۴	L <sub>1</sub> =۸۰ mm
۳۶۸۷,۴۸	n=۶	
۴۳۱۰,۳۹	l <sub>1</sub> =۱۰ mm	
۴۳۲۴,۸۹	l <sub>1</sub> =۲۰ mm	
۴۳۳۶,۷	l <sub>1</sub> =۳۰ mm	
۴۳۱۲,۵۸	l <sub>1</sub> =۱۰ mm	n=۴
۴۳۳۰,۳۵	l <sub>1</sub> =۲۰ mm	
۴۳۴۵,۸۲	l <sub>1</sub> =۳۰ mm	
۴۳۱۲,۲۶	l <sub>1</sub> =۱۰ mm	n=۶
۴۳۳۷	l <sub>1</sub> =۲۰ mm	
۴۳۵۸,۶	l <sub>1</sub> =۳۰ mm	

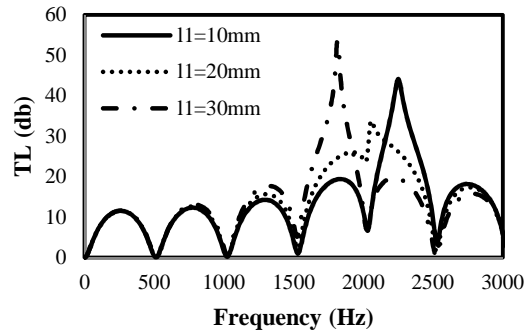
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار میرایی اکوستیکی مافلهای واکنشی هم‌مرکز و افت فشار ناشی از آن‌ها مطالعه شده است. برای این منظور ابتدا افت انتقال و افت فشار محفظه انبساط ساده بررسی شده است. سپس اثرات ناشی از تغییر پارامترهای هندسی مطالعه شده است. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که با ایجاد تشدیدگر در اثر امتداد دادن لوله به درون محفظه انبساط، در نمودار افت انتقال تشدیدهایی به وجود می‌آید که با افزایش طول تورفتگی، به دلیل افزایش حجم تشدیدگر، حداکثر کارایی میرایی در فرکانس‌های پایین‌تری رخ می‌دهد و لذا تعداد تشدیدها افزایش می‌یابد. می‌توان با تنظیم کردن طول تورفتگی برای رخداد تشدید در فرکانس(هایی) که در آن‌ها میرایی صفر است، در بازه فرکانس خاصی یک رفتار میرایی مطلوب را به دست آورد. به دلیل به تعویق افتادن انبساط ناگهانی و کاهش افت موضعی با امتداد دادن لوله، افت فشار با افزودن تورفتگی و افزایش آن کاهش می‌یابد که سودمند می‌باشد. به علاوه می‌توان نتیجه گرفت که اثرات ناشی از اضافه کردن سوراخ به تورفتگی‌ها و تغییرات تعداد و مکان آن‌ها می‌تواند رفتار میرایی اکوستیکی محفظه انبساط را تحت تاثیر قرار دهد درحالی‌که تاثیر چشم‌گیری روی افت فشار ندارد لذا این تغییرات به عنوان فرصتی برای بهبود میرایی اکوستیکی بسته به خواسته طراح می‌توانند در مطالعات به کار گرفته شوند.

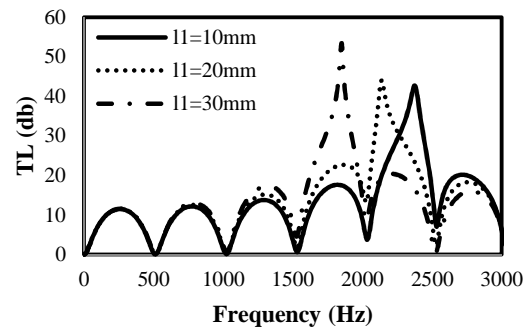
افت فشار ملاحظه نمی‌گردد چراکه تبادل جریان با سوراخ‌ها پایین می‌باشد که به این موضوع در مقاله لی و ایچ [۹] نیز اشاره شده است. موارد ذکر شده برای تمام طول تورفتگی‌های دیگر نیز صادق هستند. شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ و بخش دوم جدول ۵ اثر تغییر موقعیت سوراخ را برای مافلر با طول تورفتگی ۴۰mm نشان می‌دهند.



شکل ۱۰- افت انتقال مافلر با ۴۰mm تورفتگی، ۲ سوراخ و موقعیت مختلف سوراخ‌ها



شکل ۱۱- افت انتقال مافلر با ۴۰mm تورفتگی، ۴ سوراخ و موقعیت مختلف سوراخ‌ها



شکل ۱۲- افت انتقال مافلر با ۴۰mm تورفتگی، ۶ سوراخ و موقعیت مختلف سوراخ‌ها

همانطور که در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ و جدول ۵ مشخص است، با فاصله گرفتن بخش سوراخ‌دار از انتهای محفظه انبساط، حجم تشدیدگر ایجاد شده افزایش می‌یابد و تشدید و لذا اوج میرایی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر میل می‌کند درحالی‌که تغییر موقعیت سوراخ‌ها تاثیر زیادی روی افت فشار ندارد. این نتایج برای تمامی طول‌های تورفتگی دیگر نیز صدق می‌کند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر پارامترهای هندسی مطالعه شده در این مقاله بدون نیاز به تغییرات هندسی اساسی، می‌توان مافلهایی طراحی کرد که دارای رفتار میرایی اکوستیکی خوب در بازه فرکانسی مورد

- Loss, 166<sup>th</sup> Meeting of the acoustical society of America, California, 2013.
- [13] Yu X. and Cheng L., Duct Noise Attenuation Using Reactive Silencer with Various Internal Configurations, *J Sound Vib*, Vol. 335, pp. 229-244, 2015.
- [14] Wilcox D. C., *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., California, 1993.
- [15] Wang C. N., A Numerical Scheme for the Analysis of Perforated Intruding Tube Muffler Components, *Appl Acoust*, Vol. 44, pp. 275-286, 1995.
- [16] Potente and Daniel, General Design Principles for an Automotive Muffler. *Proceedings of Acoustics*, Busselton, 2005.
- [1] Munjal M. L., *Acoustic of Ducts and Mufflers*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1987.
- [2] Barron R. F., *Industrial Noise Control and Acoustics*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.
- [3] Nakara B. C., Sa'id W. K. and Nassir A., Investigations on Mufflers for Internal Combustion Engines, *Appl Acoust*, Vol. 14, pp. 135-145, 1981.
- [4] Peat K. S., A Numerical Decoupling Analysis of Perforated Pipe Silencer Elements, *J Sound Vib*, Vol. 123, pp. 199-212, 1988.
- [5] Selamat A. and Ji Z. L., Acoustic Attenuation Performance of Circular Expansion Chambers with Extended Inlet/Outlet, *J Sound Vib*, Vol. 223, pp. 197-212, 1999.
- [6] Gerjes S. N. Y., Jordan R., Thieme F. A., Bento Coelho J. L. and Arenas J. P., Muffler Modeling by Transfer Matrix Method and Experimental Verification, *J Braz Soc Mech Sci*, Vol. XXVII, pp. 132-140, 2005.
- [7] Ji Z. L., Acoustic Attenuation Performance Analysis of Multi-Chamber Reactive Silencers, *J Sound Vib*, vol. 283, pp. 459-466, 2005.
- [8] Razavi S. E., Azhadarzadeh M. and Harsini B., Noise Reduction in Expansion Chambers of IC Engines by Unsteady Flow Analysis, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 31-45, 2007.
- [9] Lee S. H. and Ih J. G., Effect of Non-Uniform Perforation in the Long Concentric Resonator on Transmission Loss and Back Pressure, *J Sound Vib*, vol. 311, pp. 280-296, 2008.
- [10] Yasuda T., Wu C., Nakagawa N. and Nagamura K., Predictions and Experimental Studies of the Tail Pipe Noise of an Automotive Muffler Using a One Dimensional CFD Model, *Appl Acoust*, Vol. 71, pp. 701-707, 2010.
- [11] Mimani A. and Munjal M. L., 3-D Acoustic Analysis of Elliptical Chamber Mufflers Having an End-Inlet and a Side-Outlet: An Impedance Matrix Approach, *Wave Motion*, Vol. 49, pp. 271-295, 2012.
- [12] Xiang L., Zuo S., Zhang M., Hu J. and Long G., Study of Micro-Perforated Tube Mufflers With Adjustable Transmission