

مدلسازی انشعاب چند شاخه‌ای و منبع تحریک آکوستیکی در بالادست خفه‌کن‌های موتورهای احتراق داخلی*

علی فائزیان^(۱) محمدرضا مدرس رضوی^(۲) آنجلو اونوراتی^(۳)

چکیده در این مقاله شرط مرزی در انشعاب چند شاخه‌ای خفه‌کن‌های موتور با دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار برای حالت جریان اصلی صفر مدل‌سازی می‌شود. از روش فشار ثابت با دو مدل بنسون و کوربرن در خفه‌کن‌های با لوله سوراخدار استفاده شده و نشان داده می‌شود که در خفه‌کن‌های با بیش از یک لوله سوراخدار، برنامه با روش بنسون قابل اجرا است. منبع تحریک در شرط مرزی بالادست با دو روش تحریک همساز ساده و تحریک اغتشاش سفید (white noise) مدل‌سازی می‌گردد. با استفاده از مقایسه نتایج حل عددی با تحریک اغتشاش سفید، نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده، حل تئوری خطی و نتایج تجربی نشان داده می‌شود که تحریک اغتشاش سفید در تحلیل خفه‌کن‌های پیچیده از دقت کافی برخوردار است و زمان اجرای آن نسبت به روش عددی با تحریک همساز ساده بسیار کوتاهتر می‌باشد. **واژه‌های کلیدی** انشعاب، تحریک، همساز ساده، اغتشاش سفید، آکوستیک، خفه‌کن.

Modeling of N-Branch Junctions and Upstream Acoustical Excitation in the Silencers of Internal Combustion Engines

A. faezian

M.R. Modarres Razavi

A. Onorati

Abstract In this work, boundary conditions of T-junctions in engine silencers are modeled by constant pressure model (CPM) and pressure loss model (PLM). The mean flow velocity through the ducts is zero. Two Benson CPM and Corberan CPM approaches are employed in perforate silencers simulation. For the silencer with more than one perforated pipe which appears as N-branch junctions, it is possible to apply the Benson CPM approach. The upstream excitation as a boundary condition is modeled by two single pure tone (harmonic) and white noise perturbations. It is shown that white noise perturbation bring enough accuracy. On the other hand-it spends much shorter time than single pure tone perturbation.

Key Words Branch, Excitation, Pure Tone, White Noise, Acoustic, Silencer.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۲/۵/۵ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۲/۱۰/۱۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

(۲) دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

(۳) استاد، پلی تکنیک میلان، دپارتمان انرژی

مقدمه

یکی از دلایل گسترش و پیشرفت موتورهای احتراق داخلی در چند دهه گذشته توجه خاصی است که به تحلیل معادلات جریان تراکم پذیر غیردائم در سیستم‌های ورودی و خروجی آنها شده است. جریان گاز در سیستم ورودی و خروجی موتور بر عملکرد موتور و ایجاد صدای نامطلوب در آن اثر می‌گذارد. تاکنون برای کاهش افت فشار و کاهش صدای نامطلوب مربوطه تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. از جمله این تلاشها مدلسازی مناسب هندسه و شرایط مرزی آنها می‌باشد. جریان وانتشار امواج در مانیفولدهای موتور واقعا یک پدیده چند بعدی است. فرض یک بعدی جریان با توجه به هندسه خاص مانیفولدها یک نوع مبارزه با واقعیت است. این موضوع در محل اتصالات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. اما با اعمال اصلاحاتی می‌توان از مزایای روشهای یک بعدی بهره گرفت. اثرات چند بعدی بودن جریان در اتصالات با اصلاح طول لوله‌های منتهی به محل اتصال به‌طور غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود. معمولاً طول اصلاح شده به پارامترهای هندسی و موج منتشر شده بستگی دارد.

مهم‌ترین موضوعی که در مدلسازی اجزاء یک سیستم لوله مطرح است شرایط مرزی انتهایی و محل اتصال اجزاء با یکدیگر است. از این‌رو، در پژوهش حاضر، تنها شرط مرزی در انشعاب چند شاخه و انتهای باز بالادست مورد توجه و مطالعه قرار می‌گیرد. اغلب روش فشار ثابت برای سرعت‌های جریان نسبتاً کم در سیستم‌های ورودی و خروجی موتورهای احتراق داخلی قابل قبول است در صورتی که اگر سرعت‌های جریان زیاد باشد در نظر گرفتن افت فشار در اتصالات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، چرا که این کمیت‌ها در بازده حجمی موتور موثر می‌باشند. برای تحلیل انشعاب چند لوله‌ای دو روش فشار ثابت و افت فشار مطرح است. در مدل فشار ثابت بنسون (Benson)، تراز

انرژی جریان خروجی برابر متوسط تراز انرژی جریان‌های ورودی قرار می‌گیرد [1,2]. کریبرن (Corberan) در مدلسازی انشعاب چند شاخه با استفاده از روش فشار ثابت آنالیزی سکون همه جریان‌های خروجی را یکسان در نظر گرفت. او در بررسی انشعاب‌های یک موتور چهار سیلندر نشان داده که نتایج کارش از نتایج روش بنسون به واقعیت نزدیکتر است [3]. چپمن (Chapman) و همکارانش انشعاب‌ها را حجم‌های کوچکی در نظر گرفتند که معادلات بقاء انرژی و جرم برای آنها اعمال می‌گردد. پیرسون (Pearson) روش فشار ثابت بنسون را بکار برد و مانند چپمن محل انشعاب را انباره‌ای با حجم کوچک در نظر گرفت. او با معرفی یک ضریب تخلیه برای لوله‌هایی که جریان آنها به انباره وارد می‌شود، روش فشار ثابت بنسون را با در نظر گرفتن افت فشار ارتقاء بخشید. عیب اصلی روش پیرسون نامشخص بودن ضرایب تخلیه مورد نیاز است. تاکیزاوا (Takizawa) و همکارانش افت فشاری متناسب با توان دوم عدد ماخ جریان‌های ورودی به انشعاب را منظور کردند. از امتیازات مهم مدلسازی‌های آنها عدم نیاز به اندازه‌گیری جریان می‌باشد [1].

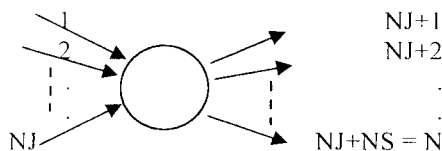
در همه روش‌های عددی اعمال شرایط مرزی بر مبنای روش مشخصه‌ها قرار دارد. به‌طور کلی دو نوع مرز وجود دارد. یکی مرزی که با محیط ارتباط دارد و دیگری مرزی که دو یا چند جزء سیستم - لوله با هم ارتباط دارند. محل اتصال دو جزء ممکن است همراه با تغییر سطح مقطع باشد. ممکن است چند جزء به هم متصل شوند که در این صورت آن را انشعاب چند شاخه‌ای (چند راهه) می‌نامند. مقدار مشخصه‌ها در مرزها با توجه به جهت مشخصه‌ها تعیین می‌گردد. در مرزها جریان شبه‌دائم در نظر گرفته می‌شود به‌طوری که در هر قدم زمانی در مرزها از معادلات مربوط به جریان دائم استفاده می‌شود.

که در آن :

$$G = \frac{1}{2} \rho u |u| C_f \frac{4}{d}, \quad q = \frac{4St.uC_w(T_w - T_f)}{d} \quad (2)$$

برای شبیه سازی جریان یک بعدی غیر دائم و تراکم پذیر در خفه کن ها از روش های عددی دو مرحله ای یک بعدی مک کورمک (MacCormack) و لکس - وندروف (Lax-Wendrof) همراه با نوسانگیر FCT استفاده شده است. برای شرایط حاکم بر محفظه و داخل لوله سوراخدار هیچ فرض ساده کننده ای در نظر گرفته نشده است. مدلسازی آکوستیکی خفه کن بر اساس مدل سیستم - لوله متناسب با فرض یک بعدی بودن جریان انجام گرفته است [5 و 7].

(الف) مدلسازی انشعاب چند شاخه. ممکن است در قسمت های مختلف مانیفولدهای موتور احتراق داخلی انشعاب چند شاخه وجود داشته باشد. در این مقاله بیشتر به انشعاب های T شکلی که در خفه کن های با لوله سوراخدار ظاهر می شود توجه شده است. سوراخ ها به عنوان لوله کوتاه و محل اتصال آنها با محفظه و داخل لوله اتصال T و جریان عبوری از سوراخ ها مانند بقیه اجزاء غیر دائم تراکم پذیر در نظر گرفته می شود. همانطور که در شکل (1) نشان داده شده ارتباط بین سوراخ و محفظه و سوراخ و داخل لوله از طریق انشعاب T برقرار می شود. برای حل جریان در انشعاب از دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار استفاده می شود.



شکل 1 جریان های ورودی و خروجی به یک انشعاب

در شرایط مرزی بالا دست، یک منبع تحریک فشار موج به سیستم می تواند به خدمت گرفته شود. مورل (Morel) و همکارانش [4] و اونوراتی (Onorati) [5] خفه کن صوتی را به عنوان یک جزء مستقل وجدای موتور در نظر گرفتند، اگرچه در عمل یک خفه کن صوتی با منبع صوت (موتور) جفت می شود. آنها با روش تجربی یا عددی خفه کن را در حوزه فرکانسی بررسی کردند. اونوراتی و همکارانش [5، 6] با روش عددی، منبع تحریک بالادست را با نوسانات همساز (هارمونیک) مدلسازی کردند.

در این پژوهش اتصالات سه شاخه ای بویژه اتصالاتی که در مدلسازی هندسی خفه کن های با لوله سوراخدار بکار می روند، با دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار مدلسازی می شود و مزایا و محدودیتهای روش فشار ثابت بنسون و کریون نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در ضمن برای مدل سازی اغتشاش در یک منبع واقعی از دو روش اغتشاش همساز ساده و اغتشاش سفید (white noise) به عنوان شرط مرزی بالادست در حل معادلات دینامیک گاز برای جریان اصلی صفر استفاده می گردد.

روش های مدلسازی

در خفه کن، جریان یک بعدی در نظر گرفته می شود. دستگاه معادلات حاکم بر جریان یک بعدی تراکم پذیر غیر دائم شامل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی به شکل زیر می باشد [1].

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F(W)}{\partial x} + C(W) = 0 \quad (1)$$

$$W = \begin{bmatrix} \rho F \\ \rho u F \\ \rho e_0 F \end{bmatrix}, \quad F(W) = \begin{bmatrix} \rho u F \\ (\rho u^2 + p) F \\ \rho u e_0 F \end{bmatrix},$$

$$C(W) = \begin{bmatrix} 0 \\ -p \frac{dF}{dx} + \rho GF \\ -\rho q F \end{bmatrix}$$

بنسون مدل فشار ثابت خود را برای جریان همونتروییک توسعه داد. این مدل برای جریان غیرهمونتروییک نیز قابل استفاده است. برای در نظر گرفتن تغییرات آنتروپی از متغیرهای ستاره‌دار در معادلات استفاده می‌شود. در جریان همونتروییک سرعت بدون بعد صوت A^* با فشار p مطابق معادله (۳) رابطه دارند. بنابراین سرعت صوت نیز در انتهای لوله زام ثابت است یعنی سرعت صوت در انتهای همه N لوله منتهی به محل انشعاب برابر می‌باشد. اگر از متغیرهای ریمانی برای معادله پیوستگی استفاده شود معادله پیوستگی برای اتصال N لوله به شکل رابطه (۴) بیان می‌گردد [1]:

$$A_j^* = \left(\frac{p_j}{p_{ref}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \quad (3)$$

$$A_j^* = \frac{\sum_1^N \left(\frac{\lambda_{in,j}^* F_j}{A_{A_j}} \right)}{\sum_1^N \left(\frac{F_j}{A_{A_j}} \right)} = \left(\frac{p_j}{p_{ref}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \quad (4)$$

از رابطه فوق مقدار فشار در محل اتصال بدست می‌آید. بنسون برای استخراج معادلات مورد نیاز برای حل جریان در محل انشعاب، برای بدست آوردن تراز آنتروپی انتهای لوله‌های منتهی به اتصال فرضیات زیر را در نظر گرفت:

۱- در لوله‌هایی که جریان آنها در محل اتصال به هم می‌رسند (Joining flow)، و یا به عبارت دیگر سرعت جریان U^* (رابطه ۳) در آنها مثبت می‌باشد، تراز آنتروپی آنها در محل اتصال تغییر نمی‌کند. بنابراین تراز آنتروپی در گره مرزی آنها معلوم و برابر با تراز آنتروپی گره قبلی است.

۲- در لوله‌هایی که جریان آنها در محل اتصال از هم دور می‌شوند (Separating flow) یا به عبارت دیگر سرعت جریان U^* در آنها منفی می‌باشد تراز آنتروپی هر لوله در محل اتصال برابر با متوسط وزنی ترازهای

(الف- ۱) روش فشار ثابت. در این روش فرض می‌شود فشار استاتیکی در انتهای لوله‌هایی که به محل انشعاب ختم می‌شوند، یکسان باشد. این فرض بر پایه مشاهدات لیست (List) و ریسل (Reyl) استوار است [1]. آنها نشان دادند که برای جریان با موج کوچک می‌توان از افت فشار در محل اتصال لوله‌ها چشم پوشی نمود. مشخصه‌های چنین اتصالاتی، به‌طور کلی با سطوح هندسی آن بیان می‌گردد. بنابراین لازم نیست جریان در محل اتصال اندازه‌گیری شود. این امتیاز بزرگی است چرا که اندازه‌گیری جریان وقت گیر و پرهزینه است. امتیاز بزرگ دیگر روش فشار ثابت محدود نبودن تعداد لوله‌هایی است که به هم وصل می‌شوند.

مدل‌سازی انشعاب چند شاخه با روش فشار ثابت

بنسون. بنسون فرض کرد حجم اتصال (حجم محل انشعاب) در مقایسه با حجم لوله کوچک و جریان در آن شبه دائم باشد. در این مدل فشار انتهایی همه لوله‌هایی که به محل انشعاب منتهی می‌شوند یکسان است. مطابق شکل (۱) لوله‌هایی که جریان آنها به هم می‌رسد از ۱ تا NJ و لوله‌هایی که جریان در آنها جدا می‌شود از $(NJ+1)$ تا $(NJ+NS = N)$ شماره گذاری می‌شوند. تعیین کمیت‌های دما، فشار و سرعت در همه لوله‌های منتهی به انشعاب خواسته‌های مسئله است. بنابراین تعداد مجهولات $3N$ تا می‌شود. معادلات حاکم شامل دو معادله پیوستگی و بقاء جرم، N معادله بیان کننده مشخصه ریمانی (نزدیک شونده) انتهای هر لوله و NJ رابطه یا کمیت بیان کننده آنتروپی جریان‌های ورودی می‌باشند که جمعا $N+NJ+2$ معادله یا رابطه می‌شود. از مقایسه تعداد مجهولات و معادلات مشخص می‌شود که $N+NS-2$ رابطه دیگر برای تحلیل محل انشعاب لازم است. از فرض یکسان بودن فشار لوله‌ها در محل منتهی به انشعاب، N رابطه بدست می‌آید که $N-1$ رابطه آن مستقل می‌باشد. هنوز به $NS-1$ رابطه دیگر مورد نیاز است.

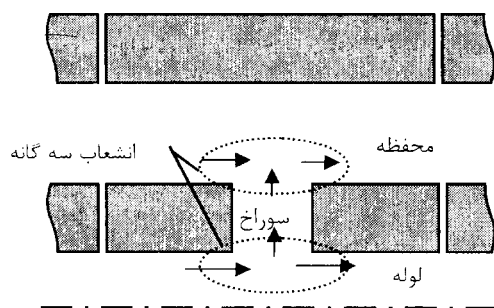
به ویژه اگر سرعت و تغییر جهت جریان کم و کوچک باشد. اگر اطلاعات کافی افت فشار در محل انشعاب در دسترس نباشد استفاده از روش فشار ثابت توصیه می‌گردد [1,2].

در یک لوله سوراخدار (شکل ۲- الف)، شرایط مرزی و ابعاد هندسی سوراخ‌هایی که بر محیط یک دایره واقعند یکسان می‌باشد. این سوراخ‌ها یک گروه سوراخ نامیده می‌شود. در حالتی که یکی از انشعاب‌های اتصال سه راهه یک گروه سوراخ باشد و هر گروه سوراخ تعداد n سوراخ داشته باشد، رابطه (۴) به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$A_{A_1}^* = \frac{\frac{\lambda_{in_1}^*}{A_{A_1}} F_1 + \frac{\lambda_{in_2}^*}{A_{A_2}} F_2 + n_{holes} \frac{\lambda_{in_3}^*}{A_{A_3}} F_3}{\frac{F_1}{A_{A_1}} + \frac{F_2}{A_{A_2}} + n_{holes} \frac{F_3}{A_{A_3}}} \quad (V)$$

3 تا $J = 0$ نشانگر سه مقطع از اتصال سه راهه است. شماره‌های ۱ و ۲ مربوط به دو جزء مجاور از محفظه یا لوله سوراخدار و شماره ۳ مربوط به یک گروه سوراخ می‌باشد (شکل‌های ۲- ب و ۳). معادله پیوستگی برای این اتصال سه راهه بدین شکل خواهد شد:

$$\frac{(A_1^*)^{k-1}}{A_{A_1}} U_1^* F_1 + \frac{(A_2^*)^{k-1}}{A_{A_2}} U_2^* F_2 + n_{holes} \frac{(A_3^*)^{k-1}}{A_{A_3}} U_3^* F_3 = 0 \quad (A)$$



(ب)

آنتروپی جریان‌هایی است که در محل اتصال به هم ملحق می‌شوند.

سرعت بی بعد جریان به شکل زیر با مشخصه نزدیک شونده ریمانی و سرعت صوت ارتباط دارد.

$$U_j^* = \frac{2}{k-1} (\lambda_{in_j}^* - A_j^*) \quad (5)$$

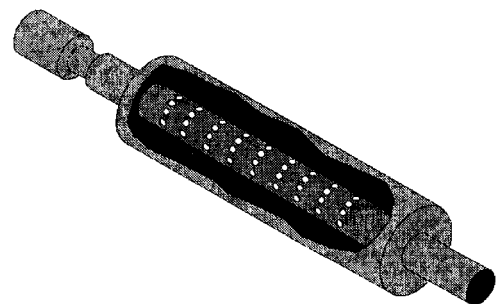
تراز آنتروپی انتهایی لوله‌هایی که جریان آنها در محل انشعاب به هم می‌رسد یعنی $A_{A_j}^*$ لوله‌های شماره ۱ تا NJ با تراز آنتروپی گره قبل از انتهای آنها یکسان در نظر گرفته می‌شود.

تراز آنتروپی لوله‌هایی که جریان آنها از محل انشعاب جدا می‌شود:

$$A_{A_1} = \frac{\sum_1^{NJ} (U_i^* F_i A_{A_i})}{\sum_1^{NJ} (U_i^* F_i)} ; j = (NJ+1) \text{ to } N \quad (6)$$

یعنی تراز آنتروپی انتهای همه لوله‌هایی که جریان از محل انشعاب بداخل آنها می‌باشد، یکسان است. $NS-1$ رابطه مستقل از رابطه فوق استخراج می‌شود. بنابراین مسئله یک حل بسته‌ای دارد.

مقایسه نتایج مدل فشار ثابت بنسون با نتایج تجربی نشان دهنده قابل قبول بودن این مدل است؛

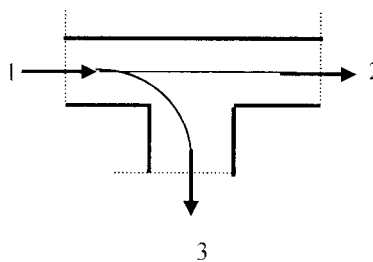


(الف)

شکل ۲ خفه‌کن با لوله سوراخدار؛ (الف)، طر حواره؛ (ب)، ارتباط بین سوراخ و محفظه و بین سوراخ و داخل لوله

Basic flow type	Flow type	U_1	u_2	u_3
A	I	+	-	-
	II	-	+	-
B	III	-	-	+
C	IV	-	+	+
	V	+	-	+
D	VI	+	+	-

(ب)



(الف)

شکل ۳ جریان در انشعاب سه راهه T: (الف) الگوی جریان (ب) انواع جریان‌های الحاقی (A و B) و جدا شونده (C و D)

تراز متوسط جریان‌های ورودی است. این فرض بقاء آنروپی را القاء می‌کند. به طوری که رابطه (۶) را می‌توان به شکل زیر نوشت.

$$\sum_1^N (U_1^* F_j A_{A_j}) = 0 \quad (10)$$

از طرفی معادله موازنه انرژی بدین شکل است:

$$\sum_1^N \left(U_1^* F_j A_{A_j} (A_j^*)^{\frac{2}{k-1}} \left(A_j^{*2} + \frac{k-1}{2} U_j^{*2} \right) \right) = 0 \quad (11)$$

از مقایسه روابط (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که رابطه بقاء آنروپی مرتبه‌ای از رابطه بقاء انرژی است؛ بویژه در حالتی که سرعت بی بعد صوت A_j^* نزدیک ۱ و سرعت بی بعد جریان U_j^* کوچک باشد. وقتی دما و سرعت جریان گاز کم باشد رابطه بقاء انرژی به شکل رابطه بقاء آنروپی ساده می‌شود. اما اگر دما و سرعت جریان زیاد باشد یک ناپیوستگی در بقاء انرژی در محل انشعاب بوجود می‌آید.

کریون از روش بنسون ایده گرفت و دو روش فشار ثابت دیگر ارائه داد. در روش اول فرض کرد تراز آنروپی جریان‌های خروجی همانطور که در رابطه (۱۲) بیان شده، یکسان باشد و لزوماً برابر با متوسط آنروپی جریان‌های ورودی به محل انشعاب نمی‌باشد.

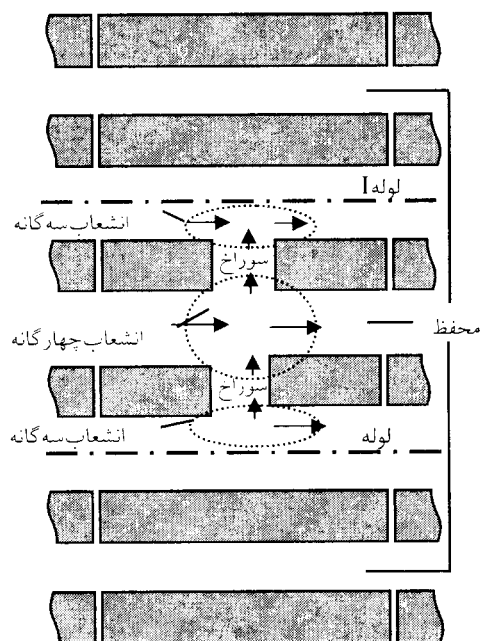
$$A_{A_i} = A_{A_j} \quad i \neq j \in \{(NJ+1) \text{ to } N\} \quad (12)$$

شکل (۴) نشان دهنده راه ارتباطی بین محفظه و لوله‌های سوراخدار در خفه‌کن با دو لوله سوراخدار است. ملاحظه می‌شود این ارتباط از طریق انشعاب‌های چهارگانه برقرار شده است. معادلات فوق در محل انشعاب چهارگانه نیز تعمیم می‌یابد. به عنوان مثال معادله پیوستگی به شکل زیر در می‌آید

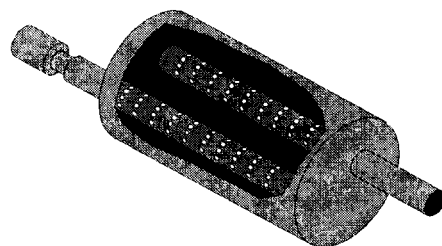
$$\begin{aligned} & \frac{(A_1^*)^2}{A_{A_1}} U_1^* F + \frac{(A_2^*)^2}{A_{A_2}} U_2^* F_2 \\ & + \left(n_{\text{holes}} \frac{(A_3^*)^2}{A_{A_3}} U_3^* F_3 \right)_{\text{hole of pipe I}} \\ & + \left(n_{\text{holes}} \frac{(A_3^*)^2}{A_{A_3}} U_3^* F_3 \right)_{\text{hole of pipe II}} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

به همین ترتیب برای انشعاب‌های چند شاخه در خفه‌کن‌های با چند لوله سوراخدار معادله پیوستگی قابل تعمیم خواهد بود.

(الف-۱-۲) مدلسازی انشعاب چند شاخه با روش فشار ثابت کریون. بر اساس فرض دوم روش بنسون تراز آنروپی همه جریان‌های خروجی یکسان و برابر



(ب)



(الف)

شکل ۴ خفه‌کن با دو لوله سوراخدار؛ (الف)، طرحواره. (ب)، مقطعی از خفه‌کن که ارتباط محفظه و سوراخ‌های دو لوله را با انشعاب چهارگانه نمایش می‌دهد

سرعت‌های جریان بالا نتایج روش آنتالپی کل یکسان بر روش دیگر ترجیح دارد [3].

(الف - ۲) روش اتلاف فشار بنسون. در اینجا انشعاب‌های سه شاخه‌ای T شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. انشعاب‌های چند شاخه‌ای نیز قابل ساده شدن به انشعاب دو و سه شاخه‌ای می‌باشند. استفاده از روش اتلاف فشار بنسون بر پایه فرضیات زیر قرار دارد:

۱- جریان در هر مقطع ورودی به محل انشعاب یک بعدی فرض می‌شود.

۲- فشار در انتهای دو لوله‌ای که جریان آنها در محل انشعاب به هم می‌رسند، برابر است.

با این فرضیات می‌توان از معادلات اندازه حرکت برای جریان‌هایی که به هم ملحق می‌شوند استفاده کرد. اما برای جریان‌هایی که از هم جدا می‌شوند نمی‌توان از

این فرض NS-1 رابطه مستقل مورد نیاز را در دسترس قرار می‌دهد. کربن این روش را روش آنتروپی یکسان (equal entropy) نامید. در روش دوم او آنتالپی کل جریان‌های خروجی را یکسان در نظر گرفت. یعنی جریان‌های ورودی به اتصال ابتدا کاملاً مخلوط می‌شوند و سپس محل اتصال را ترک می‌کنند.

$$A_{A_i}^2 \left(A_i^{*2} + \frac{k-1}{2} U_i^{*2} \right) = A_{A_j}^2 \left(A_j^{*2} + \frac{k-1}{2} U_j^{*2} \right)$$

$$i \neq j \in \{(NJ+1) \text{ to } N\} \quad (13)$$

این فرض نیز NS-1 رابطه مستقل مورد نیاز را در دسترس قرار می‌دهد. کربن این روش را روش آنتالپی کل یکسان (equal total enthalpy) نامید.

کربن نشان داد که هر دو روش او نسبتاً دقیق و به نتایج واقعی بسیار نزدیک است. البته در دماها و

حال لازم است روابط مربوط به اختلاف فشار بر حسب A^* و U^* نوشته شود. رابطه عمومی آن به شکل زیر در می‌آید.

$$\left(\frac{A_j^*}{A_1^*}\right)^{\frac{2k}{k-1}} + G_1 \left(\frac{A_j^*}{A_1^*}\right)^{\frac{2}{k-1}} - G_2 = 0 \quad j=2,3 \quad (20)$$

مقادیر G_1 و G_2 در نوع جریان A :

$$G_1 = C_1 k \left(\frac{U_2^*}{U_1^*}\right)^2 ; \quad G_2 = C_1 k \left(\frac{U_1^*}{U_1^*}\right)^2 + 1 \quad (21)$$

و مقادیر G_1 و G_2 در حالت‌های دیگر جریان نیز به‌طور مشابه بدست می‌آید [2]. اگر ΔA_N^* به شکل زیر تعریف شود.

$$\Delta A_j^* = A_j^* \left\{ 1 - \left(\frac{A_j^*}{A_1^*}\right) \right\} \quad j=2,3 \quad (22)$$

را می‌توان از رابطه (20) بدست آورد. جملات ΔA_2^* و ΔA_3^* نشان دهنده افت فشار از مسیر 1 به 2 و 1 به 3 هستند. معادله پیوستگی را می‌توان بر حسب A_1^* و جملات افت فشار ΔA_N^* بیان نمود.

$$\sum_{j=1}^3 \left(\frac{(A_1^* - \Delta A_j^*)^{\frac{2}{k-1}} (\lambda_{in,j}^* - A_1^* + \Delta A_j^*) F_j}{A_{A_j}} \right) = 0 \quad (23)$$

در اینجا $\Delta A_1^* = 0$ است و ΔA_2^* و ΔA_3^* را می‌توان از روابط (20) و (22) بدست آورد. با تغییر آنتروپی A_{A_j} در محل انشعاب متغیر ریمانی موج نزدیک شونده λ_{in} اصلاح می‌گردد. بنابراین:

$$\lambda_{in,jc} = \lambda_{in,jn} + \frac{A_j}{A_{A_jc}} (A_{A_jc} - A_{A_jn}) \quad (24)$$

و متغیر ریمانی λ_{out} :

$$\lambda_{out,j} = A_{A_jc} \left(A_j^* - \frac{k-1}{2} U_j^* \right) \quad j=1,2,3 \quad (25)$$

این معادلات استفاده نمود. بنسوزن برای برطرف کردن این مشکل پیشنهاد داده است از معادلات اندازه حرکت جریان دائم برای بیان اختلاف فشار بین جریان‌های ورودی و خروجی محل انشعاب و برای ضرایب افت فشار نیز از نتایج تجربی استفاده شود. در روش بنسوزن معادلات افت فشار و پیوستگی با هم ترکیب می‌شوند. معادله انرژی نیز برای دو دسته جریان‌های الحاقی و جدا شونده متفاوت است. الگوی جریان در انشعاب T شکل مطابق شکل (3) شش حالت و چهار نوع دارد. اگر معادلات اندازه حرکت در مسیر خطوط جریان در دو جهت افقی و عمودی نوشته شود معادلات اختلاف فشار جریان دائم نوع A به عنوان نمونه به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$p_1 - p_2 = C_1 (\rho_2 u_2^2 - \rho_1 u_1^2) \quad (14)$$

$$p_1 - p_3 = C_2 \rho_3 u_3^2 \quad (15)$$

مجموع انتالپی سکون در حالت‌های جریان‌های الحاقی صفر و انتالپی سکون حالت‌های جریان‌های جدا شونده در هر خط جریان ثابت می‌باشد. بنابراین در جریان‌های الحاقی:

$$\sum_{j=1}^3 (\dot{m} h_o)_j = \sum_{j=1}^3 (\rho u F h_o)_j = 0 \quad (16)$$

و در جریان‌های جدا شونده:

$$h_{o1} = h_{o2} = h_{o3} \quad (17)$$

انتالپی سکون را می‌توان بر حسب A^* ، U^* و A_N بیان کرد. با جایگزینی معادل انتالپی سکون در معادله انرژی مربوط به حالت الحاق جریان‌ها معادله انرژی به شکل زیر در می‌آید.

$$\sum_{j=1}^3 \left\{ A_{A_j} (A_j^*)^{\frac{2}{k-1}} U_j^* \left(A^{*2} + \frac{k-1}{2} U^{*2} \right) F_j \right\} = 0 \quad (18)$$

و در حالت جدا شدن جریان‌ها معادله انرژی بدین شکل در می‌آید:

$$\begin{aligned} A_{A_1}^2 \left(A_1^{*2} + \frac{k-1}{2} U_1^{*2} \right) &= A_{A_2}^2 \left(A_2^{*2} + \frac{k-1}{2} U_2^{*2} \right) \\ &= A_{A_3}^2 \left(A_3^{*2} + \frac{k-1}{2} U_3^{*2} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

بیشتر از فشار داخل و انتهای آن باشد. در این حالت منبع تحریک باید در یک فضای با فشار بالاتر قرار گیرد. اما در حالت جریان اصلی صفر می‌توان فشار متوسط بالادست را برابر با فشار محیط انتخاب کرد. در حالت ساده یک تحریک عددی در بالادست سیستم خفه کن وجود دارد که می‌تواند اغتشاش فشاری با دامنه کوچک و فرکانس ثابت، یعنی یک تحریک همساز ساده، تولید کند. مدل شبیه سازی حرکت موج قادر به محاسبه صدای ایجاد شده برای آن فرکانس می‌باشد. این فرایند را برای کل حوزه فرکانسی تحریک‌های همساز ساده با یک قدم فرکانسی ثابت می‌توان تکرار نمود.

(ب - ۱) **تحریک همساز ساده.** در این حالت منبع تحریک یک اغتشاش فشاری هارمونیک یا آهنگ خالص (single pure tone) با دامنه ثابت را القاء می‌کند. با این انتخاب پاسخ دینامیک گاز در خفه‌کن در مقابل یک اغتشاش تک فرکانسی محاسبه می‌شود. یک اغتشاش در ورودی لوله را می‌توان به شکل زیر بیان نمود و آن را به عنوان شرط مرزی بر اساس روش مشخصه‌ها اعمال کرد [8].

$$p = p_{\text{mean}} + \Delta p \sin(2\pi ft) \quad (26)$$

که f فرکانس و Δp دامنه فشار اغتشاشی (۰/۰۰۵ بار) است. فرض می‌شود فشار متوسط p_{mean} برابر با فشار مرجع p_{ref} باشد. معمولاً فشار مرجع برابر با فشار محیط انتخاب می‌گردد.

این روش برای نوسانات پی در پی فشار با دامنه ثابت و فرکانسهای مختلف (با گام داده شده از حداقل تا حداکثر) تکرار و محاسبه تابع انتقال یا منحنی میرایی سیستم امکان پذیر می‌شود. مثلاً در محدوده فرکانسی ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز با گام ۱۰ هرتز محاسبه گاز دینامیک

حل معادلات فوق پیچیده است چرا که حل آنها به جهت جریان بستگی دارد. معادلات انرژی بسته به نوع جریان الحاقی یا جدا شونده فرق می‌کنند. برای محاسبه تغییرات انرژی از معادله انرژی استفاده می‌شود. تراز انرژی در لوله‌ای که جریان‌ها در آن به هم می‌رسند از رابطه (۱۸) بدست می‌آید. تراز انرژی برای دو لوله‌ای که جریان از آنها به محل انشعاب وارد می‌شود از رابطه (۱۷) بدست می‌آید. حل معادلات (۱۸) و (۱۹) به شکل رو به جلو (Straight forward) است. معادله اختلاف فشار (۲۰) با روش تکرار نیوتن - رافسون حل می‌گردد. حل هنگامی کامل می‌شود که مقادیر افت فشار ΔA_2^* و ΔA_3^* نسبت به مقدار تکرار قبل کمتر از دقت حل تغییر کنند. بنسون و همکارانش ضرایب افت فشار را از نتایج تجربی جریان دائم برای جریان غیر دائم بکار بردند. شواهد آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این ضرایب به تراکم پذیری سیال بستگی دارد [2]. بنسون با مقایسه نتایج تحلیل خود با نتایج تجربی نشان داد که روش او از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است.

هر دو روش فشار و اتلاف فشار را می‌توان برای حالت خاص اتصال دوراهه بکار برد. البته شکل ظاهری معادلات متفاوت خواهد شد.

(ب) **منبع تحریک بالادست.** پارامترهای مشخصه اغتشاش، موقعیت منبع تحریک و نوع منبع تحریک با امواج فشاری مشخص می‌شوند. منبع تحریک فشاری را می‌توان به شکل اغتشاش نوسانی همساز بیان کرد که شامل دو کمیت اصلی مقدار متوسط فشار و دامنه اغتشاش می‌باشد. بسته به اینکه جریان اصلی گاز در خفه‌کن وجود داشته باشد یا خیر می‌توان وضعیت منبع تحریک را تعریف کرد. برای اینکه جریان اصلی غیر صفر بوجود آید لازم است فشار بالا دست خفه‌کن

دسترس قرار می‌دهد که در محدوده مقادیر فشار تجویز شده است.

(ج) **انتقال فوریه سریع**. منبع تحریک بالادست اغتشاشی است که در حوزه زمان تعریف شده است. برای بررسی خواص آکوستیکی خفه‌کن لازم است این تحریک از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال یابد. ابتدا شکل پیوسته تابع اولیه گسسته می‌شود. در این گسسته سازی طول زمانی پریودیک T ، تعداد اعداد گسسته N (توانی از ۲)، فرکانس بحرانی ω_s و محدوده طیف فرکانسی و نرخ نمونه برداری طیفی ($\Delta\omega$ و ω_{max}) در دقت و محدودیت کارائی انتقال فوریه اهمیت دارد. محدوده طیف فرکانس $0 - \omega_{max}$ همان فرکانس نایکوئیست است) و دقت $\Delta\omega$ به شکل زیر با یکدیگر و با طول زمان پریودیک ارتباط دارند.

$$\omega_{max} = \frac{\omega_s}{2} ; \Delta\omega = \frac{\omega_s}{N} = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{T} \right) \quad (28)$$

رابطه بین تابع اغتشاشی در حوزه زمانی و حوزه فرکانسی به شکل زیر قابل بیان است.

$$H_n(f_n) \equiv \sum_{k=0}^{N-1} h_k(t) W^{kn} ; W = e^{2\pi i / N} \quad (29)$$

انتقال فوریه گسسته تعداد N عدد مختلط از حوزه زمانی را به N عدد مختلط حوزه فرکانسی نگاشت می‌کند. شکل معکوس آن نیز به‌طور مشابه بیان می‌شود.

$$h_k(t) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} H_n(f_n) W^{kn} \quad (30)$$

یا

$$\begin{bmatrix} 1/2\cos(2\pi/T) + i1/2\sin(2\pi/T) \\ 1/2\cos(4\pi/T) + i1/2\sin(4\pi/T) \\ 1/2\cos(6\pi/T) + i1/2\sin(6\pi/T) \\ \vdots \\ 1/2\cos(2N\pi/T) + i1/2\sin(2N\pi/T) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ \vdots \\ H_N \end{Bmatrix}$$

$$\{h_n\} = [C]\{H_n\}; \{H_n\} = [C]^{-1}\{h_n\} \quad (31)$$

میدان حل ۱۹۹ بار انجام می‌گیرد. از مزایای این روش این است که به‌طور دقیق اصلاح انتهایی مناسب برای هر فرکانس محاسباتی انجام می‌گیرد، چرا که مقدار طول اصلاح انتهایی به فرکانس بستگی دارد. روش یاد شده دقیق است اما زمان اجرای برنامه بویژه در سیستم‌های پیچیده زیاد و قابل توجه می‌شود.

(ب-۲) **تحریک با اغتشاش سفید**. در این حالت منبع تحریکی که حرکت موج در خفه‌کن را القاء می‌کند یک اغتشاش فشاری با مجموعه‌ای از هارمونیک‌ها و فاز اتفاقی تولید می‌کند. در این روش در کل محدوده فرکانسی دامنه اغتشاش‌ها ثابت می‌ماند. با این انتخاب پاسخ دینامیک گاز برای همه فرکانسها یکبار محاسبه می‌شود و تابع انتقال سیستم بدست می‌آید. این روش خیلی سریعتر از روش هارمونیک است اما دقت کمتری دارد [8]. روش عددی تولید سیگنال اغتشاش نوسانی فشار بدین شکل است که N تا نوسان فشاری با دامنه ثابت Δp (0.0005 بار) و فرکانسهایی که مضرب فرکانس پایه f هستند با هم جمع می‌شوند.

$$p(t) = p_0 + \sum_{n=1}^N \Delta p \sin(2\pi nft + \phi_n) \quad (27)$$

p_0 مقداری ثابت و نمایانگر فشار متوسط محیط در بالادست جریان در سیستم-لوله است. به عنوان مثال اگر آزمایش در محدوده فرکانس ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز انجام گیرد و فرکانس پایه ۲۰ هرتز باشد، تعداد هارمونیکهای انتخابی $N = 100$ خواهد بود. در این روش نتایج فشار نوسانی $p(t)$ در محدوده انتخاب شده با گام‌های ۲۰ هرتز گسسته می‌شود. انتخاب مناسب فاز ϕ_n در رابطه فوق بسیار مهم است. از تولید N عدد اتفاقی k_n در محدوده صفر تا یک برای هر مؤلفه سینوسی از کل، فاز اتفاقی $\phi_n = 2\pi k_n$ بدست می‌آید. این روش یک سیگنال فشار $p(t)$ با فاز اتفاقی را در

می‌شود تا تمام محدوده فرکانسی را بپوشاند. مقدار L_p در بالا دست و پایین دست خفه کن با محاسبه ریشه متوسط مربعات (rms) سیگنال‌های فشار و سرعت، به ترتیب، بدست می‌آید. مقدار rms تابع نوسانی اصلی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$A_{rms} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{A_i}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (34)$$

A_i دامنه هارمونیک i ام سیگنال است.

انتهای باز خروجی سیستم کانال معمولاً با شرایط

مرزی ساده شبه دائمی مدل می‌شود. بر اساس فرض بنسون در حالت سرعت خروجی مادون صوت در "Vena contracta" فشار استاتیکی ثابت و برابر با فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. نتایج تجربی اعتبار این فرض را تأیید می‌کند، اگرچه دیویس (Davies) و یاسین (Yaseen) [10] نشان دادند که در جریان غیردائم تپش فشاری در انتهای باز اتفاق می‌افتد مگر اینکه تپش خیلی کوچک باشد تا فرض فشار محیط ثابت قابل قبول گردد. در حالت وارد شدن جریان به محیط، شرط مرزی انبساط بی‌درو آتروپی ثابت و جریان شبه دائم در نظر گرفته می‌شود تا رابطه بیضوی انرژی استخراج گردد. میدان صوتی تولید شده در اطراف سطح مقطع خروجی با تخمین تغییرات سرعت جریان قابل محاسبه است. لاندو (Landau) و لیشیتز (Lifshitz) نشان دادند میدان فشار $p_{(r,0)}$ در فاصله r از انتهای باز با مشتق سرعت نسبت به زمان، $d[u(t)]/dt$ ارتباط دارد که با رابطه زیر بیان می‌شود [11].

$$p(r,t) = \frac{\rho_0 F}{C \pi r} \cdot \frac{d}{dt} \left[u \left(t - \frac{r}{a_0} \right) \right] \quad (35)$$

ضریب C برای انتشار کروی برابر با ۴ و برای انتشار نیمه‌کروی برابر با ۲ می‌باشد. این رابطه تا زمانی اعتبار دارد که طول موج صوت λ خیلی بزرگتر از قطر انتهای لوله، d ، باشد. بلیر (Blair) و همکارانش [12,13] روش کلی‌تری را برای محاسبه میدان فشار صدا بر اساس اغتشاش انحصاری اولیه ارائه دادند. بالاخره در

دانیلسون (Danielson) و لانزوس (Lanczos) نشان دادند که انتقال فوریه گسسته به طول N را می‌توان بصورت جمع دو انتقال فوریه گسسته هرکدام به طول $N/2$ و توابع زوج و فرد نوشت.

$$H_n = \sum_{k=0}^{N-1} h_k W^{kn} = \sum_{k=0}^{N/2-1} h_k W^{(2k)n} + \sum_{k=0}^{N/2-1} h_k W^{(2k+1)n} = H_n^e + W^k H_n^o \quad (32)$$

H_n^e مولفه n ام انتقال فوریه به طول $N/2$ از مولفه‌های زوج h_k و H_n^o مولفه n ام انتقال فوریه به طول $N/2$ از مولفه‌های فرد h_k می‌باشند. این روش را می‌توان برای انتقال فوریه به طول $N/4$ مولفه‌های زوج و فرد ادامه داد. یعنی انتقال فوریه H_n^{eo} و H_n^{eo} را تعریف نمود و روش را ادامه داد تا به ساده‌ترین حالت رسید. این روش را انتقال سریع فوریه (Fast Fourier Transform or FFT) گویند. بهترین حالت این است که N توان صحیحی از عدد ۲ باشد [9].

(د) **کمیت‌های آکوستیکی.** در هر فرکانسی با محاسبه تغییرات فشار امکان تعیین تراز فشار صوتی در مقطع بالا دست صدا خفه کن ($L_{p,upstr}$) وجود دارد. همچنین میدان فشار صوت منتشر شده در فاصله مشخصی از انتهای باز و متناظر با آن تراز فشار صوتی در پایین دست ($L_{p,downstr}$) بدست می‌آید. فشار در انتهای باز سیستم برابر با فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای تعیین تراز فشار پایین دست نمی‌توان از فشار به عنوان متغیر استفاده کرد. با استفاده از تغییرات سرعت در پایین دست می‌توان تراز فشار صوتی را در آنجا محاسبه کرد. دامنه تابع انتقال بر حسب دسی بل (dB) برای هر فرکانسی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$TF = L_{p,upstr} - L_{p,downstr} \quad (33)$$

این رابطه بیانگر میرایی صوتی سیستم در یک فرکانس می‌باشد. روش کار با افزایش فرکانس تکرار

$$w_i = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} \left((p_x)_{rms} + (\rho_o a_o u_x)_{rms} \right) \right)^2 F \right]_{\text{downstream}} \quad (40)$$

دستگاه آزمایش

شکل (۵)، دستگاه آزمایش ساده در اتاق بدون انعکاس صدا را نشان می‌دهد. این دستگاه اغتشاش انتهای لوله را اندازه‌گیری و تابع انتقال انواع خفه‌کنها را محاسبه می‌کند. در حالت جریان اصلی صفر تحریک صوتی با بلندگو و در حالت جریان اصلی قوی با دامنه بالای تحریک به وسیله موتور تولید می‌شود. در حالت تحریک صوتی، بلندگو در یک جعبه عایق صوتی از محیط عایق شده و اغتشاش سفید تولید و به داخل دستگاه خفه‌کن منتشر می‌کند. دو میکروفون همراه محرک صوتی هستند. یک میکروفون فشار داخل لوله را اندازه‌گیری می‌کند (بالا دست) و میکروفون دیگر فشار میدانی به فاصله l از انتهای لوله انتهایی (پایین دست) را ثبت می‌کند. سیگنال‌ها از دو میکروفون توسط دو فونومتر (Phonometer) به تحلیلگر طیفی می‌رسد. در حالت تحریک موتور میکروفون بالا دست که برای تحریک صوتی استفاده می‌شود با یک پیزو-الکترونیک جایگزین می‌گردد. در هر دو حالت یک فرش جاذب صدا زیر انتهای باز قرار می‌گیرد تا اثر انعکاس زمین را کاهش دهد و انتشار به انتشار شبه کروی نزدیک شود. تحلیلگر طیفی تابع FFT از دو مسیر بالادست و پایین دست خفه‌کن سیگنال دریافت و تجزیه و تحلیل می‌نماید و با بدست آوردن اختلاف تراز فشار صوتی طیفی بین آنها تابع انتقال را بر حسب dB محاسبه می‌کند.

نتایج آزمایش ارائه شده در این مقاله برگرفته از آزمون‌هایی است که به وسیله نویسنده سوم و همکارانش در آزمایشگاه شرکت (Lafranconi Silencers) واقع در شهر Lecco ایتالیا انجام یافته است.

هر فرکانس، f_n ، تراز طیفی فشار انتهای لوله، L_p ، بر حسب فشار به شکل زیر بدست می‌آید.

$$L_p(f_n) = 20 \log \frac{P_{n(r.m.s)}}{2 \times 10^{-5}} \quad (36)$$

تابع انتقال رابطه (۳۳) به شکل زیر نیز بیان می‌گردد.

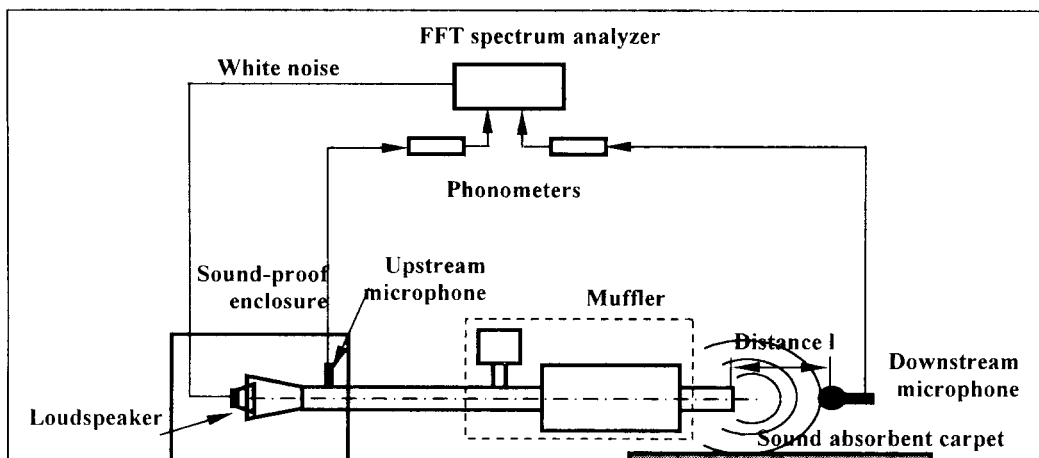
$$TF \equiv 20 \log \left| \frac{((p_x)_{rms})_{\text{upstream}}}{((p_x)_{rms})_{\text{downstream}}} \right| \quad (37)$$

اتلاف عبور (transmission loss) یک خفه‌کن صوتی بیان‌کننده اختلاف شار توان صوتی نزدیک شونده و عبور کننده از آن با فرض انتهای بدون انعکاس (anechoic) W می‌باشد و به شکل زیر بیان می‌گردد [14].

$$TL \equiv 10 \log \left| \frac{w_i}{w_t} \right| \quad (38)$$

در حل خطی جداکردن مولفه‌های نزدیک شونده و انعکاسی موج (فشار و یا سرعت) در بالادست و پایین دست امکانپذیر است. بنابراین فشار و سرعت موج نزدیک شونده و انعکاسی در بالا دست و پایین دست با استفاده از تئوری خطی بدست می‌آید. شرط مرزی انتهای باز در پایین دست بدون انعکاس است، یعنی موج قسمت انعکاسی ندارد. بنابراین، فشار و سرعت موج عبور کننده از پایین دست برابر با فشار و سرعت موج نزدیک شونده به آن است. به همین ترتیب شار توان صوتی نزدیک شونده به بالا دست محاسبه می‌شود. پس از ساده سازی روابط (۳۹) و (۴۰) حاصل می‌گردد. ملاحظه می‌شود در طرف دوم این روابط کمیت‌های محسوس محلی یا کمیت‌هایی که در معادلات بقاء بکار می‌روند، ظاهر می‌شوند.

$$w_i = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} \left((p_x)_{rms} + (\rho_o a_o u_x)_{rms} \right) \right)^2 F \right]_{\text{upstream}} \quad (39)$$



شکل ۵ دستگاه اندازه گیری تابع انتقال در یک خفه‌کن صوتی

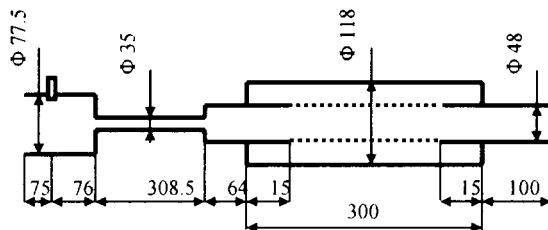
باشد آورده نشده است.

در این پژوهش مشخص شد که استفاده از روش فشار ثابت کربن در توصیف انشعاب‌های خفه‌کن با بیش از یک لوله سوراخدار میسر نیست و سبب واگرایی حل می‌گردد اما براحتی می‌توان از روش فشار ثابت بنسون استفاده نمود. شکل (۷-الف) نشان دهنده طرحواره و ابعاد هندسی و شکل (۷-ب) نمایانگر نتایج تخمینی و تجربی تابع انتقال یک خفه‌کن با دو لوله سوراخدار است (در شکل ۴ انشعاب‌های چهارگانه بین محفظه و دو لوله سوراخدار با بزرگنمایی نشان داده شده است). انشعاب‌های چندگانه این خفه‌کن با روش یاد شده فشار ثابت بنسون توصیف شده‌اند. اگر معادلات مربوط به دو روش یاد شده مرور و مقایسه شوند ملاحظه می‌شود در روش بنسون با مساوی قرار دادن تراز آنتروپی جریان‌های خروجی از انشعاب با متوسط تراز آنتروپی جریان‌های ورودی، در واقع از نوسانات بیش از حد نتایج محاسبات جلوگیری می‌کند و به نظر می‌رسد سبب پایداری بیشتر حل می‌شود. در شکل (۷-ب) ملاحظه می‌شود نتایج روش تخمینی بخوبی نتایج تجربی و فرکانس‌های تشدید

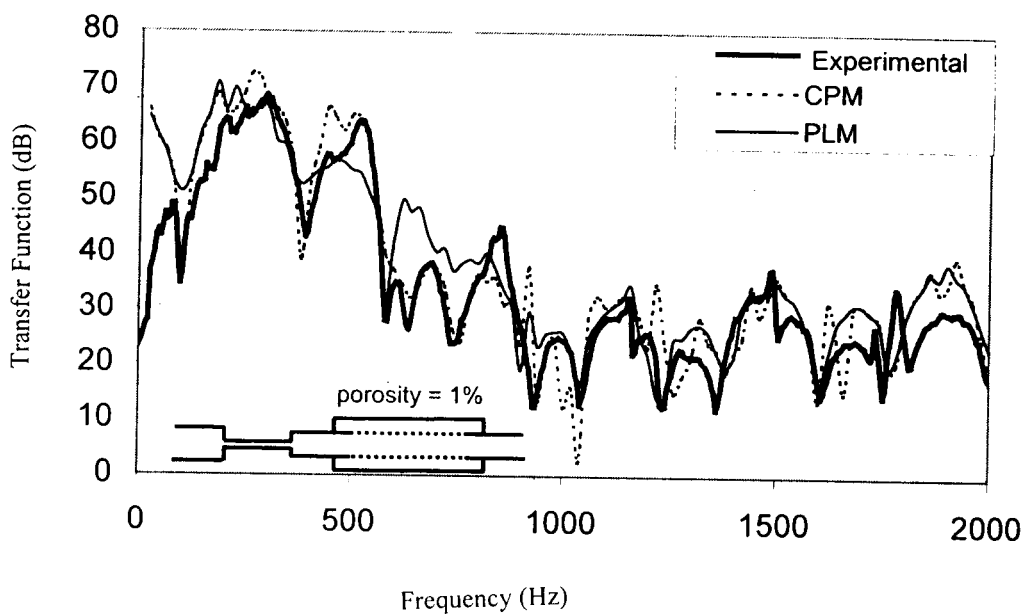
بررسی نتایج

در شکل (۶-الف) طرحواره و ابعاد هندسی یک خفه‌کن با لوله سوراخدار با تخلخل ۱ درصد نشان داده شده است. در شکل (۶-ب) نتایج تخمینی عددی با استفاده از روش‌های CPM و PLM بنسون در مدلسازی انشعاب‌های سه شاخه با نتایج تجربی این خفه‌کن مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود نتایج دو روش تخمینی با یکدیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد و هر دو به نتایج تجربی بسیار نزدیکند و فرکانس‌های تشدید خفه‌کن را بخوبی ردیابی کرده‌اند. در فرکانس‌های ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نتایج مربوط به روش CPM از نتایج مربوط به PLM بهتر است. وقتی جریان اصلی صفر باشد نوسانات سرعت محاسبه شده حول مقدار متوسط نسبت به مقدار متوسط قابل توجه و حتی ممکن است بزرگتر باشد. اتلاف حاصل از این مقادیر سرعت در میدان حل اتلاف مصنوعی القاء می‌نماید و سبب فاصله گرفتن نتایج از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌شود.

روش‌های فشار ثابت بنسون و کربن در حل مسائل مشابه بکار برده شده‌اند. بدلیل اینکه تفاوت نتایج بسیار ناچیز می‌باشد و منحنی‌های آنها از یکدیگر قابل تشخیص نیستند شکلی که نمایانگر مقایسه دو روش



(الف)

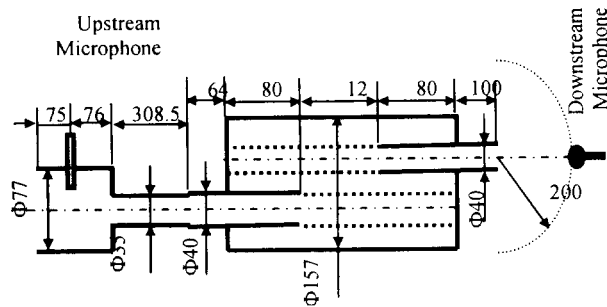


(ب)

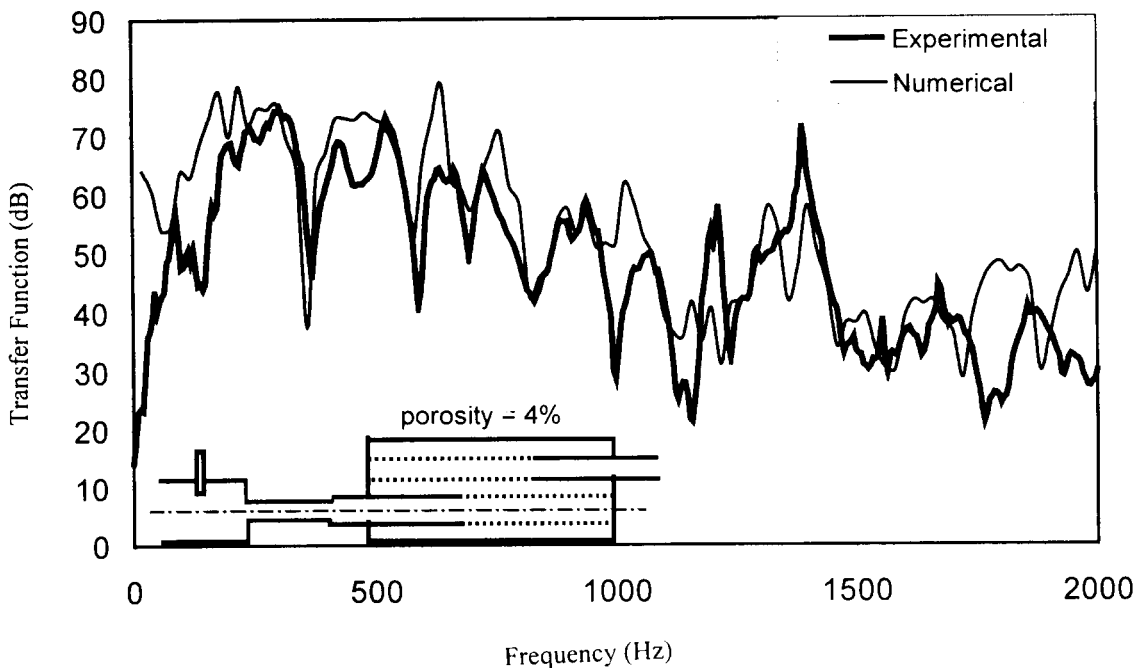
شکل ۶ خفه‌کن با لوله سوراخدار؛ (الف)، ابعاد هندسی (طرحواره شکل ۲-الف)؛ (ب)، مقایسه نتایج حل با استفاده از مدلسازی انشعاب T با دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار بنسون با نتایج آزمایشگاهی (از تحریک اغتشاش سفید استفاده شده است)

بالادست خفه‌کن است. در روش تحریک اغتشاش سفید این محدودیت وجود دارد که نمی‌توان طول اصلاح انتهایی را به شکل تابعی از فرکانس بیان نمود [۶].

خفه‌کن را دنبال و ردیابی می‌کند. در فرکانس‌های بالاتر از ۱۷۰۰ هرتز نتایج تخمینی دقت خوبی ندارد. این خطا به دلیل استفاده از اغتشاش سفید در تحریک

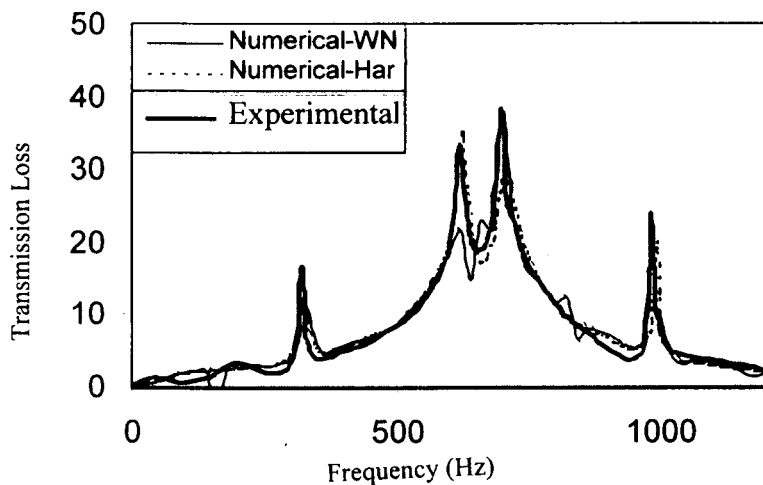


(الف)

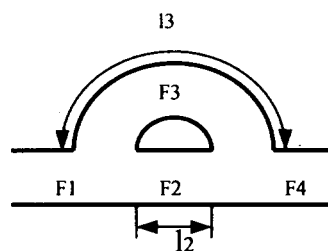


(ب)

شکل ۷ خفه‌کن با لوله سوراخدار؛ (الف)، ابعاد هندسی (طرحواره شکل ۴)؛ (ب)، تابع انتقال در خفه‌کن با دولوله سوراخدار با استفاده از روش فشار ثابت بنسون در انشعابهای چندگانه (از تحریک اغتشاش سفید استفاده شده است)



(ب)



(الف)

شکل ۸ لوله Herschel-Quinke :

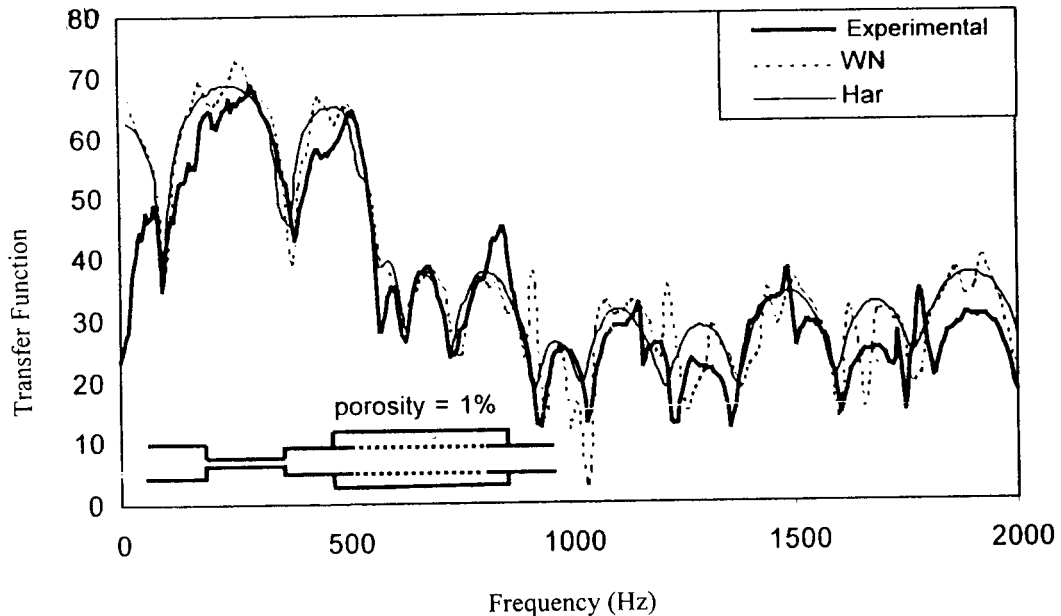
(الف)، طرحواره با مشخصات $d1 = d2 = 4.859$, $d3 = 4.674$ و $L2 = 39.85$ $L3 = 65.5$ cm

(ب)، مقایسه نتایج حل تئوری خطی با حل عددی با تحریک همساز ساده و اغتشاش سفید

همساز ساده و اغتشاش سفید با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود حل عددی با هر دو روش تحریک فرکانسهای تشدید را بخوبی ردیابی می‌کند و مقادیر آنها به نتایج تجربی بسیار نزدیک است، اما زمان محاسبات مدل سیستم - لوله این خفه‌کن با ۳۵ جزء (لوله) با تحریک اغتشاش سفید ۲ دقیقه و با تحریک همساز ساده ۶۶ دقیقه به طول انجامیده است. دیده می‌شود که نتایج مربوط به تحریک اغتشاش سفید حول نتایج تجربی پرشهایی دارد. با توجه به اینکه دقت تحریک اغتشاش سفید به عوامل محدوده فرکانسی، دقت محاسبات، طول زمان نمونه برداری و دقت الگوریتم FFT و غیره بستگی دارد، انتظار می‌رود در آینده بتوان به دقت بیشتر این روش تحریک دست یافت.

در شکل (۸) طرحواره و نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده و اغتشاش سفید در لوله هرشل - کوئینک (Herschel-Quinke) نشان داده شده و نتایج حل عددی با نتایج حل تئوری خطی آن مقایسه گردیده است. ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده بر حل تئوری خطی منطبق است و نتایج حل عددی با تحریک اغتشاش سفید فرکانسهای تشدید را بخوبی ردیابی کرده است اما، مقادیر آن در اطراف نتایج حل خطی نوسان می‌کند. لوله هرشل - کوئینک یک خفه‌کن بسیار ساده است و زمان محاسبات مربوط به آن با هر دو روش تحریک کوتاه می‌باشد. بنابراین با توجه به دقت نتایج استفاده از روش همساز ساده ترجیح داده می‌شود.

شکل (۹) نتایج حل عددی یک خفه‌کن لوله سوراخدار با ابعاد هندسی شکل (۶- الف) و تخلخل ۱ درصد را نشان می‌دهد. در این شکل دو حالت تحریک



شکل ۹ مقایسه نتایج حل خفه‌کن با لوله سوراخدار با استفاده از دو نوع تحریک همساز ساده و اغتشاش سفید و با نتایج تجربی (از مدل فشار ثابت بنسون در انشعاب‌های سه شاخه استفاده شده است)

از فرکانس تعریف می‌شود اما در حل عددی با تحریک اغتشاش سفید این امکان وجود ندارد و به عبارت دیگر، طول اصلاحی تابع فرکانسهای طیفی نمی‌باشد. به همین دلیل نتایج حل عددی با تحریک اغتشاش سفید دقت کمتری نسبت به نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده دارد.

۴- محاسبه سیستم‌های پیچیده مانند خفه‌کن‌های با لوله سوراخدار که دارای اجزاء زیادی هستند، با استفاده از حل عددی با تحریک هارمونیک بسیار وقتگیر است. در حالی که در حل عددی با تحریک اغتشاش سفید وقت بسیار کمتری صرف می‌شود و نتایج آن دقت قابل قبولی دارد.

۵- به نظر می‌رسد دقت روش تحریک اغتشاش سفید قابل ارتقاء باشد.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- برای توصیف انشعاب‌های سه‌گانه در حالت جریان اصلی صفر روش فشار ثابت (CPM) به روش اتلاف فشار (PLM) ترجیح داده می‌شود.
- ۲- روش فشار ثابت بنسون در توصیف انشعاب‌های چندگانه محدودیتی ندارد و می‌توان از آن در حل خفه‌کن‌های پیچیده براحتی استفاده نمود در حالی که روش فشار ثابت کربرن محدودیت دارد و ممکن است سبب واگرایی حل شود.
- ۳- به دلیل اینکه طول اصلاحی انتهایی در محل ناپیوستگی‌ها تابع فرکانس است در حل عددی با تحریک همساز ساده طول اصلاحی به شکل تابعی

مراجع

1. Winterbone, D. E., and Pearson, R. J., "Theory of Engine Manifold Design (wave action methods for IC engine)", Professional Eng. Pub., UK, (1999).
2. Benson, R. S., "The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines", Vol. I, Clarendon Press, Oxford, (1982).
3. Cosrberan, J. M., "A new constant pressure model for N-branch junctions", *Proc. Instn Mech. Engrs, J. Auto. Engng*, 206, pp 117-123, (1992).
4. Morel, T., Morel, J., and Blaser, D. A., "Fluid dynamic and acoustic modeling of concentric-tube resonators/silencers", *SAE 910072*, (1991).
5. Onorati, A., "Prediction of the acoustical performances of muffling pipe systems by the method of characteristics", *J. of Sound and Vibration*, 171(3), (1994).
6. فائزبان، علی، مدرس رضوی، محمدرضا، انوراتی، آنجلو، "مدلسازی منبع تحریک در شرایط مرزی بالادست" یازدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، مشهد، اردیبهشت (۱۳۸۲).
7. فائزبان، علی، مدرس رضوی، محمدرضا، انوراتی، آنجلو، "مدلسازی خفه‌کن‌ها در سیستم خروجی موتورهای احتراق داخلی" مجله امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پذیرفته شده برای چاپ (۱۳۸۳).
8. Onorati, A., "A white noise approach for rapid gas dynamic modelling of IC engine silencers", *IMechE, C499/052*, (1996).
9. Oppenheim, A. V., and Schaffer, R. W., "Digital Signal Processing", Prentice- Hall Int. Inc., (1975).
10. Davies, P. O. A. L. and Yaseen, E. M., "The reflection of waves of finite amplitude at an open exhaust", *J. Sound Vib.*, 122, pp 594-597, (1988).
11. Onorati, A., "Numerical Simulation of Unsteady Flows in I.C. Engine Silencers and the Prediction of Tailpipe Noise", Chapter No. 6 in "Design Techniques for Engine Manifolds", by D. E. Winterbone and R. J. Pearson, Professional Engineering Publishing, London, July (1999).
12. Blair, G. P., and Coates, S. W., "Noise produced by unsteady exhaust efflux from an internal combustion engine", *SAE 730160*, (1973).
13. Blair, G. P., "Further studies of noise characteristics of internal combustion engine exhaust systems", *SAE 740713*, (1974).
14. Munjal, M. L., "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley & Sons, (1987).