

## کد محاسباتی تخصصی و اختصاصی SILE و تحلیل آکوستیکی ساینسرها با استفاده از آن

کد محاسباتی SILE حاصل دو دهه تجربه فعالیت پژوهشی و فناوری در حوزه آکوستیک و ارتباط با موسسات معتبر در این حوزه می‌باشد.

### شبیه سازی جریان و مدل سازی هندسه خفه کن

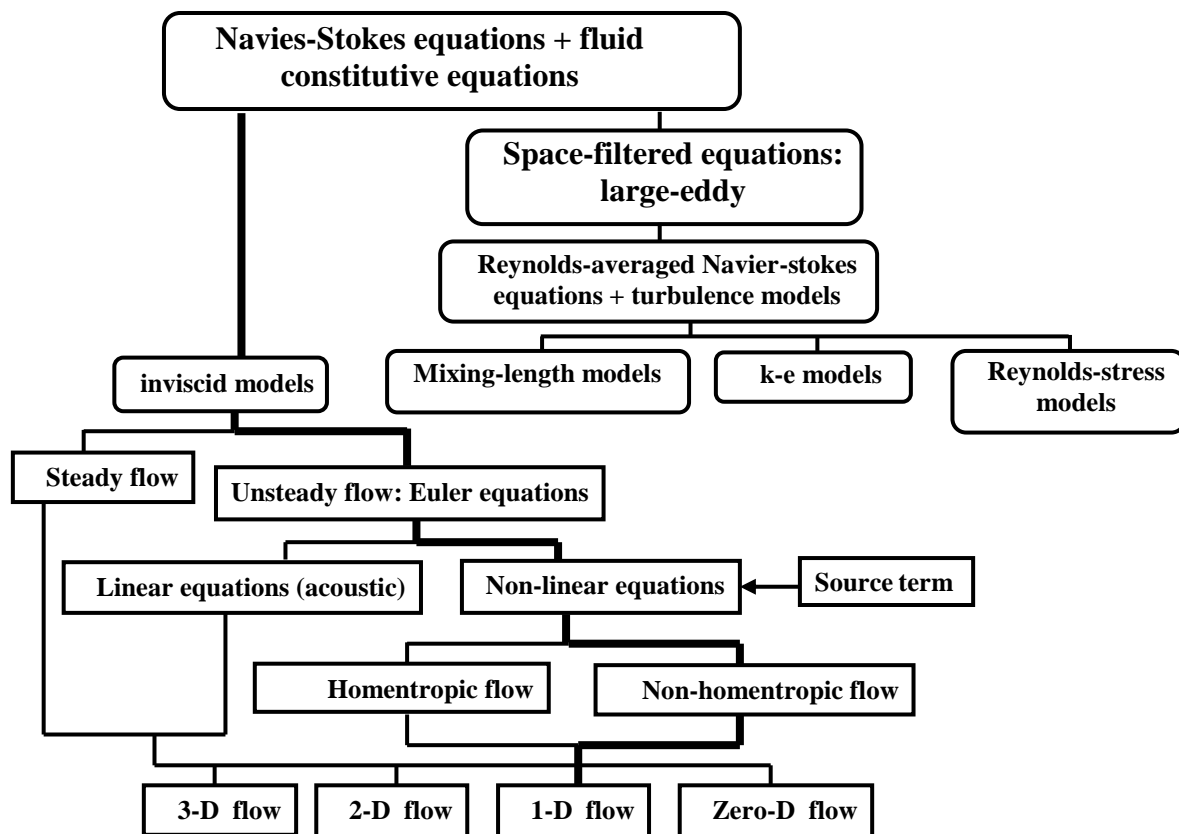
مجموعه برنامه و زیربرنامه‌های این کد به زبان فرترن نوشته شده است. در اینجا مبانی تئوری و مدل‌ها و روشهایی که در این نرم‌افزار استفاده شده توضیح داده می‌شود.

### نمادها

	زیرنویسها	$C_p$ [J/kgK]	ظرفیت گرمای ویژه
f	مربوط به فاز سیال	D, d [m]	قطر
g	مربوط به گاز	$e_o$ [J/kg]	انرژی داخلی سکون
w	مربوط به دیوار	$f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	ضریب اصطکاک
	علائم اختصاری	F [m <sup>2</sup> ]	سطح مقطع
CPM	Constant Pressure Model	p [Pa]	فشار
FCT	Flux Corrected Transport	q [W/kg]	جمله چشمه حرارتی
		St	ضریب انتقال حرارت (عدد استفان)
FFT	Fast Fourier Transform	t [s]	زمان
Har	Harmonic	T [K]	دما
PLM	Pressure Loss Model	u [m/s]	سرعت گاز
SPL	Sound Pressure Level	W	بردار متغیرهای اصلی
TF	Transfer Function	x [m]	جابجایی
TL	Transmission Loss	$\rho$	چگالی گاز
TVD	Total Variation Diminishing		
WN	White Noise		

## معادلات حاکم

کلی‌ترین توصیف جریان سیال، معادلات ناویر-استوکس در سه جهت اصلی و معادلات بقاء جرم و انرژی است. با توجه به فیزیک و هندسه مساله می‌توان با فرضیاتی معادلات را از شکل پیچیده به شکل‌های ساده درآورد. نمودار سلسله مراتب ساده سازی و شبیه سازی معادلات در شکل ۱ نشان داده شده است. مسیرهای پررنگ شده در این شکل مراحل ساده سازی معادلات حاکم در شبیه سازی جریان در این نرم افزار را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمودار سلسله مراتب از کلی ترین تا ساده ترین توصیف جریان سیال و مدل‌های مربوطه

دستگاه معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی جریان تراکم‌پذیر غیردائم یک بعدی به شکل زیر قابل بیان می‌باشد.

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

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_o \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{W}) = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u e_o \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}(\mathbf{W}) = \begin{bmatrix} \frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx} \\ \frac{\rho u^2}{F} \frac{dF}{dx} + \rho_f G \\ \frac{\rho u e_o}{F} \frac{dF}{dx} - \rho_f q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G = \frac{1}{2} \rho_f u_f \left| u \right| f \frac{4}{d}, \quad q = \frac{4Stu_f C_{vf} (T_w - T_f)}{d} \quad \text{که}$$

### شبه سازی با روشهای مشخصه‌ها و عددی یک بعدی

یکی از روشهای حل معادلات جریان، گسسته سازی معادلات بقاء با روشهای اختلاف محدود با دقت مرتبه دو است. روشهای دو مرحله‌ای با دقت مرتبه دو لکس-وندروف و مک کورمک پاسخ قابل قبولی دارند. گرچه پاسخ این روشها در محل شوک (یا ناپیوستگی) نوسانی است. با استفاده از روش FCT و روشهایی بر مبنای محدودیت TVD می‌توان محل ناپیوستگی و نوسانات متغیرها در این محل را تشخیص داد<sup>۱</sup> و با اضافه کردن جملات استهلاک مصنوعی<sup>۲</sup> نوسانات را از بین برد و منحنی تغییرات متغیرها را، بدون آنکه از دقت روش کاسته شود، صاف نمود. روشهایی که در این نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته‌اند بشرح زیر است.

در تحلیل جریان غیر دائم و یک بعدی سیال تراکم پذیر می‌توان جهت‌هایی را یافت که نشان دهنده مکان هندسی مقادیر ویژه یک کمیت فیزیکی سیال باشد. این روش تحلیل (در حل معادلات هذلولوی) را روش مشخصه‌ها می‌نامند. برای حل این معادلات ناگزیر از روشهای گسسته سازی عددی استفاده می‌گردد. در واقع این روش یک روش نیمه تحلیلی-نیمه عددی است که به آن روش گرهی<sup>۳</sup> نیز می‌گویند. روش مشخصه‌ها با اعمال لزجت مصنوعی کوچک محل ناپیوستگی‌ها و شوک را بخوبی حل می‌کند اما زمان اجرای برنامه با این روش طولانی خواهد بود. فرض می‌شود در فاصله زمانی  $n$  تا  $n+1$  جهت-های مشخصه ثابت بماند.

### مدلسازی منبع تحریک بالادست

در شرایط مرزی بالادست باید منبع تحریک که حرکت موج را به سیستم القا می‌کند تعریف شود. پارامترهای مشخصه اغتشاش، موقعیت منبع تحریک و نوع منبع تحریک با امواج فشاری مشخص می‌شوند. هر تابع اغتشاش دلخواه را می‌توان بر حسب سری نامتناهی فوریه، با چشم پوشی از جملات انتهایی سری بیان کرد. بنابراین اغتشاش با هارمونیکهایی در یک طیف

<sup>1</sup> Shock capturing schemes

<sup>2</sup> Artificial dissipation

<sup>3</sup> Mesh method

فرکانسی شبیه سازی می شود. منبع تحریک فشاری را می توان به شکل اغتشاش نوسانی همساز بیان کرد که شامل دو کمیت اصلی مقدار متوسط فشار و دامنه اغتشاش می باشد.

بسته به این که جریان اصلی گاز در خفه کن وجود داشته باشد یا خیر می توان وضعیت منبع تحریک را تعریف نمود. برای اینکه جریان اصلی غیر صفر بوجود آید لازم است فشار بالا دست خفه کن 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 می توان فشار متوسط بالادست را برابر فشار محیط انتخاب کرد.

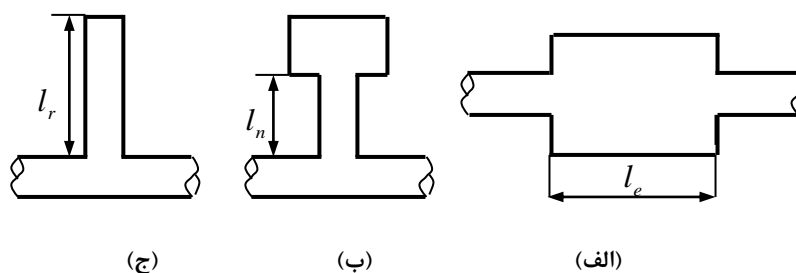
برای اینکه اغتشاش یک منبع واقعی مدل شود یک منبع فرضی در بالادست در نظر گرفته می شود. اغتشاش این منبع به دو شکل اعمال می گردد: ۱- یک اغتشاش همساز ساده<sup>۴</sup> تولید می شود و بعنوان شرط مرزی بالادست در حل معادلات دینامیک گاز بکار می رود و حل معادلات دینامیک برای تعداد زیادی فرکانس تکرار می شود. ۲- یک اغتشاش سفید<sup>۵</sup> تولید می شود و بعنوان شرط مرزی بالادست در حل معادلات دینامیک گاز بکار می رود در حالی که همه فرکانسها را در بر می گیرد.

## مدلسازی هندسه های خفه کن ها

در این نرم افزار مدل کردن اجزاء صوتی با روش سیستم-لوله<sup>۶</sup> که مجموعه ای از لوله های سری و موازی خواهند شد انجام می شود.

### سیستم-لوله ساده

سیستم-لوله ساده ترکیبی از هندسه های ساده مانند لوله و محفظه است و زیرمجموعه خفه کنهای واکنشی بحساب می آید. ساده ترین خفه کنهای واکنشی که ممکن است در سیستمهای لوله مکش و تخلیه بکار روند محفظه انبساطی و نوسان کننده هلمهلتز و ستونی هستند که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ طرحواره خفه کنهای واکنشی ساده:

(الف) محفظه انبساطی؛ (ب) تشدید کننده هلمهلتز؛ (ج) تشدید کننده ستونی

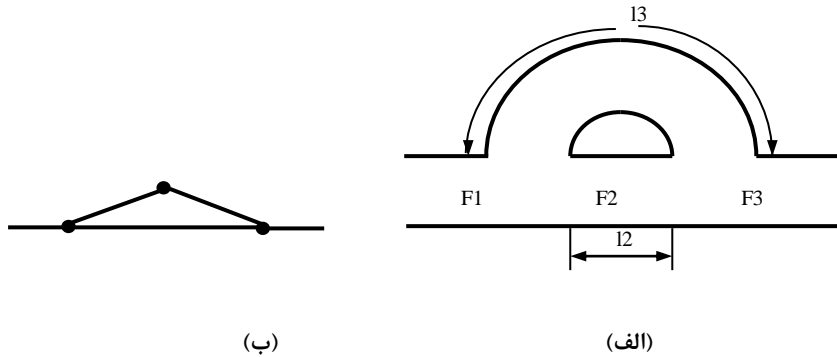
یک الگوی ساده سیستم-کانال، لوله هرشل-کوینت<sup>۷</sup> است. طرحواره و مدل این لوله در شکل ۵ نشان داده شده است.

<sup>4</sup> Single harmonic perturbation

<sup>5</sup> White noise

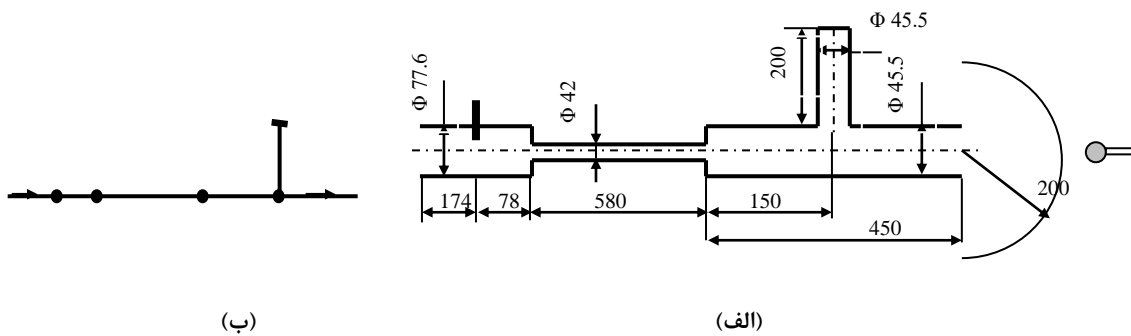
<sup>6</sup> Duct-systems

<sup>7</sup> Herschel-Quincke



شکل ۳ لوله هرشل-کوئینک با سطح مقطعهای  $F1$ ،  $F2$  و  $F3$  و طولهای لوله مستقیم  $12$  و لوله خمیده  $13$  (الف) طرحواره (ب) مدل آکوستیکی

شکل ۴ طرحواره و مدل یک صداگیر تشدید کننده ستونی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود این صداگیر مجموعه‌ای از کانالهای بهم پیوسته است.



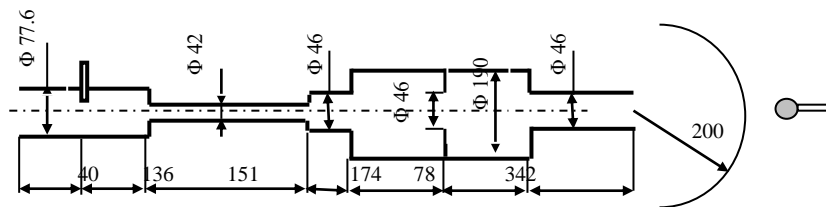
شکل ۴ تشدید کننده ستونی (الف) طرحواره (ب) مدل آکوستیکی

### سیستم - لوله پیچیده

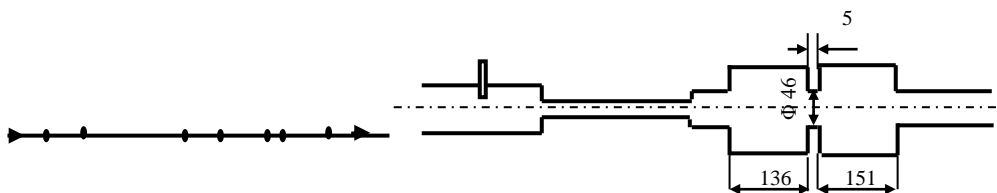
این مدل سازی شبیه سازی حرکت موج در خفه‌کن با ساختمان داخلی پیچیده‌تر را امکان پذیر و استفاده از معادلات مرزی (بعنوان مثال: بزرگ و کوچک شدن ناگهانی، اتصالات لوله، انتهای باز و غیره) را آسان می‌کند. همچنین اثر انتهایی در ناپیوستگی‌ها که به صورت جریان چند بعدی ظاهر می‌شود با اعمال روابط مربوط به طول اصلاحی با مدل سازی سیستم لوله منظور می‌شود.

از ظاهر امر پیداست که یک محفظه انبساط با یک اریفیس داخلی (شکل ۵) را می‌توان با دو محفظه انبساط جداگانه که با یک لوله کوتاه به هم وصل می‌شوند مدل کرد، این لوله نمایانگر اریفیس است. طول کانالهایی که به محل تغییر ناگهانی سطح مقطع متصلند باید با یک اصلاح انتهایی مناسب تصحیح شوند. واضح است که طول مؤثر اریفیس با یک لوله کوتاه جایگزین خواهد شد.

یک محفظه انبساط با خروجی طویل شده، شکل ۶، را می‌توان با سیستم-کانال معادل نمایش داد. قسمت تورفتگی لوله طویل شده خروجی را می‌توان با تشدید کننده ستونی موازی جانبی نمایش داد.



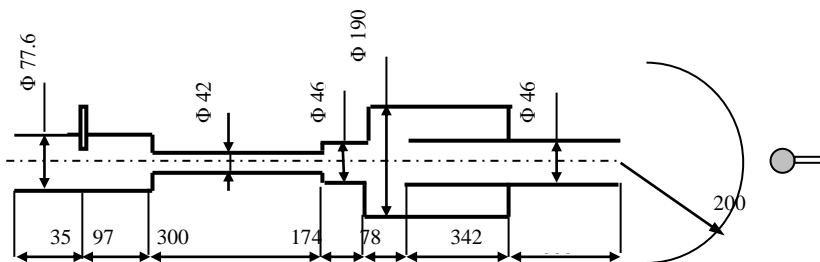
(الف)



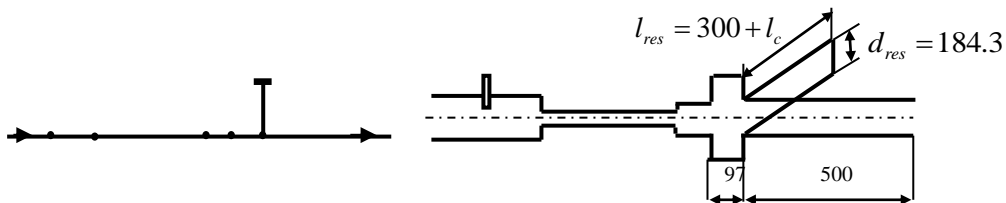
(ج)

(ب)

شکل ۵ محفظه انبساط با اوریفیس داخلی: (الف) طرحواره  
 (ب) طرحواره جایگزین با استفاده از اجزاء شناخته شده (ج) مدل آکوستیکی



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۶ محفظه انبساط با یک خروجی طویل شده:  
 (الف) طرحواره (ب) طرحواره جایگزین با استفاده از اجزاء شناخته شده (ج) مدل آکوستیکی

### خفه‌کنهای با لوله سوراخدار

لوله‌های سوراخدار<sup>۸</sup> را در اغلب خفه‌کنها می‌توان پیدا کرد و استفاده از آن خیلی معمول است. بنابراین مدل کردن صحیح آن در محاسبه عملکرد آکوستیکی وسایل صداگیر اهمیت زیادی دارد. لوله سوراخدار معمولاً داخل یک لوله بزرگتر یا حفره قرار می‌گیرد (شکل ۷). همان طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده ارتباط بین سوراخ و محفظه و سوراخ و داخل لوله از طریق انشعاب **T** برقرار می‌شود. مدل آکوستیکی این خفه‌کن در شکل پ نشان داده شده است.

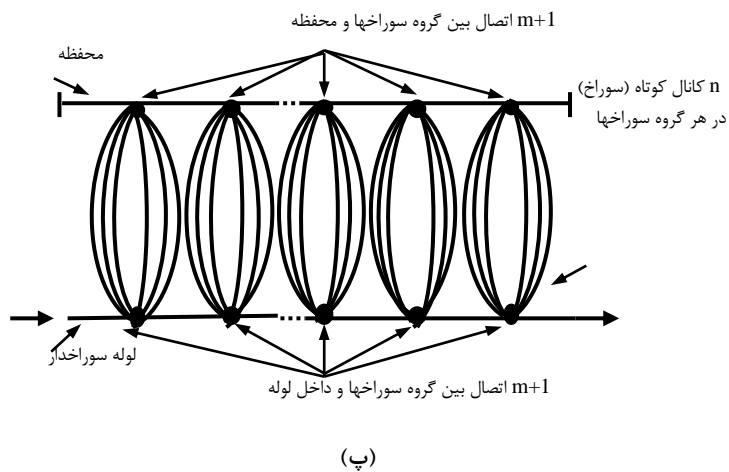
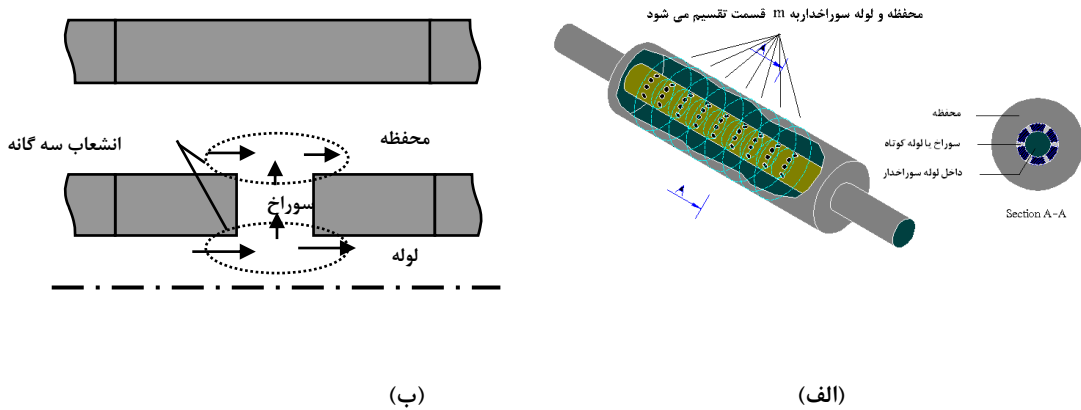
### خفه‌کنهای جذبی

خفه‌کنهای استهلاکی از مواد جاذب صدا ساخته شده‌اند که انرژی صوتی را به حرارت تبدیل می‌کند. بعضی اوقات خفه‌کنها به شکل ترکیبی از خفه‌کنهای واکنشی و جذبی ساخته می‌شود و مدل کردن این اجزاء مهم است. هندسه یک نوع خفه‌کن استهلاکی در شکل ۸ نشان داده شده است. ساختار شکل ۸-الف نمایانگر لوله‌های سوراخدار شکل ۷-الف است با این تفاوت که در اینجا پشم آهن<sup>۹</sup> فضای حفره را اشغال کرده است. استهلاک این خفه‌کنها را با در نظر گرفتن ترکیب افتهای گسترده و متمرکز به نام مدل **k-f** و فقط با افت فشار گسترده به نام مدل **f** شبیه‌سازی شده است. مدل سوم که برای مدلسازی محیط متخلخل بکار می‌رود بر مبنای شرایط فیزیکی حاکم قرار دارد. در این مدل مقاومت ماده جاذب صدا به شکل تابعی از خواص فیزیکی ماده و جریان بیان می‌گردد. این مدل به نام مدل **R** نام گذاری می‌شود.

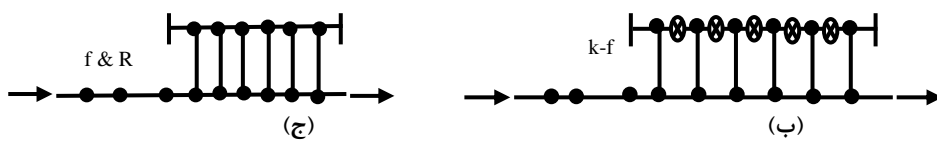
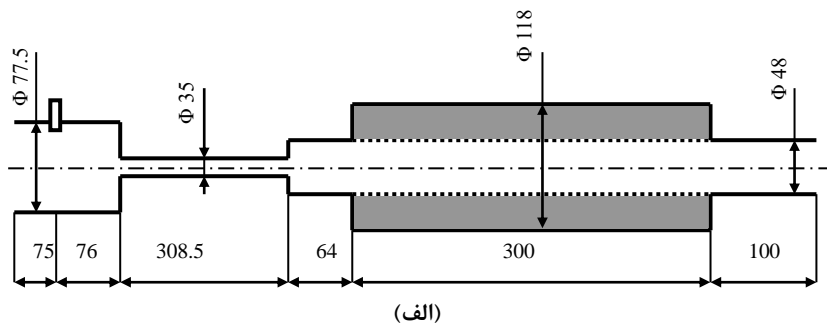
---

<sup>۸</sup> Perforated tube silencers

<sup>۹</sup> Steel fiber



شکل ۷ خفه کن با لوله سوراخدار (الف) طرحواره  
(ب) ارتباط بین سوراخ و محفظه و بین سوراخ و داخل لوله (ب) معادل آکوستیکی یا سیستم - لوله



شکل ۸ خفه کن جذبی (الف) طرحواره هندسه‌ای که حفره اطراف لوله سوراخدار با پشم آهن پر شده است (ب) مدل آکوستیکی  $k-f$   
(ج) مدل آکوستیکی  $f \& R$



## شرایط مرزی

در جریان یک بعدی متغیرهای مکانی  $x$  و زمانی  $t$  متغیرهای مستقل می‌باشند. معادلات حاکم بر جریان غیر دائم تراکم پذیر هذلولوی هستند و شرایط مرزی به دو شکل بر حوزه حل تأثیر دارد. ۱- در لحظه اولیه  $t = t_{initial}$  میدان جریان در تمام محدوده تغییرات  $x$  فقط تابع  $x$  است. ۲- در هر لحظه زمانی مقدار توابع در داخل میدان جریان متأثر از مقدار آن در دو انتهای میدان جریان و نقاط داخلی در قدم زمانی قبلی و در راستای مشخصه می‌باشد.

معمولاً مقادیر مرزی معادلات هذلولوی در روشهای عددی و تحلیلی بر مبنای روش مشخصه‌ها محاسبه می‌شود. بطور 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 و یا چند جزء به هم متصل شوند که انشعاب چندشاخه‌ای می‌نامند. ممکن است یک میکروفون در مقطعی از یک لوله قرار داشته باشد. می‌توان مشخصاً از شرایط مرزی تعیین ناگهانی سطح مقطع، شرایط مرزی انتهای باز، انشعاب چند شاخه‌ای و جایگزینی بعضی تجهیزات با افت فشار آدیاباتیک نام برد.

یک بعدی در نظر گرفتن انتشار امواج بویژه در محل انشعابها یک نوع مبارزه با واقعیت است و اتصالات اثر قابل توجهی بر امواج فشاری دارند. از طرفی مدلهای محاسباتی که بتوانند الگوهای جریان سیال شامل اثرات آشفتگی (توربولانس) را مشخص کنند بسیار پیچیده‌اند و استفاده از آنها برای شبیه سازی خفه‌کن‌ها وقت گیر است زیرا لازم است این محاسبات برای رسیدن همگرایی بارها تکرار شوند. لذا روشهای یک بعدی هنوز هم جاذبه کافی دارد. برای تحلیل انشعاب چند لوله‌ای دو روش فشار ثابت و افت فشار مطرح است. در سرعتهای جریان کم اغلب روش فشار ثابت قابل قبول است. در سرعت جریان گاز بالا در نظر گرفتن افت فشار در اتصالات اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

## مدلسازی انشعاب چند شاخه‌ای با روشهای فشار ثابت

در این روش فرض می‌شود فشار استاتیکی در انتهای لوله‌هایی که به محل انشعاب ختم می‌شوند یکسان باشد. مشخصه-های چنین اتصالاتی بطور کلی با سطوح هندسی آن بیان می‌گردد. بنابراین لازم نیست جریان در محل اتصال اندازه‌گیری شود. این یک امتیاز بزرگی است زیرا اندازه‌گیری جریان وقتگیر و گران است. امتیاز بزرگ دیگر روش فشار ثابت محدود نبودن تعداد لوله‌هایی است که به هم وصل می‌شوند.

### روش فشار ثابت بنسون

بنسون فرض کرد حجم اتصال (محل انشعاب) در مقایسه با حجم لوله کوچک و جریان در آن شبه دائم باشد. او مدل فشار ثابت خود را برای جریان همونتروپیک توسعه داد. مقایسه نتایج مدل فشار ثابت بنسون با نتایج تجربی نشان دهنده توانایی قابل قبول این مدل بویژه در سرعتهای کم و تغییر جهتهای کوچک می‌باشد.

### روش فشار ثابت کربن

بر اساس روش بنسون فرض می‌شود تراز آنتروپی همه جریانهای خروجی یکسان و برابر تراز متوسط جریانهای ورودی است. این فرض بقاء آنتروپی را القاء می‌کند.

کربن از روش بنسون ایده گرفت و دو روش فشار ثابت دیگر ارائه داد. در روش اول فرض کرد تراز آنتروپی جریانهای خروجی یکسان باشد و لزوماً برابر با متوسط آنتروپی جریانهای ورودی به محل انشعاب نمی‌باشد. کربن این روش را روش

آنتروپی یکسان<sup>۱۰</sup> 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.

### مدلسازی انشعاب چند شاخه‌ای با روش اتلاف فشار

در اینجا انشعابهای سه شاخه‌ای T شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. انشعاب چند شاخه‌ای نیز قابل ساده شدن به انشعاب دو و سه شاخه‌ای می‌باشند. استفاده از روش اتلاف فشار بر مبنای این فرضیات 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 معادلات استفاده نمود. برای برطرف کردن این مشکل از معادلات اندازه حرکت جریان دائم برای بیان اختلاف فشار بین جریانهای ورودی و خروجی محل انشعاب استفاده می‌شود. ضرایب افت فشار نیز از نتایج تجربی بدست آید.

### اثرات انتهایی در ناپیوستگی‌ها

به این نکته باید توجه کرد که هیچکدام از روشهای خطی و غیر خطی یک بعدی که برای شبیه سازی حرکت موج استفاده می‌شود نمی‌توانند واقعیت سه بعدی موجی که از محل ناپیوستگی (مانند تغییر سطح مقطع، انتهاهای باز و غیره) می‌گذرد، بطور کامل در نظر بگیرند. در هندسه‌های ساده نتایج حل یک بعدی نسبت به نتایج حل سه بعدی و تجربی روند مشابهی دارد با این تفاوت که نتایج حل یک بعدی نسبت به طول مشخصه کمی جابجا شده است. این تفاوت با تعریف طول اصلاحی بسیار کم می‌گردد. در واقع در روشهای یک بعدی یک طول انتهایی تصحیح شده به طول کانال متصل به ناپیوستگی اضافه می‌گردد بطوری که انعکاس و انتقال موج در مرزها را متناسب با واقعیت نشان دهد.

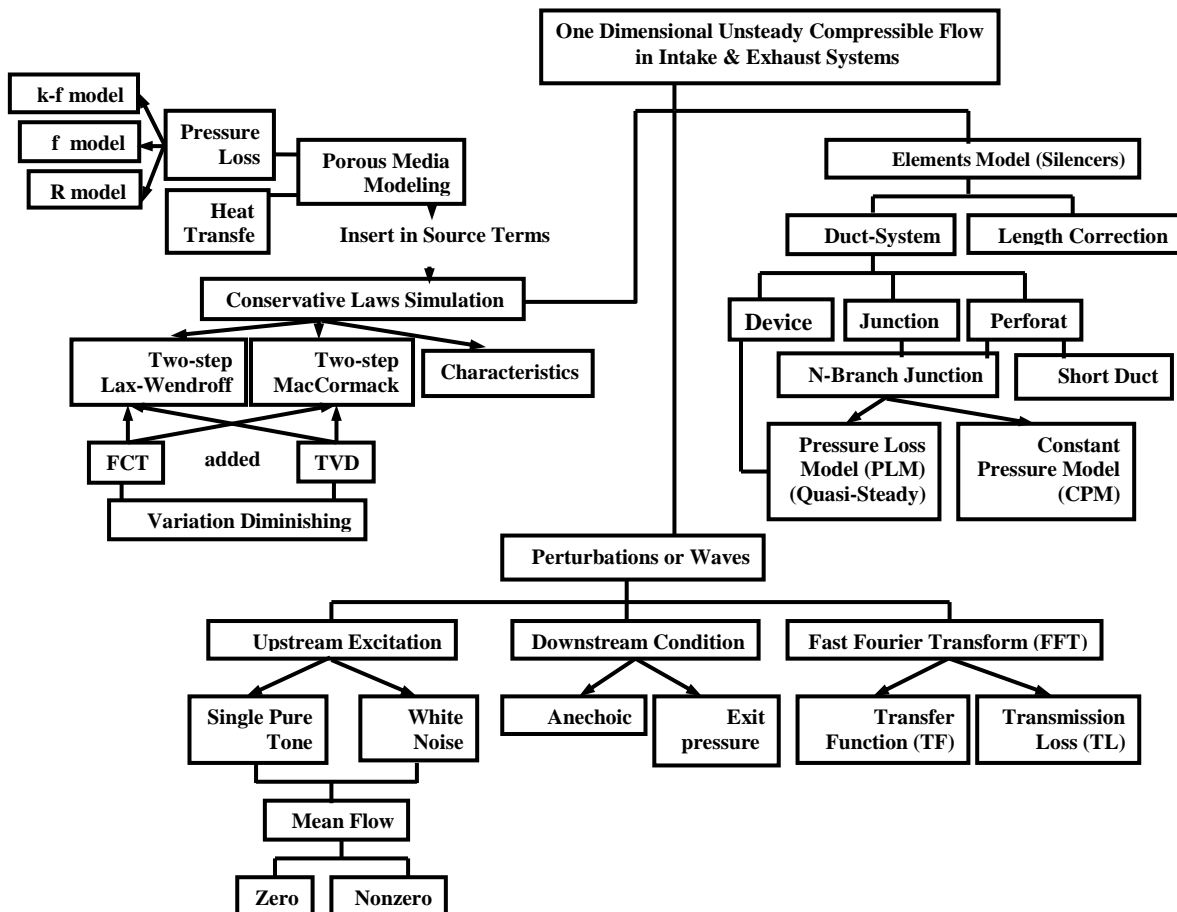
### جمع بندی روشهای شبیه سازی و مدلسازی خفه‌کن‌ها در نرم افزار SILE

در این نرم افزار جریان تراکم پذیر غیر دائم در خفه‌کنها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحلیل مطابق شکل ۹ به سه موضوع اصلی: ۱- شبیه‌سازی قوانین حاکم بر جریان، ۲- مدل‌سازی اغتشاش صوتی و ۳- مدل‌سازی هندسه خفه‌کنها پرداخته می‌شود.

در شبیه‌سازی جریان سه روش یک بعدی مشخصه‌ها و روشهای عددی دو مرحله‌ای لکس-وندروف و مک‌کورمک همچنین روشهای نوسانگیر FCT و TVD مورد استفاده قرار گرفته است. در صورتی که فضای خفه‌کن با ماده جاذب صدا پر شده باشد محیط متخلخل حاصل مدل‌سازی می‌گردد. افت فشار مربوط به جریان از محیط متخلخل با سه روش گوناگون و انتقال حرارت بین سیال و ماده جاذب صدا نیز با یک روش مدل‌سازی می‌شوند.

<sup>10</sup> Equal entropy

در مدل‌سازی منبع اغتشاش صوتی شرایط مرزی بالادست و پایین دست مدل شده و برای بدست آوردن پاسخ طیفی خفه‌کن در مقابل اغتشاش صوتی تحلیل‌گر انتقال سریع فوریه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌سازی تحریک اغتشاش بالادست به دو شکل اغتشاش هارمونیک ساده و اغتشاش سفید انجام می‌گیرد که برای دو حالت جریان اصلی صفر و غیر صفر در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی پایین دست نیز به دو شکل فرض انتهای بدون انعکاس و فرض فشار خروجی ثابت مدل‌سازی می‌گردد. در تحلیل طیفی با استفاده از تحلیلگر دو کمیت اتلاف عبور و تابع انتقال خفه‌کن محاسبه می‌شوند. در مدل‌سازی هندسه خفه‌کنها از روش کانال-سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاهش خطای روش حل یک بعدی، طول اصلاحی مناسب هر ناپیوستگی هندسی در نظر گرفته می‌شود. از مهمترین هندسه‌ها اتصالات، تغییر سطح مقطع و لوله‌های سوراخدار هستند. انشعابهای چند شاخه‌ای با دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار مدل‌سازی می‌شوند.

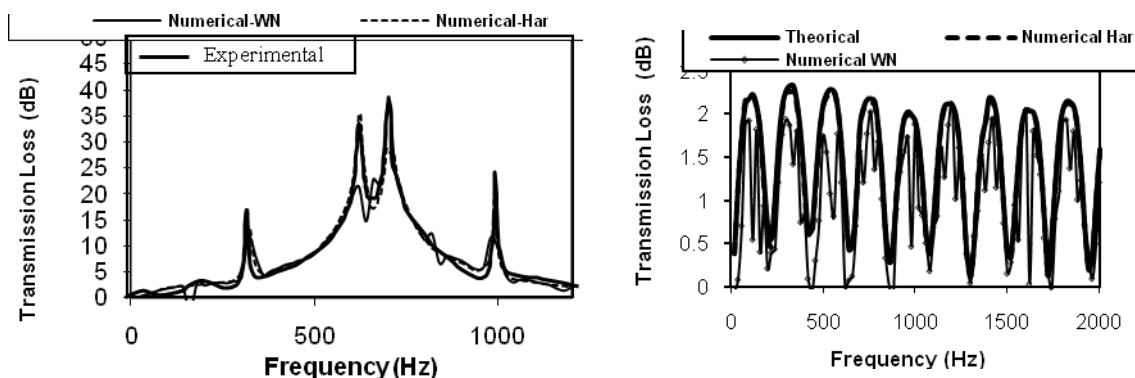


شکل ۹ نمودار مراحل و روشهای بکار برده شده در حل جریان تراکم پذیر غیر دائم در یک خفه‌کن

### نمونه‌هایی از نتایج اعتبار سنجی شده محاسبات نرم افزار SILE

در شکل ۱۰ نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده و نویز سفید در لوله هرشل-کوئینک (شکل ۳) مقایسه شده است. در شکل ۱۰-الف نتایج حل عددی مربوط به لوله هرشل-کوئینک دارای کانالهای با قطر و طول مختلف با نتایج تجربی مقایسه شده که انطباق خوبی با آن دارد. در شکل ۱۰-ب ملاحظه می‌شود نتایج حل عددی با تحریک همساز ساده بر حل تئوری

خطی منطبق است و نتایج حل عددی با تحریک نويز سفید فرکانسهای تشدید را بخوبی ردیابی کرده است اما مقادیر آن اطراف نتایج حل خطی نوسان می‌کند.

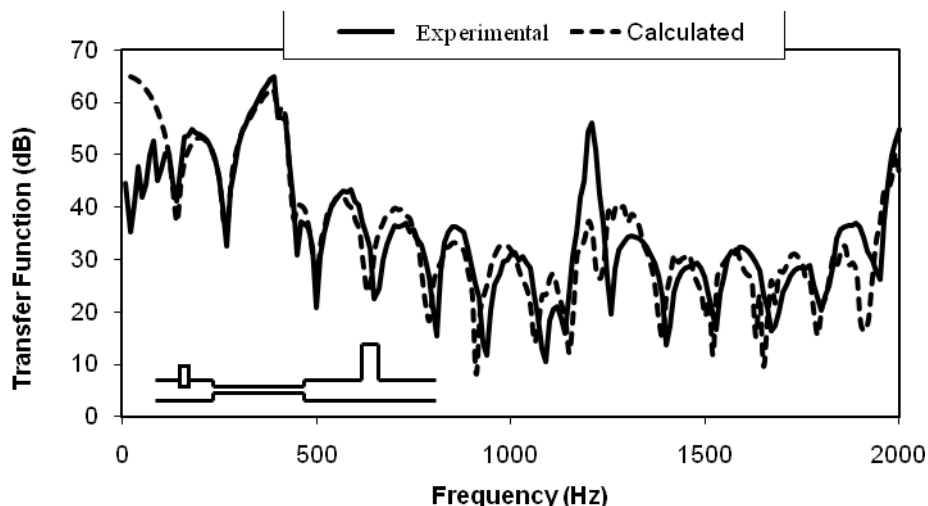


شکل ۱۰ مقایسه نتایج در لوله هرشل-کوئینک (الف) حل عددی با تحریک همساز ساده و نويز سفید با نتایج تجربی با مشخصات

$$d_1 = d_2 = 4.859, d_3 = 4.674 \text{ و } L_2 = 39.85 \text{ L}_3 65.5 \text{ cm}$$

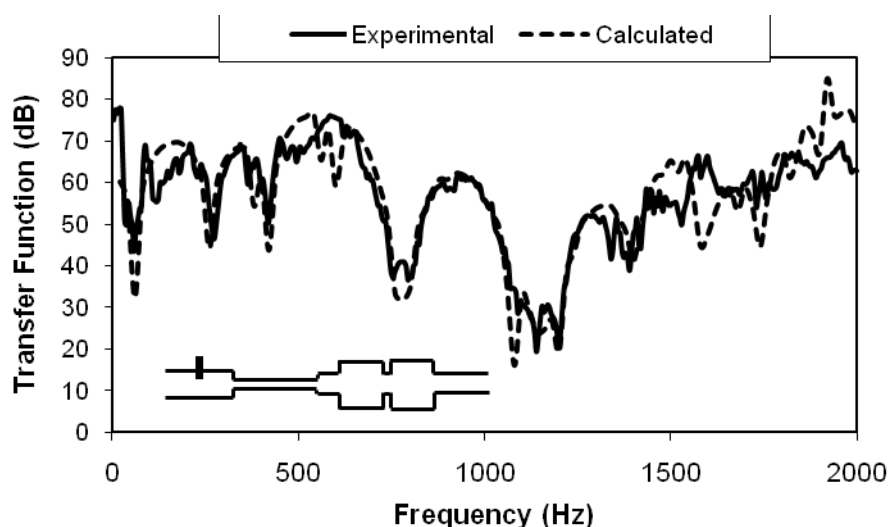
(ب) حل تئوری خطی با حل عددی با تحریک همساز ساده و نويز سفید با مشخصات  $F_1 = F_2 = F_3$  و  $L_2 = L_3$

تابع انتقال تشدید کننده ستونی شکل ۴ در شکل ۱۱ نشان داده شده است که تخمین قابل قبولی است. زیرا دو قعر میرایی سیستم را بدام انداخته است. دومین فرکانس تشدید کمی کمتر از مقدار تجربی تخمین زده شده، اما توافق کلی خوبی دارد.



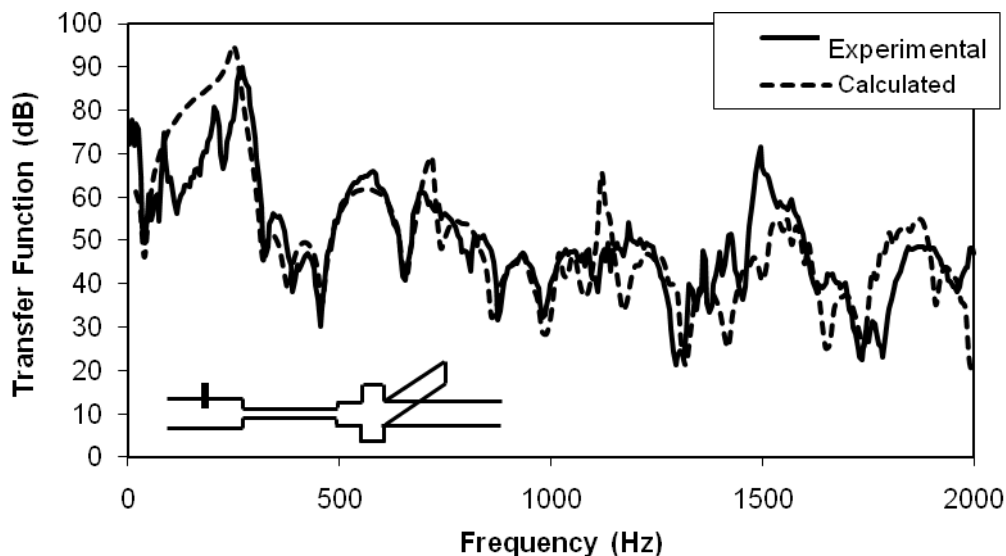
شکل ۱۱ مقایسه تابع انتقال تخمینی و تجربی در تشدید کننده ستونی (شکل ۴)

در صورتی که هندسه پیچیده خفه‌کنها با هندسه‌های شناخته شده مدلسازی گردد شبیه سازی رفتار آکوستیکی آنها با استفاده از مدل گاز دینامیکی غیر خطی امکانپذیر خواهد بود. در شکل ۱۲ دیده می‌شود که توافق خوبی بین منحنی‌های میرایی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در محدوده فرکانس ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز، مربوط به محفظه انبساط با اریفیس میانی شکل ۵، وجود دارد که توانایی روش معادل سازی آکوستیکی را واقعا ثابت می‌کند.



شکل ۱۲ مقایسه بین نتایج تخمینی و تجربی تابع انتقال مربوط محفظه انبساط با اریفیس داخلی (شکل ۵)

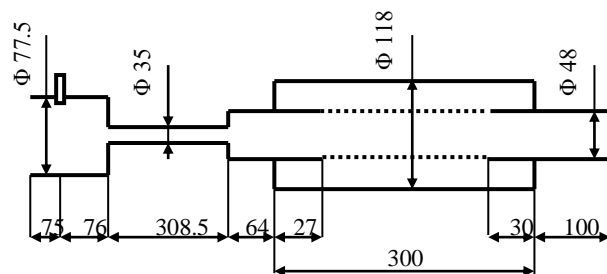
همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده محفظه انبساط با خروجی طویل شده را می‌توان با تشدید کننده ستونی موازی جانبی نمایش داد. منحنی‌های میرایی این ساختار در شکل ۱۳ ترسیم شده است. در محدوده فرکانس ۰ تا ۲۰۰۰ هرتز نتایج تخمینی توافق خوبی با نتایج تجربی دارد که تأیید کننده اعتبار روش مدل کردن این هندسه‌ها است.



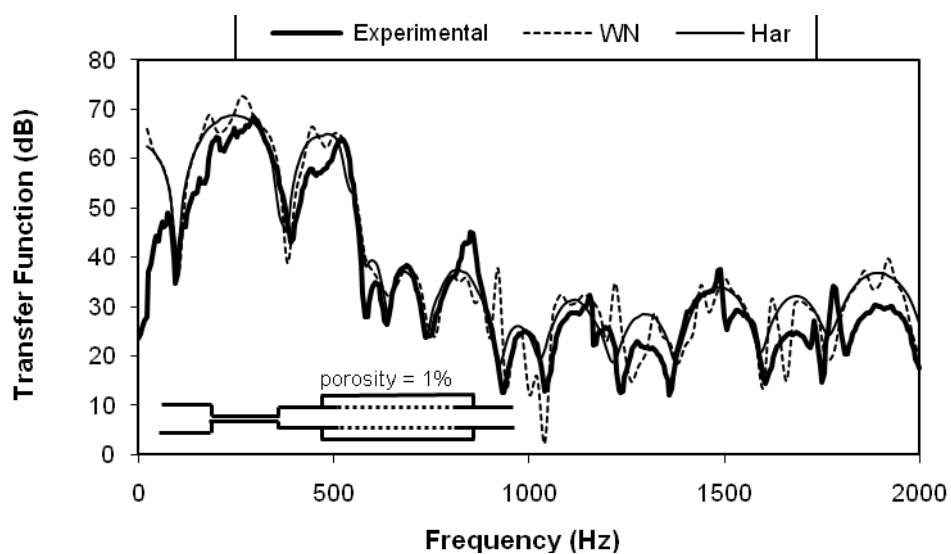
شکل ۱۳ مقایسه بین نتایج تخمینی و تجربی تابع انتقال مربوط به محفظه انبساط با یک خروجی طویل شده (شکل ۶)

در شکل ۱۴ ابعاد هندسی و نتایج حل عددی یک خفه‌کن لوله سوراخدار (شکل ۷) با تخلخل یک درصد را نشان می‌دهد. در این شکل هر دو حالت تحریک همساز ساده و اغتشاش سفید با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود حل عددی با هر دو روش تحریک فرکانسهای تشدید را بخوبی ردیابی می‌کنند و مقادیر آنها با نتایج تجربی بسیار نزدیک است اما زمان محاسبات مدل سیستم-لوله این خفه‌کن با ۳۵ جزء (لوله) با تحریک همساز ساده ۳۰ برابر محاسبات با تحریک اغتشاش سفید طول می‌کشد.

در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود نتایج استفاده از روشهای CPM و PLM بنسب در حل خفه‌کن با لوله سوراخدار با تخلخل یک درصد تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. حتی در فرکانسهای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز نتایج مربوط به روش CPM از نتایج مربوط به PLM بهتر است. روشهای فشار ثابت بنسب و کریرن 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 باشد آورده نشده است.

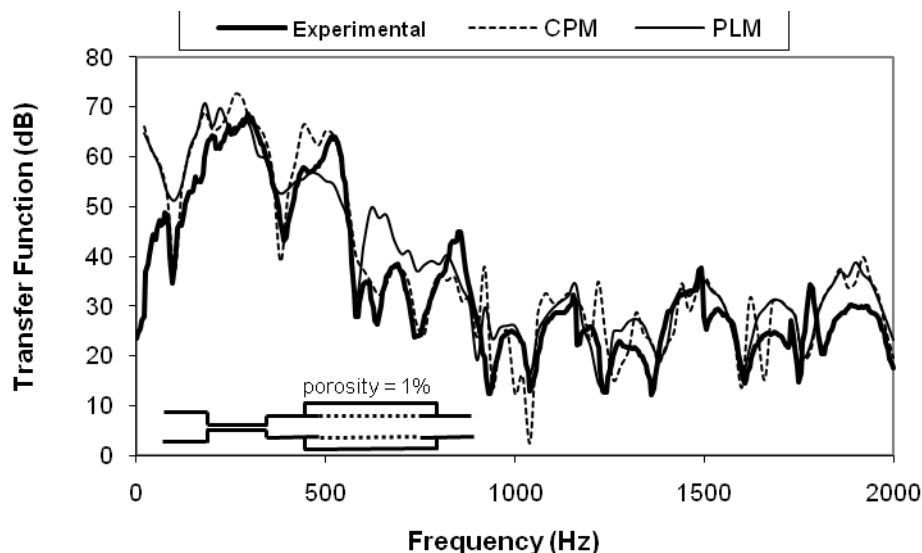


(الف)



(ب)

شکل ۱۴ خفه‌کن با یک لوله سوراخدار (الف) ابعاد هندسی (ب) مقایسه نتایج حل عددی (شکل ۷) با دو نوع تحریک همساز ساده و نویز سفید و نتایج تجربی



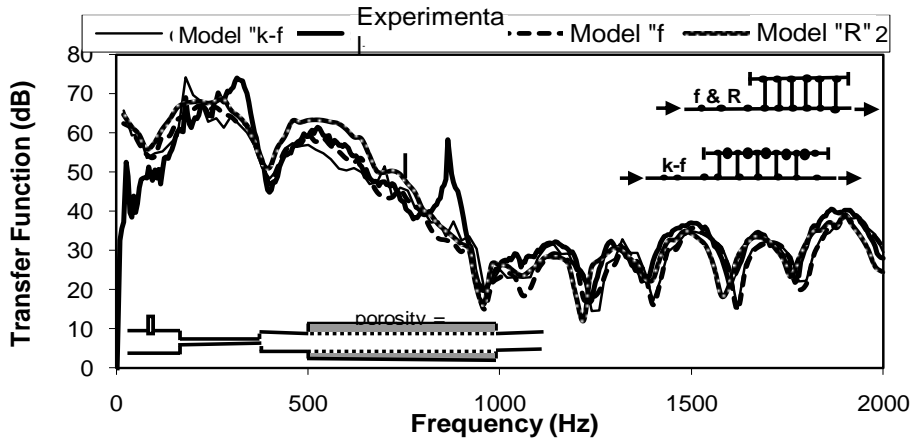
شکل ۱۵ مقایسه نتایج حل در خفه‌کن با لوله سوراخدار (شکل ۷) با استفاده از مدل‌سازی انشعاب  $T$  با دو روش فشار ثابت و اتلاف فشار بنسون و تحریک اغتشاش سفید و نتایج آزمایشگاهی

در شکل ۱۶ نتایج تحلیل عددی مدل  $k-f$  خفه‌کن جذبی شکل ۸ با نتایج تجربی مقایسه شده است. همچنین در این شکل نتایج تحلیل عددی مدل‌های  $f$  و  $R$  خفه‌کن جذبی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود، بجز در فرکانسهای کوچک، نتایج حل عددی با هر سه مدل توافق خوبی با نتایج تجربی دارد. این توافق نشان می‌دهد که می‌توان اتلاف اصطکاکی مربوط به مواد جاذب صدا را به شکلهای مختلفی در نظر گرفت. البته هنگامی که از مدل‌های  $k-f$  و  $f$  استفاده می‌شود لازم است ضریب اصطکاک حدس زده شده و اصلاح گردد، یعنی کل میدان حل باید چند بار حل شود، در حالی که در حل عددی با استفاده از مدل  $R$  نیازی به تکرار حل نمی‌باشد زیرا مقاومت ماده جاذب صدا در مقابل جریان بر اساس خواص فیزیکی ماده و مشخصات جریان بدست می‌آید.

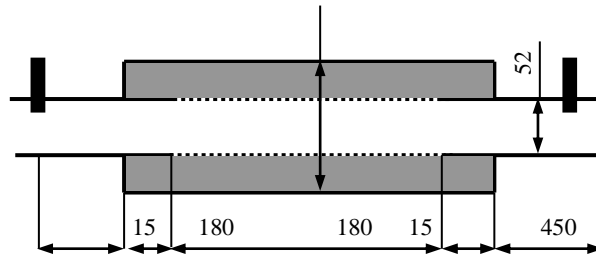
در شکل ۱۷ طرحواره، یک خفه‌کن جذبی را نشان می‌دهد. تخلخل لوله سوراخدار در آن  $16/55$  درصد و ماده جاذب صدای داخل آن پشم سنگ می‌باشد. در شکل ۱۸ نتایج تخمینی و تجربی منحنی اتلاف عبور خفه‌کن شکل ۱۷ در حالت بدون ماده جاذب صدا مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود فرکانسهای تشدید و دامنه اتلاف عبور واقعی با روش تخمینی بخوبی ردیابی شده‌اند. شکل ۱۹ نیز منحنی اتلاف عبور این خفه‌کن را در حالتی که با پشم سنگ با میزان فشردگی  $0/007$  پر شده باشد، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود فرکانسهای تشدید منحنی شکل ۱۸ در شکل ۱۹ از بین رفته‌اند. بنابراین با اضافه نمودن ماده جاذب صدا می‌توان تا حدود زیادی توان صوتی را مستهلک نمود و تشدیدها را کاهش داد. شکل ۲۰ نتایج تخمینی و تجربی منحنی اتلاف عبور خفه‌کن شکل ۱۷ را در حالتی که محفظه خفه‌کن با پشم سنگ با میزان فشردگی  $0/0141$  و  $0/0242$  پر شده باشد، نشان می‌دهد. گرچه نتایج تخمینی و تجربی متفاوتند اما روند کلی هردو یکی است. با افزایش میزان فشردگی ماده جاذب صدا توان صوتی بیشتر مستهلک می‌گردد تا به حالت حدی برسد. افزایش بیشتر میزان فشردگی تاثیر بر عملکرد آکوستیکی ندارد. در فرکانسهای بالاتر از  $2000$  هرتز نتایج تخمینی خطای بیشتری دارد که به محدود بودن دقت روابط محاسبه کننده طول اصلاح انتهایی مربوط می‌شود.

<sup>۱</sup> (Massivity) نسبت چگالی بسته (package) ماده پرکننده به چگالی واقعی آن (اگر همه فضا با ماده پرکننده کاملاً پر شود میزان تخلخل صفر و میزان فشردگی یک می‌شود و اگر فضا بدون ماده پرکننده باشد میزان تخلخل یک و میزان فشردگی صفر می‌شود).

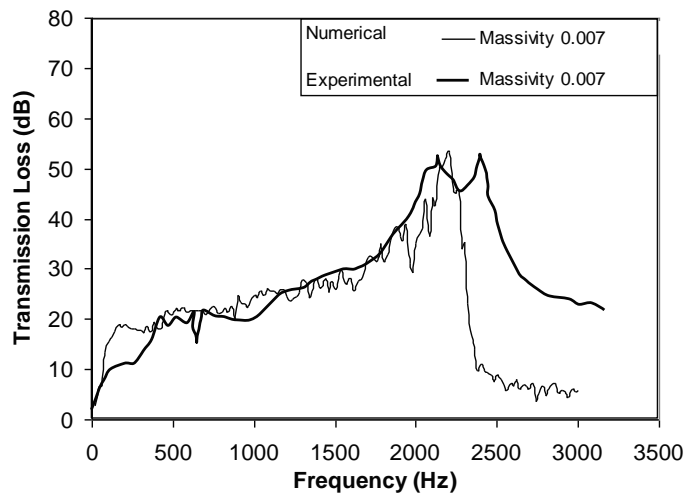




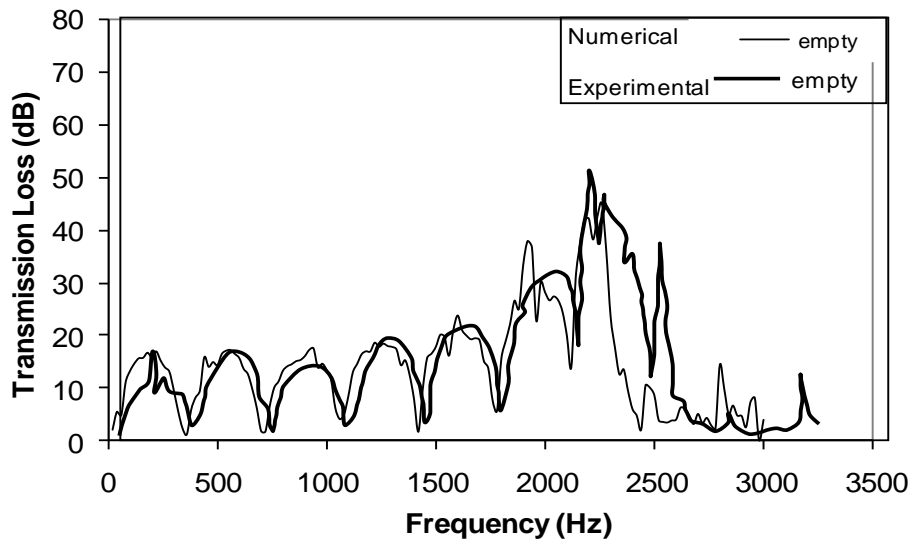
شکل ۱۶ مقایسه منحنی تغییرات تابع انتقال-فرکانس تحلیلی عددی با استفاده از مدل‌های  $k-f$ ،  $f$  و  $R$  با نتایج تجربی خفه‌کن جذبی شکل ۱۰



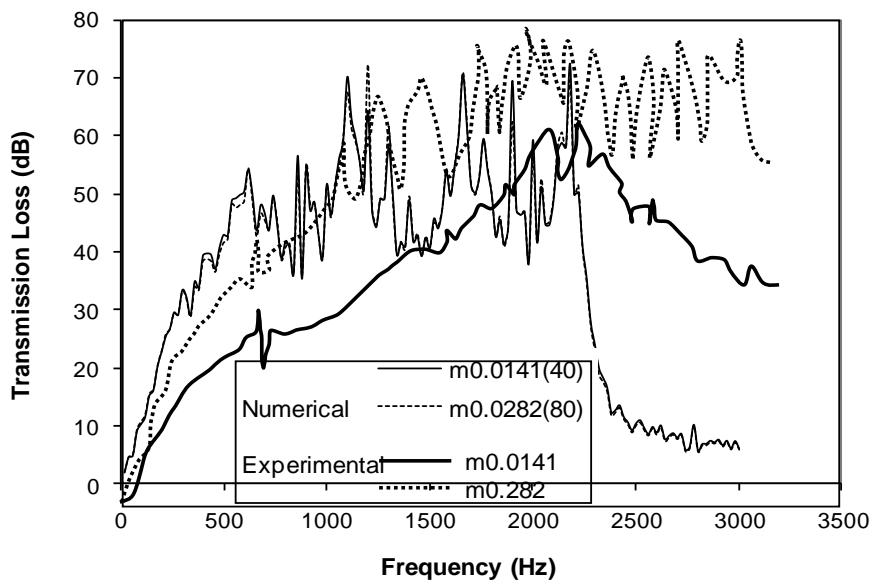
شکل ۱۷ خفه‌کن جذبی پر شده با پشم سنگ و لوله سوراخدار با تخلخل ۱۶/۵۵٪



شکل ۱۸ مقایسه منحنی اتلاف عبور تخمینی با در خفه‌کن با لوله سوراخدار با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۱۹ مقایسه منحنی اتلاف عبور تخمینی خفه‌کن جذبی شکل ۱۷ با میزان فشردگی ۰/۰۰۷ (یا چگالی ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع) پشم سنگ با نتایج آزمایشگاهی



شکل ۲۰ مقایسه منحنی اتلاف عبور تخمینی خفه‌کن جذبی با میزان فشردگی ۰/۰۱۴۱ و ۰/۰۲۸۲ (یا چگالی ۴۰ و ۸۰ کیلوگرم بر متر مربع) پشم سنگ با نتایج آزمایشگاهی