

طراحی و شبیه‌سازی عددی عملکرد آکوستیکی محفظه‌ی آرامش سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی

مهرداد رسولی مقدم (کارشناس ارشد)

محسن آقا سید میرزا بزرگ (استادیار)

سعید خردمند* (استادیار)

مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوره ۳، شماره ۲، ص. ۲۹-۱۹

در مطالعه‌ی حاضر روشی برای طراحی و بررسی عددی اندازه‌ی سطح مقطع میانی کانال (محفظه‌ی آرامش) سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی ارائه شده است. در این روش ابتدا با توجه به الزامات آئرو دینامیکی و آکوستیکی، سیستم کانال هوارسانی به سه قسمت ورودی، محفظه‌ی آرامش و خروجی کانال تقسیم شد و با استفاده از نظریه‌ی امواج صفحه‌یی درون کانال، بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان، ابعاد هندسی قسمت‌های ورودی و خروجی کانال در فرکانس غالب سیستم محاسبه شد. سپس با استفاده از روش‌های عددی به بررسی و تعیین اندازه‌ی مناسب سطح مقطع میانی کانال هم از نظر آئرو دینامیکی و هم از نظر آکوستیکی با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان پرداخته شد. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش سطح مقطع محفظه‌ی آرامش نسبت به سطح مقطع ورودی/خروجی کانال، عملکرد آئرو دینامیکی سیستم کانال کاهش و عملکرد آکوستیکی آن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

mehrdad.rasoulimoghadam@yahoo.com
mirzabozorg@mut-es.ac.ir
saeid.kheradmand@yahoo.com

واژگان کلیدی: آئرو آکوستیک، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، تحلیل لایتهیل، مدل فوز و بلیام و هاوکینگز، انتشار صوت در کانال.

۱. مقدمه

می‌کنیم. با توجه به این که توربین گازی در محیطی بسته (موتورخانه) قرار می‌گیرد، هدف اصلی تأمین هوای مورد نیاز آن است. توربین گاز، هوای مورد نیاز خود را از طریق کانال هوا به وسیله‌ی مکش کمپرسور خود، از بیرون فضای موتورخانه (فضای آزاد) به درون خود می‌کشد. چالش مهمی که در اینجا به وجود می‌آید، تولید نویز بسیار بالای ناشی از کارکرد توربین گاز و کوران شدید هوایی است که با توجه به دبی بسیار بالای مورد نیاز توربین گاز، در کانال به وجود می‌آید. از آنجا که موتورخانه در پایین‌ترین طبقات شناور (در زیر آب) قرار دارد، نویزهای ایجاد شده علاوه بر آزار پرسنل شناور، به فضای اطراف شناور در درون آب منتقل می‌شود که به شناسایی شناور توسط رادارهای شناورهای زیرسطحی دشمن بسیار کمک می‌کند. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی میزان نویز تولید شده در اطراف سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی و چگونگی کاهش آن است. نمای شماتیک سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی در شکل ۱ نشان داده شده است.

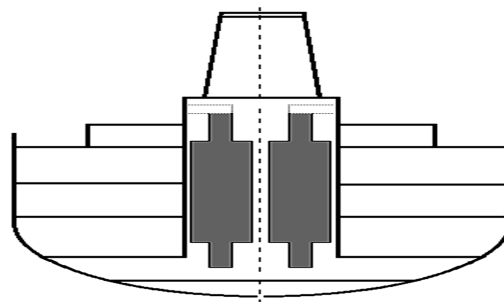
در حالت کلی نویز ناشی از جریان سیال بر اثر تولید گردابه‌ها و همچنین وجود اصطکاک در امتداد دیواره‌ی کانال می‌تواند در فرایند انتقال و توزیع سیال نیز اثرگذار باشد. مطالعات نشان می‌دهد که با کاهش قطر ورودی کانال، میزان تراز شدت صوت در امتداد طولی آن به صورت پیوسته افزایش می‌یابد.^[۱] اولین گام

شناورها برای رسیدن به سرعت و قدرت مانور بالاتر، نیاز به قدرت بالاتری دارند. این قدرت بالا اگر تنها توسط موتور دیزل تأمین شود، موتور دیزل بسیار بزرگ و با نویز بسیار بالا خواهد بود. یکی از مؤثرترین راه‌ها برای افزایش قدرت مانور شناورها، استفاده از توربین گاز برای تولید نیروی محرکه‌ی مورد نیاز شناور است. از طرف دیگر اگر نیروی محرکه در تمامی حالات شناور (مانور و غیرمانور) با استفاده از توربین گاز تأمین شود، مصرف سوخت شناور به شدت افزایش می‌یابد (توربین گاز سوخت زیادی مصرف می‌کند). بنابراین برای حل این مشکلات از ترکیب موتور دیزل و توربین گاز استفاده می‌کنند. در این ترکیب نیروی محرکه‌ی مورد نیاز، هنگامی که شناور در حالت عملیات مانور نیست و با یک سرعت متوسط حرکت می‌کند، به وسیله‌ی موتور دیزل تأمین می‌شود و هنگامی که می‌خواهد برای مدت زمان محدودی به حالت مانور برود، به وسیله‌ی توربین گازی تأمین خواهد شد. بنابراین اگر بخواهیم شناور با قدرت مانور بالا داشته باشیم که هم سوخت مناسبی داشته باشد و هم اندازه‌ی موتورخانه‌ی آن قابل قبول باشد، از ترکیب موتور دیزل و توربین گازی استفاده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۲۴، پذیرش ۱۳۹۶/۶/۱۴.

DOI:10.24200/J40.2018.6414



شکل ۱. نمای شماتیک دوی بعدی مسیر انتقال هوا از عرشه‌ی شناور به کمپرسور توربین گاز دریایی.

جریان نیز تأثیر به‌سزایی در عملکرد آکوستیکی رزوناتور دارد. در رزوناتورهای کوچک با افزایش سرعت متوسط جریان، پارامتر انتقال کاهش می‌یابد.^[۱۳]

بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ی درخصوص بررسی عملکرد محفظه‌های آرامش در مقیاس‌های بزرگ و کاربردهای خاص (مانند محفظه‌ی آرامش توربین گاز دریایی با دبی جریان هوای ورودی بالا) با هدف معرفی روند طراحی آنها انجام نشده است. به نظر می‌رسد روند طراحی ارائه شده در این مقاله را می‌توان از دو منظر «افت فشار ایجاد شده در محفظه‌ی آرامش» و «میزان صدای تولید شده در اثر عبور جریان هوا از محفظه‌ی آرامش»، ابزار مناسبی برای طراحی این دسته از محصولات با کاربری خاص به شمار آورد. از سوی دیگر برای انجام تحلیل آنروآکوستیکی مسائل مختلف باید میدان جریان سیال را از دو جنبه‌ی «حل عددی میدان عددی جریان سیال (دینامیک سیالات محاسباتی)» و «حل عددی میدان آکوستیکی» مورد بررسی قرار داد. هزینه‌ی محاسبات این بررسی‌ها با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری موجود (نرم‌افزار فلونت)، به ویژه برای این کاربردهای خاص بسیار بالا خواهد بود. این در حالی است که در بررسی حاضر، سعی بر آن است تا با تغییر و معرفی ابزار جایگزین برای «حل عددی میدان آکوستیک»، هزینه‌ی محاسباتی حل مسئله را با دقت مناسبی کاهش دهیم.

۲. معادلات حاکم و معرفی پارامترها

۱.۲. طراحی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان

۱.۱.۲. المان‌های آکوستیکی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی با توجه به انواع المان‌هایی که در سیستم‌های کاهنده‌ی صوت به کار می‌رود^[۱۴] و نیز با در نظر گرفتن فضای موجود در شناور، از دو نوع المان مختلف برای استفاده در کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی استفاده می‌کنیم:

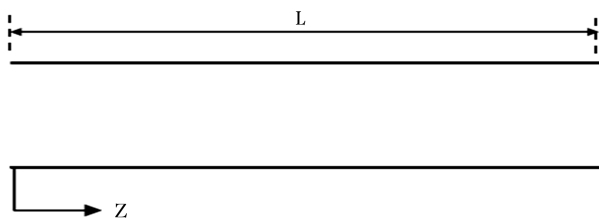
الف) المان نوع اول

این نوع المان معادل کانالی با سطح مقطع یکنواخت است (شکل ۲). با این فرض که در این نوع المان‌ها فقط امواج صفحه‌ی می‌توانند منتشر شوند، امپدانس آکوستیکی مخصوص در هر نقطه از میدان موج ایستاده چنین تعریف می‌شود:^[۱۴]

$$\xi(z) = \frac{p(z)}{v(z)} = Y_0 \frac{Ae^{-jk_0 z} + Be^{jk_0 z}}{Ae^{-jk_0 z} - Be^{jk_0 z}} \quad (1)$$

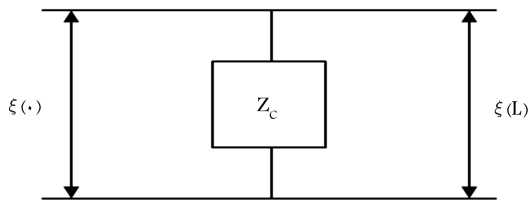
که در آن ξ امپدانس آکوستیکی مخصوص، p فشار آکوستیکی، v سرعت جرمی، Y_0 امپدانس آکوستیکی کانال، A و B عبارات نمایی وابسته به زمان و k_0 عدد موج است که از معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود:^[۱۴]

$$k_0 = \frac{\omega}{a_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

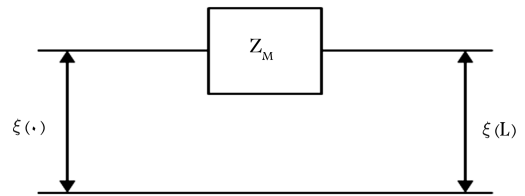


شکل ۲. نمای شماتیک المان نوع اول.

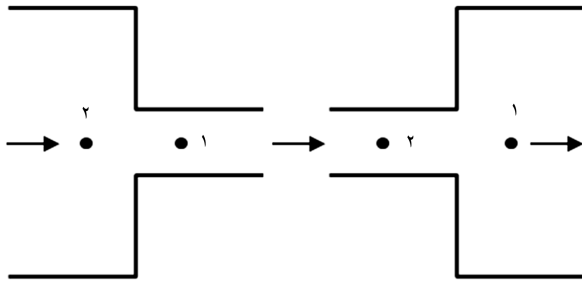
به‌منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی نویز حاصل از جریان در سیستم‌های کاهنده‌ی صدا، ساده‌سازی مدل عمومی سیستم و تعیین منابع اصلی تولید نویز در جریان سیال است.^[۴] پس از ساده‌سازی سیستم، تعیین روش مناسب به منظور پیش‌بینی نویز حاصل از جریان با توجه به ماهیت جریان از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است که در این راستا روش‌هایی برای جریان‌های فرسوت و در مقیاس سیستم‌های کوچک ارائه شده است.^[۴] برای بررسی عملکرد آکوستیکی سیستم‌ها در مقیاس بزرگ از سه روش سنتی شامل FEM^۱ و BEM^۲، روش ماتریس چهارقطبی، و روش سه‌نقطه‌ی استفاده می‌شود که بهترین روش برای مطالعه‌ی عملکرد آکوستیکی این نوع سیستم‌ها، روش FEM است. همچنین روش سه‌نقطه‌ی سریع‌ترین روش در بین این روش‌هاست که استفاده از آن نسبت به روش چهارقطبی ساده‌تر است.^[۵] عملکرد آکوستیکی محفظه‌ی انبساط به تغییرات سطح مقطع محفظه‌ی انبساط آن بستگی دارد، به‌گونه‌ی که با افزایش قطر محفظه‌ی انبساط، شدت افزایش پارامتر انتقال^۳ کاهش می‌یابد.^[۶] در محدوده‌ی پایین فرکانسی، مقادیر افت انتقال با نتایج حاصل از نظریه‌ی امواج صفحه‌ی برابر است ولی در محدوده‌ی فرکانس‌های بالاتر، مقادیر افت انتقال به‌صورت نمایی با مقادیر حاصل از نظریه‌ی امواج صفحه‌ی تغییر می‌کند که این خطا ناشی از انتشار امواج صوتی با مدهای مراتب بالاتر در فرکانس‌های بالاتر است.^[۸] علاوه بر این، شدت بازتاب امواج صفحه‌ی در فرکانس‌های پایین، هنگام برخورد با یک مانع فیزیکی بیشتر از امواج صفحه‌ی در فرکانس‌های بالاست که این امر سبب کاهش انتشار امواج صفحه‌ی از منابع تولید نویز در اثر تداخل و پیران‌گر امواج صفحه‌ی در فرکانس‌های پایین می‌شود.^[۹] در محفظه‌های انبساطی کوتاه، پدیده‌ی تشدید به‌صورت غیرمنتظره‌ی در فرکانس‌های پایین‌تر نسبت به فرکانس قطع اتفاق می‌افتد. بنابراین برای حذف مدهای ناپایدار، طول محفظه‌ی انبساط باید خیلی کوچک باشد.^[۱۰] در حالت کلی، نظریه‌ی امواج صفحه‌ی برای طول معادل محفظه‌ی زانویی شکل قابل قبول نیست.^[۱۱] در مافلر^۴‌های جریان برگشتی، در صورتی که طول محفظه‌ی انبساط نصف طول موج باشد، منحنی افت انتقال به کم‌ترین مقدار خود کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین مقدار افت انتقال، حتی بدون افزایش طول مافلر در فرکانس‌های پایین می‌تواند اتفاق بیفتد.^[۱۲] مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد آکوستیکی رزوناتور (لوله‌ی سوراخ‌کاری شده)، در حالت بدون اثرات عبور جریان، «تخلخل» است. همچنین برای رزوناتورهای کوتاه یا بلند، با افزایش تخلخل، فرکانسی که در آن کاهش اصلی نویز رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد. در حالتی که «اثرات عبور جریان» در نظر گرفته می‌شود، پارامترهای بیشتری بر عملکرد آکوستیکی رزوناتور مؤثر خواهد بود. در رزوناتورهای کوچک، افزایش تخلخل، فرکانس و دامنه پارامتر «کاهش نویز» اصلی را افزایش می‌دهد. در صورتی که در رزوناتورهای بلند، عملکرد آکوستیکی در محدوده‌ی فرکانسی مورد نظر کاهش می‌یابد. سرعت متوسط عبور



شکل ۴. مدار الکتریکی معادل انقباض کانال.



شکل ۳. مدار الکتریکی معادل انبساط کانال.



شکل ۵. نمای شماتیکی المان نوع دوم.

در این صورت فشار آکوستیکی و سرعت جرمی در هر دو سطح مقطع با هم برابر خواهد بود. [۱۴] این امر بدان معناست که:

$$p_1 = p_2 \quad (11)$$

$$v_1 = v_2 \quad (12)$$

و بنابراین:

$$\xi_2 = \frac{p_2}{v_2} = \frac{p_1}{v_1} = \xi_1 \quad (13)$$

به دلیل ثابت بودن مقادیر ξ ، v و p این نوع المان را نمی‌توان در مدار معادل الکتریکی نشان داد. با این وجود از نظر آکوستیکی، این تغییرات ناگهانی در سطح مقطع میانی فیلترهای پایین‌گذر روی می‌دهد.

۲.۲. تعیین هندسه سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی

سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی (محفظه‌ی انبساطی/مافلر) را به صورت سه المان نوع اول ($n = 3$) شامل المان‌های a ، b و c که به وسیله‌ی المان‌های نوع دوم (نقاط ۲ و ۳) به هم متصل شده‌اند، در نظر می‌گیریم. نمای شماتیکی دوبعدی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی و مدار معادل الکتریکی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.

۳.۲. معادلات آئرودینامیکی

در تحلیل آئرودینامیکی جریان درون سیستم کانال هوارسانی، دو معادله‌ی پیوستگی و اندازه‌ی حرکت حاکم بر حرکت سیال است. این معادلات به صورت معادله‌های ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شود، به طوری که در این روابط ρ چگالی سیال، u_i مؤلفه‌های سرعت جریان سیال، P فشار و v لزجت سینماتیکی سیال است. [۱۴]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (15)$$

و در آن a ، سرعت انتشار صوت در محیط انتشار موج، ω سرعت زاویه‌ی موج و λ طول موج است. با توجه به شکل ۲، برای امیدانس آکوستیکی مخصوص در ابتدا و انتهای کانال می‌توان نوشت: [۱۴]

$$\xi(0) = Y_0 \frac{A+B}{A-B} \quad (3)$$

$$\xi(L) = Y_0 \frac{Ae^{-jk \cdot L} + Be^{jk \cdot L}}{Ae^{-jk \cdot L} - Be^{jk \cdot L}} \quad (4)$$

که در آن L طول کانال است. با توجه به معادله‌های ۳ و ۴ می‌توان نوشت: [۱۴]

$$\xi(0) = \frac{\xi(L) \cos(k \cdot L) + jY_0 \sin(k \cdot L)}{j \left(\frac{\xi(L)}{Y_0} \right) \sin(k \cdot L) + \cos(k \cdot L)} \quad (5)$$

در فرکانس‌های پایین یا برای کانال‌های بسیار کوچک ($k \cdot L \ll 1$) داریم: [۱۴]

$$\cos(k \cdot L) \cong 1, \quad \sin(k \cdot L) \cong k \cdot L \quad (6)$$

بنابراین معادله‌ی ۵ را چنین بازنویسی می‌کنیم: [۱۴]

$$\xi(0) = \frac{\xi(L) + jY_0 k \cdot L}{j \left(\frac{\xi(L) k \cdot L}{Y_0} \right) + 1} + 1 \quad (7)$$

$$\xi(0) = \frac{\xi(L) + \frac{j\omega L}{S}}{j \left(\frac{\xi(L)\omega V}{a^2} \right) + 1} = \frac{\xi(L) + Z_M}{j(\xi(L)/Z_C) + 1} \quad (8)$$

در معادله‌ی فوق S سطح مقطع کانال، V حجم کانال، Z_M امیدانس کل کانال و $1/Z_C$ ادمیتانس کل کانال است. اگر $\xi(L) \ll Z_C$ آنگاه معادله‌ی ۵ را می‌توان چنین نوشت: [۱۴]

$$\xi(0) \cong \xi(L) + Z_M \quad (9)$$

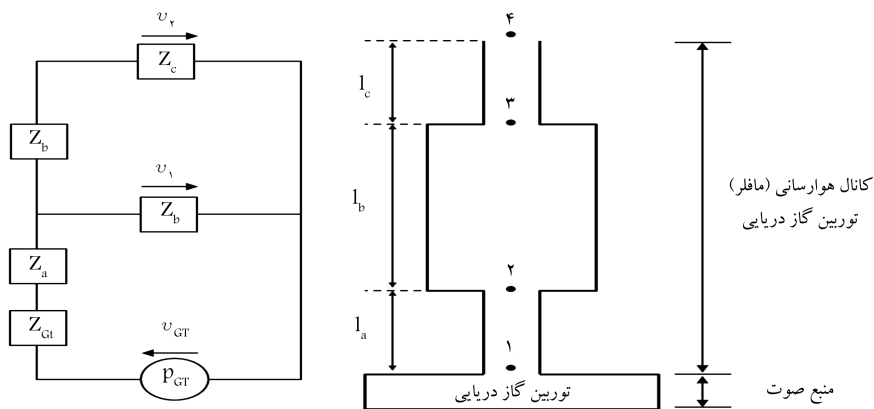
در این صورت مقاومت Z_M به صورت سری در مدار الکتریکی معادل کانال بسته خواهد شد (شکل ۳). این حالت در صورتی رخ می‌دهد که کانال به کانالی با سطح مقطع بزرگ‌تر از سطح مقطع خود متصل شده باشد. [۱۴] اگر $Z_M \ll \xi(L)$ باشد آنگاه معادله‌ی ۵ را می‌توان چنین نوشت: [۱۴]

$$\xi(0) \cong \frac{\xi(L) Z_C}{\xi(L) + Z_C} \quad (10)$$

در این صورت مقاومت Z_C به صورت موازی در مدار الکتریکی معادل کانال بسته خواهد شد (شکل ۴). این حالت در صورتی روی می‌دهد که کانال به کانالی با سطح مقطع کوچک‌تر از سطح مقطع خود متصل شده باشد. [۱۴]

(ب) المان نوع دوم

این نوع المان، معادل یک تغییر ناگهانی در سطح مقطع کانال است (شکل ۵). اگر ابعاد هر دو سطح مقطع چنان باشد که امواج صفحه‌ی در آنها منتشر شود،



شکل ۶. نمای شماتیکی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی و مدار معادل الکتریکی آن.

که در آن نانسور تغییر شکل برحسب سرعت‌های گردابه‌های بزرگ مطابق معادله‌ی ۲۱ تعریف می‌شود. [۱۶، ۱۵]

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

همچنین گردابه‌ی ویسکوزیته نیز برحسب اشل طولی مطابق معادله‌ی ۲۲ تعریف می‌شود: [۱۶، ۱۵]

$$v_t = l^2 |\bar{S}| \quad (22)$$

که:

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (23)$$

l اشل طولی مربوط به گردابه‌های کوچک است و به صورت ضریبی از ابعاد شبکه‌ی Δ براساس معادله‌ی ۲۴ تعریف می‌شود. [۱۶، ۱۵]

$$l = C_s \Delta \quad (24)$$

C_s (ثابت اسمگورینسکی) کنترل‌کننده‌ی مقدار تلاطم است و به نوع جریان وابسته است. این ضریب معمولاً بین ۰٫۰۶۵ الی ۰٫۲۵ به کار برده می‌شود که مقدار نظری آن برابر ۰٫۱۶ محاسبه شده است. [۱۵]

۴.۲. منابع تولید نویز

رابطه‌ی کلی مربوط به تولید و انتشار امواج آکوستیکی به صورت معادله‌ی ۲۵ است. [۱۸، ۱۷]

$$\frac{1}{a_s^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = q \quad (25)$$

که در آن q برابر با منابع تولید نویز و p' نوسانات فشار در جریان سیال است که به صورت $p' = p - p_0$ تعریف می‌شود (p_0 فشار در حالت تعادل سیال است). سه منبع اصلی تولید نویز عبارت است از: تولید جرم، تغییر مومنتوم و منابع غیرخطی همانند جریان مغشوش. البته منابع دیگری نظیر واکنش‌های شیمیایی و حرارتی از جمله منابع جدی تولید نویز هستند.

۱.۳.۲. نحوه‌ی به دست آوردن معادلات فیلتر شده‌ی گردابه‌های بزرگ در روش LES، هر متغیر جریان مثل f به دو مؤلفه‌ی فیلتر شده (\bar{f}) و نوسانی (f') تقسیم می‌شود. [۱۷-۱۵]

$$f(x, t) = \bar{f}(x, t) + f'(x, t) \quad (16)$$

f می‌تواند هر یک از متغیرهای جریان باشد. \bar{f} بخشی از f است که حل می‌شود و شامل گردابه‌هایی است که ابعادشان بزرگ‌تر از ابعاد شبکه، یعنی قسمت فیلتر شده‌ی متغیرهای جریان است.

f' هم بخشی از متغیر f است که مدل می‌شود و مربوط به گردابه‌های جریان متلاطم است که ریزتر از ابعاد شبکه‌اند و شبکه‌ی حل نمی‌تواند آنها را بگیرد. برای به دست آوردن معادلات جریان برای گردابه‌های بزرگ، با استفاده از انتگرال‌گیری معادلات حاکم بر جریان برحسب ابعاد هندسی کوچک و فیلتر کردن معادلات جریان در فرکانس‌های بالا در فضای فوریه، گردابه‌های کوچک جریان جدا خواهد شد.

۲.۳.۲. معادلات ناویر - استوکس فیلتر شده در حالت تراکم‌ناپذیر

با فیلتر کردن معادلات ناویر - استوکس و جدا کردن گردابه‌های بزرگ و کوچک، معادلات فیلتر شده یا همان معادلات گردابه‌های بزرگ چنین ارائه خواهد شد. [۱۶، ۱۵]

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

معادله‌ی مومنتوم:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (18)$$

که در آن عبارت τ_{ij} معرف خواص گردابه‌های ریز است و چنین تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (19)$$

۳.۳.۲. مدل اسمگورینسکی

در این مدل با توجه به فرضیه بوزینسک^۵، قسمت غیر آیزوتروپیک تنش τ_{ij} توسط یک ویسکوزیته‌ی متلاطم به میدان کرنش بزرگ (S_{ij}) براساس معادله‌ی ۲۰ ارتباط پیدا می‌کند و بخش باقی‌مانده و آیزوتروپیک تنش ($1/3 \tau_{kk}$) در جمله‌ی فشار قرار داده می‌شود. [۱۶، ۱۵]

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \nu_t \bar{S}_{ij} \quad (20)$$

۵.۲. تحلیل لایتهیل

معادله موج غیرهمگن لایتهیل، برای نوسانات چگالی مطابق معادله ۲۶ آورده شده است: [۱۸،۱۷]

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (26)$$

که در آن ρ' نوسانات چگالی است که به صورت $\rho' = \rho - \rho_0$ تعریف می‌شود (ρ_0 ، چگالی در حالت تعادل سیال است). همچنین T_{ij} تانسور تنش لایتهیل است که از معادله ۲۷ به دست می‌آید. [۱۸،۱۷]

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} (p' - a_0^2 \rho') - \tau_{ij} \quad (27)$$

با این فرض که ما منابع محدودی از نوز در اختیار داریم و همه‌ی این منابع در سیال یکنواخت و راکد که سرعت صوت در آن برابر a_0 است، قرار دارند و امواج به صورت همسان‌گرد منتشر می‌شوند، امواجی را که شنونده در داخل سیال، در نقطه‌ی x و در زمان t می‌شنود، می‌توان با توجه به معادله ۲۸ توضیح داد. [۱۸،۱۷]

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial x_i} - \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (28)$$

اولین عبارت معادله ۲۸ معرف منبع تک‌قطبی^۶ است که معمولاً در ماشین‌های دوار وجود دارد و «ضخامت نوز» نیز نامیده می‌شود و جابه‌جایی سیال توسط پره‌های ماشین دوار را بیان می‌کند. این ترم نشان می‌دهد که اگر نرخ جریان جرمی در حالت ناپایا تغییر کند، نوز تولید می‌شود. اگر سرعت چرخش پره‌ها کم یا ضخامت آنها نازک باشند، منابع تک‌قطبی سهم ناچیزی در تولید نوز خواهند داشت.

دومین ترم معادله ۲۸ معرف منبع دوقطبی^۷ است که بیان می‌دارد اگر در زمان‌های مختلف، نیروهای بر سیال وارد شوند «نوز» تولید می‌شود. برای سطوح ثابت (مانند کانال) این بارگذاری‌های ناپایدار سطح منجر به تولید منابع دوقطبی ساکن می‌شود. در صورتی که در سطوح چرخان (چرخش یک فن در جریان سیال) منجر به تولید منبع دوقطبی چرخان خواهد شد. در هر دو حالت هنگامی که جریان ذاتاً فروصوت باشد، انتظار می‌رود که منابع غالب در تولید صوت، منابع دوقطبی باشند. سومین ترم معادله ۲۸، معرف منبع چهارقطبی^۸ است که مربوط به اثرات غیرخطی (تنش‌های وابسته به زمان شامل مومنتوم، ویسکوزیته و توربولانس) است و در واقع جریان مغشوش می‌تواند منشأ اثر آن باشد. برای ماشین‌های دوار فروصوت، از اثر منابع چهارقطبی صرف‌نظر می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که خروج جرم سیال با چگالی ثابت منبع نوز نخواهد بود. همچنین ثابت بودن نیروی وارد شده به سیال نیز هیچ نوزی تولید نمی‌کند. [۱۸،۱۷]

۱.۵.۲. معادله‌ی انتگرالی لایتهیل

روش اصلی که توسط لایتهیل برای حل معادله‌ی غیرهمگن موج پیشنهاد شده است، منجر به فرمولی انتگرالی می‌شود. این روش بر پایه‌ی استفاده از تابع گرین در دامنه‌ی نامتناهی^۹ است. با استفاده از این روش، فرمول نهایی برای حل معادله ۲۶ چنین است: [۱۸،۱۷]

$$\rho'(x, t) = \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{a_0})}{|x-y|} dy \quad (29)$$

که در آن Ω دامنه‌ی انتگرال‌گیری روی حجمی است که توربولانس در آنجا باعث تولید نوز می‌شود. این دامنه باید تمامی منابع تولید نوز را پوشش دهد. x بردار مکان

گیرنده‌ی نوز، y بردار مکان منبع نوز و a_0 سرعت صوت است. با حل معادله‌ی انتگرالی ۲۹، نوسانات چگالی برای گیرنده‌ی نوز در مکان x و در زمان t حاصل می‌شود.

۲.۵.۲. مدل فوز ویلیام هاوکینگز^{۱۰}

در معادله‌ی انتگرالی لایتهیل، فرض بر این است که هیچ‌گونه صفحه‌ی جامدی در جریان سیال وجود ندارد و اگر هم وجود داشته باشد، از اثر آن صرف‌نظر می‌شود. از این رو فوز ویلیام هاوکینگز، فرمول لایتهیل را در حالتی که صفحات جامد در جریان وجود دارند، گسترش دادند که به فرمول FW-H در آنرواکوستیک معروف شد: [۱۸،۱۷]

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 \bar{T}_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_0 v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \quad (30)$$

بیان انتگرالی معادله‌ی FW-H برای نوسانات چگالی مطابق معادله ۳۱ است: [۱۸،۱۷]

$$\rho'(x, t) = \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{a_0})}{|x-y|} dy - \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int \frac{P_{ij} n_j(y, t - \frac{|x-y|}{a_0})}{|x-y|} dy + \frac{1}{4\pi a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int \frac{\rho_0 v_n}{|x-y|} dy \quad (31)$$

در معادله‌ی انتگرالی ۳۱، علاوه بر توربولانس جریان، نوسانات فشار و اثرات حرکت صفحات صلب موجود در جریان نیز به عنوان منابع نوز در نظر گرفته می‌شود.

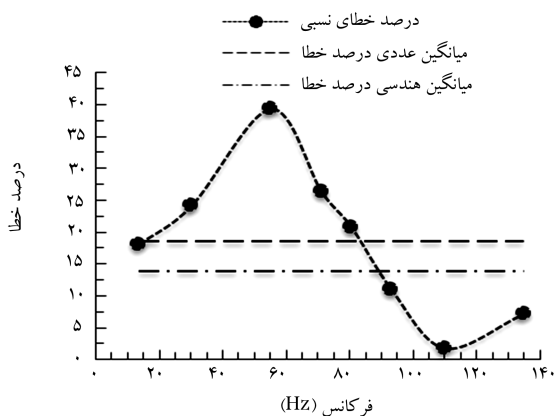
۳. شبیه‌سازی

۱.۳. مدل‌سازی و شرایط مرزی

در این مدل‌سازی، سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی از نظر الزامات آنرویدینامیکی و آکوستیکی به ازای مقادیر مختلف نسبت مساحت ورودی/خروجی به مساحت محفظه‌ی آرامش کانال مورد بررسی قرار می‌گیرد. می‌دانیم که وظیفه‌ی یک سیستم کانال هوارسانی عبارت است از «انتقال هوا از محیط اطراف به فضای مورد نظر». برای حسن انجام این وظیفه، طرح سیستم باید در چارچوب امکانات موجود و با تعریف دستورالعمل‌هایی برای حدود افت فشار، سرعت و سطح صدا... انجام گیرد. دبی هوای مورد نیاز برای یک توربین گاز دریایی مشخص^{۱۱} معادل ۶۶ کیلوگرم بر ثانیه است که در اثر مکش کمپرسور توربین گاز، این مقدار دبی از هوای اتمسفری اطراف شناور از طریق سیستم کانال هوارسانی به موتور توربین گاز می‌رسد. بنابراین، شرط مرزی ورودی را «دبی جریان ورودی^{۱۲}» می‌نامیم. از آنجا که هیچ‌گونه اطلاعی از شرایط جریان در خروجی کانال نداریم، شرط مرزی خروجی را شرط جریان خروجی^{۱۳} انتخاب می‌کنیم. برای دیواره‌های کانال هم شرط مرزی دیواره^{۱۴} را تعریف می‌کنیم.

۲.۳. روش عددی

قبل از این که محاسبات آکوستیکی را شروع کنید، حل عددی گذرای جریان با استفاده از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی باید اجرا شده، و به یک حالت



شکل ۹. درصد خطای نتایج عددی نسبت به داده‌های تجربی در فرکانس‌های مختلف.

توجه به شکل ۸ بیشترین میزان خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی در فرکانس‌های پایین معادل ۴/۵ دسی‌بل است که در فرکانس ۵۵ هرتز رخ می‌دهد. در شکل ۹ درصد میزان خطای نتایج عددی نسبت به داده‌های تجربی نشان داده شده است. همچنین روی محور عمودی درصد خطای نسبی نتایج عددی نسبت به داده‌های تجربی، میانگین عددی و میانگین هندسی درصد خطا و روی محوری افقی فرکانس برحسب هرتز نشان داده شده است.

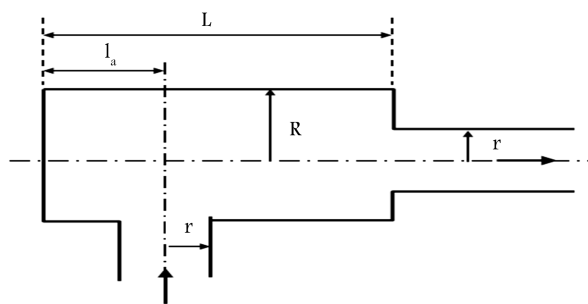
مطابق شکل ۹ به نظر می‌رسد با توجه به نوع جریان (جریان مغشوش)، ماهیت تصادفی و مدل‌های جریان مغشوش، دقت در کل بازه فرکانسی مورد مطالعه در همین محدوده باشد. از سوی دیگر محدوده فرکانسی مورد مطالعه با توجه به اهمیت آن در کاربردهای دریایی (زیرسطحی) انتخاب شده و ممکن است دقت مدل ارائه شده در فرکانس‌های بالاتر افزایش یابد.

۴. نتایج

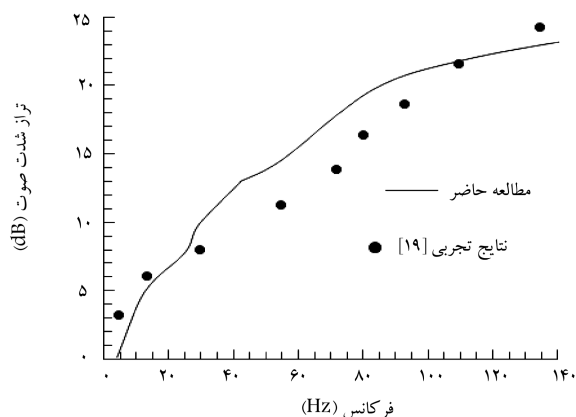
۱.۴. روش طراحی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی

برای طراحی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی چنین عمل می‌کنیم:

۱. انتخاب المان‌های آکوستیکی سیستم هوارسانی با توجه به ساختمان شناور و عملکرد توربین گاز دریایی (بخش ۲.۲.۱)؛
۲. تعیین طول المان‌های آکوستیکی سیستم هوارسانی، بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان در شرایط عملکرد تمام بار^{۱۹} توربین گاز دریایی به منظور جلوگیری از پدیده‌ی تشدید^{۲۰} و با توجه به طول کل سیستم کانال هوارسانی؛
۳. تعیین شکل هندسی و اندازه‌ی سطح مقطع المان‌های (ورودی و خروجی) آکوستیکی سیستم هوارسانی با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان، و با توجه به استانداردهای دریایی و عدد ماخ جریان عبوری از سیستم و میزان افت فشار حاصل از آن؛
۴. تعیین اندازه‌ی مناسب سطح مقطع مهم‌ترین المان آکوستیکی (المان محفظه‌ی آرامش) با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان و با توجه به الزامات آئروپنایمیک و آکوستیکی سیستم کانال هوارسانی؛
۵. بررسی عملکرد آکوستیکی سیستم کانال هوارسانی بدون در نظر گرفتن اثرات



شکل ۷. نمای شماتیکی مدل مورد مطالعه‌ی مانجال و همکارانش.



شکل ۸. مقایسه‌ی پارامتر افت انتقال محفظه‌ی انبساطی حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی.

پایا رسیده باشد (یعنی حل هم‌گرا شده باشد). این بدان معناست که میدان جریان ناپایا تحت ملاحظاتی شامل همه‌ی متغیرهای اصلی جریان کاملاً توسعه یابد، به طوری که با گذشت زمان تغییری در آن ایجاد نشود. روش‌های متوسط‌گیری^{۱۵}، مستقیم^{۱۶} و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^{۱۷}، همگی انتخاب‌هایی برای حل گذرای جریان هستند که در این شبیه‌سازی از روش گردابه‌های بزرگ استفاده می‌کنیم ($y^+ < ۱$). یک روش مرسوم برای به دست آوردن این حل (حل گذرای جریان)، استفاده از حل حالت دائم^{۱۸} به عنوان حدس اولیه است. حل از این حدس اولیه شروع شده و با گذشت زمان ادامه می‌یابد. در این شبیه‌سازی برای حل حالت دائم و تحلیل آئروپنایمیک سیستم کانال هوارسانی، با توجه به هندسه‌ی سطح مقطع کانال از مدل اغتشاشی $\epsilon - k$ و از نرم‌افزار تجاری FLUENT ۶/۳ استفاده می‌کنیم.

۳.۳. اعتبارسنجی

در این قسمت برای تصدیق و صحت‌گذاری فرایند شبیه‌سازی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی، از نتایج یک مطالعه‌ی تجربی که روی یک محفظه‌ی انبساط با سطح مقطع دایره‌شکل انجام شده، استفاده می‌کنیم. در این تحقیق، مانجال و همکارانش به صورت تجربی عملکرد آکوستیکی محفظه‌ی انبساطی را با یک ورودی و یک خروجی که از آن جریانی با عدد ماخ ۰/۱ عبور می‌کند مطالعه کردند.^[۱۹] نمای شماتیکی محفظه‌ی انبساط در شکل ۷ نشان داده شده است که در آن $R = ۰/۰۶۱$ (m)، $R/r = ۵$ ، $l_a = ۰/۱۵$ (m) و $L = ۰/۳$ (m) است. پس از انجام فرایند شبیه‌سازی، نتایجی حاصل شد که می‌توان آن‌ها را در شکل ۸ مشاهده کرد. در این شکل، بر محور عمودی پارامتر عملکرد آکوستیکی افت انتقال برحسب دسی‌بل و بر محوری افقی فرکانس برحسب هرتز نشان داده شده است. با

کانال هستند. به عبارت دیگر، اگر فرکانس به اندازه‌ی کافی کوچک باشد، فقط امواج صوتی صفحه‌یی را می‌توان در کانال منتشر کرد. یعنی: [۱۳]

$$f < \frac{\pi a_0}{\sqrt{84}D} (1 - M^2)^{0.5} \quad (34)$$

با توجه به استانداردهای دریایی و معیارهای آنرودینامیکی، سطح مقطع المان‌های محفظه‌ی انبساطی را به صورت دایروی انتخاب می‌کنیم. [۲۰] از طرفی هرچه اندازه‌ی سرعت جریان عبوری از کانال بیشتر باشد، نوبز بیشتری تولید خواهد کرد. علاوه بر این میزان افت فشار در جریان‌های مغشوش با U^n متناسب است که $2 \leq n \leq 1.78$. [۲۱] بنابراین، اندازه‌ی شعاع سطح مقطع کانال (المان‌های a و c) را با توجه به معیارهای فوق، کاهش عدد ماخ جریان عبوری از کانال $M < 0.3$ و میزان فضای موجود در شناور، با هم یکسان و برابر با ۱ متر تعیین می‌کنیم.

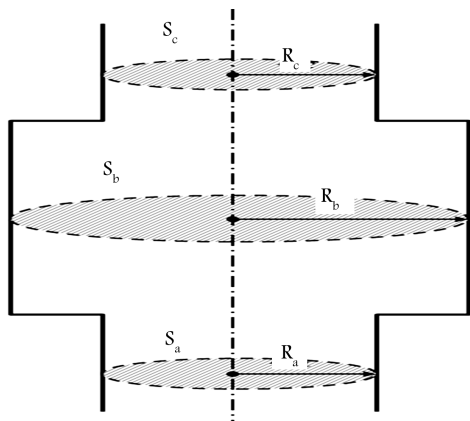
۳.۴. تعیین اندازه‌ی سطح مقطع محفظه‌ی آرامش سیستم کانال

هورسانی به توربین گاز دریایی با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان تغییر ناگهانی در سطح مقطع کانال هورسانی از لحاظ آنرودینامیکی سبب افت شدید فشار در جریان سیال و از لحاظ آکوستیکی سبب بهبود و افزایش خاصیت میرایی سیستم کانال هورسانی خواهد شد. در شکل ۱۱ نمای شماتیک سطح مقطع المان‌های مختلف تشکیل دهنده‌ی سیستم کانال هورسانی به توربین گاز دریایی نمایش داده شده است.

در این مرحله از طراحی با استفاده از فرایند شبیه‌سازی، مناسب‌ترین مقدار نسبت مساحت $m = S_b/S_a$ را که از لحاظ آکوستیکی بیشترین عملکرد و از لحاظ آنرودینامیکی کم‌ترین میزان افت فشار در جریان هوای عبوری را ایجاد می‌کند، تعیین می‌کنیم.

حل عددی برای پنج مقدار نسبت مساحت انجام شد و در هر حالت علاوه بر تعیین مقدار افت فشار سیستم کانال هورسانی، میزان سطح فشار صوت 22 در نقطه‌ی آزمون که در فاصله‌ی ۶ متری از محور تقارن کانال و در فاصله‌ی ۴ متری از ورودی کانال قرار دارد، اندازه‌گیری شد (شکل ۱۲). افت فشار سیستم و اندازه‌ی فشار صوت در نقطه‌ی آزمون به‌ازای مقادیر مختلف m در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

در شکل ۱۳ بر محور عمودی کمیت‌های افت فشار سیستم کانال برحسب کیلوپاسکال و تراز شدت صوت برحسب دسی‌بل در نقطه‌ی آزمون، و بر محور



شکل ۱۱. نمای شماتیک سطح مقطع المان‌های سیستم کانال هورسانی به توربین گاز دریایی.

عبور جریان (شرایط راه‌اندازی^{۲۱} توربین - گاز دریایی) و نیز با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان (شرایط تمام بار توربین گاز دریایی).

۲.۴. مشخصات هندسی سیستم کانال هورسانی به توربین گاز

دریایی بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان

نمای شماتیک طول المان‌های سیستم کانال هورسانی به توربین گاز دریایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. فرکانس امواج صوتی که ممکن است در سیستم کانال هورسانی منتشر شوند، بستگی دارد به فرکانس منبع مولد آنها، یعنی جریان هوایی که به وسیله‌ی مکش کمپرسور توربین گاز دریایی از کانال عبور می‌کند. با توجه به دور موتور شرایط مختلف کاری توربین گاز دریایی، میانگین فرکانس‌های امواج صوتی که در سیستم کانال هورسانی منتشر می‌شود (فرکانس غالب)، در حالت پایدار و تمام بار برابر با ۲۳ هرتز است. طول المان‌های محفظه‌ی انبساط (سیستم کانال هورسانی) تأثیر زیادی بر عملکرد آکوستیکی آنها دارد. به عنوان یک معیار کلی در طراحی، هنگامی که طول المان مضرب فردی از یک‌چهارم طول موج صوتی باشد، از وقوع پدیده تشدید جلوگیری می‌شود و بیشترین میرایی آکوستیکی توسط المان انجام می‌گیرد (معادله‌ی ۳۲). [۱۰]

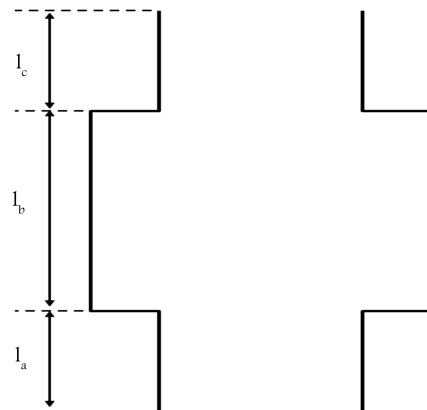
$$l_e = \frac{n}{4} = \frac{na_0}{4f} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (32)$$

با توجه به مقدار متوسط فرکانسی که در سیستم کانال هورسانی منتشر می‌شود، طول مناسب برای هر کدام از المان‌ها عبارت است از:

$$l_e = \left(\frac{346}{4 \times 23} \right) n = \frac{76}{3n} \cong 4n \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (33)$$

با توجه به معادله‌ی ۳۳ و با در نظر گرفتن این نکته که مهم‌ترین المان سیستم هورسانی به توربین گاز دریایی المان b است، طول آن را باید مضرب فردی از ۴ متر در نظر گرفت. از سوی دیگر با توجه به ساختمان سازه‌یی شناور، بیشترین طول سیستم کانال حدوداً ۸ متر است. بنابراین طول المان b را ۴ متر انتخاب می‌کنیم. در این صورت طول دو المان دیگر با فرض این که طول‌های یکسانی داشته باشند، ۲ متر خواهد بود.

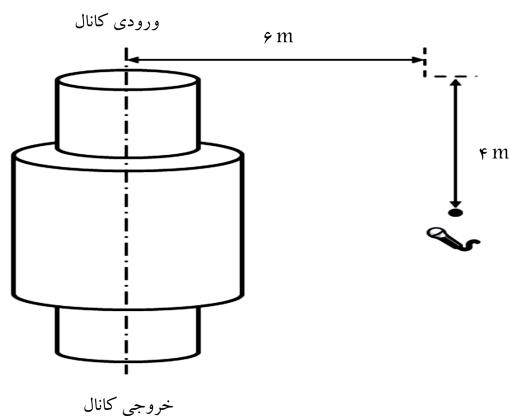
اندازه‌ی سطح مقطع و سرعت انتشار صوت در کانال هورسانی از پارامترهای تأثیرگذار بر فرکانس و چگونگی انتشار امواج صوتی با مدهای مرتب بالاتر در درون



شکل ۱۰. نمای شماتیک طول المان‌های سیستم کانال هورسانی به توربین گاز دریایی.

قبول است که در این حالت افت فشار تأثیر قابل توجهی در عملکرد توربین گاز نخواهد داشت. بنابراین در این طراحی با توجه به مطالبی که بیان شد و همچنین با در نظر گرفتن محدودیت‌های شدید فضایی در شناورها به ویژه شناورهای نظامی، نسبت مساحت سیستم کانال را برابر با ۲ انتخاب می‌کنیم. در نتیجه سطح مقطع المان b ، $۶٫۲۸$ متر مربع و قطر آن $۲٫۸۳$ متر خواهد بود.

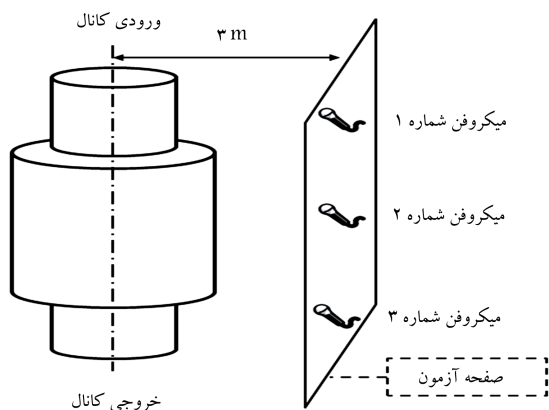
با توجه به اندازه‌ی سطح مقطع المان b ، متوسط عدد ماخ جریان عبوری از این المان $۰٫۲۵$ و فرکانس مد $(۰, ۰)$ آن $۲۰۸٫۷$ هرتز است که بسیار بزرگ‌تر از متوسط فرکانس غالب بر سیستم است. بنابراین می‌توان گفت که در این المان بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان، فقط امواج صفحه‌ی قابلیت انتشار خواهند داشت.



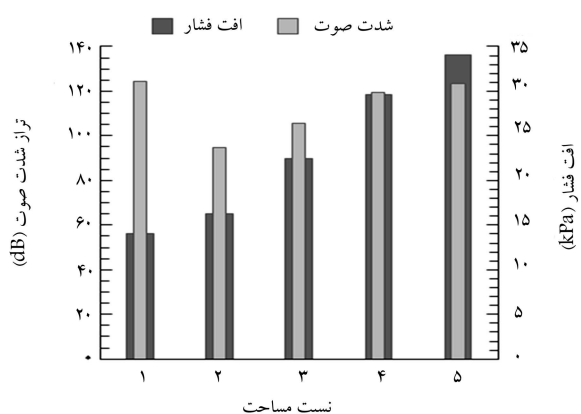
شکل ۱۲. محل نقطه‌ی آزمون در مرحله‌ی مطالعه روی اندازه‌ی سطح مقطع محفظه‌ی آرامش سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی.

۴.۴. بررسی عملکرد آکوستیکی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان

محیط دریا نسبت به محیطی که ما در آن زندگی می‌کنیم از نظر میزان تولید سروصدا بسیار آرام و پایدارتر است و خاصیت میرایی و جذب نویز بالایی دارد، به طوری که برد صداهایی که در فرکانس‌های بالا در محیط دریا تولید و منتشر می‌شوند، نسبت به فرکانس‌های پایین بسیار کوچک است. از این رو شناورهای زیرسطحی از فرکانس‌های پایین برای ارتباط، شناسایی و... استفاده می‌کنند که به آن «فرکانس سونار ۲۳» می‌گویند.^[۲۲] بنابراین ما نیز محدوده‌ی فرکانسی مورد مطالعه‌ی خود را به محدوده‌ی فرکانس‌های سونار (۱ تا ۱۰۰ هرتز) که در محیط دریا از نظر نظامی اهمیت دارد و رادار زیردریایی‌ها قادر به شناسایی آن هستند، محدود می‌کنیم. در این قسمت از طراحی، عملکرد آکوستیکی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی را در محدوده‌ی فرکانسی ۱ تا ۱۰۰ هرتز و به طور خاص در فرکانس ۲۳ هرتز به منظور بررسی انتشار امواج صفحه‌ی در آن، مورد مطالعه قرار می‌دهیم. برای بررسی عملکرد سیستم کانال هوارسانی در فرکانس غالب، با توجه شکل هندسی سیستم کانال هوارسانی، مکان هندسی قرارگیری گیرنده‌ها (موقعیت میکروفن‌ها) را روی صفحه‌ی به طول ۸ متر (طول کانال) و عرض ۴ متر که در فاصله‌ی ۳ متری از صفحه‌ی تقارن آن قرار دارند، در نظر می‌گیریم. همچنین برای تعیین عملکرد آکوستیکی هر یک از المان‌های سیستم کانال در سایر فرکانس‌ها از میکروفن‌های ۱ و ۲ و ۳ که در وسط طول هر المان و روی صفحه‌ی گیرنده‌ها قرار دارند، استفاده می‌کنیم (شکل ۱۴).



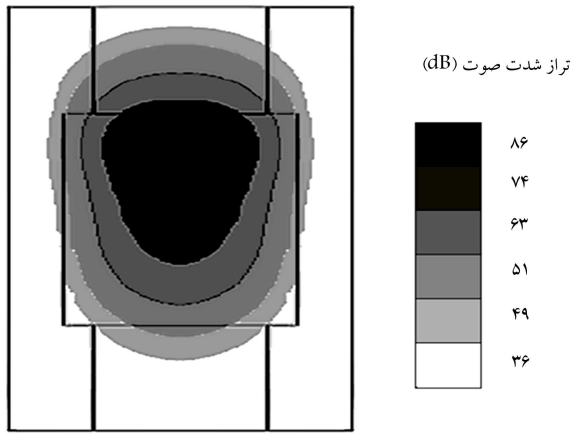
شکل ۱۴. موقعیت گیرنده‌های صوتی اطراف سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی (صفحه آزمون).



شکل ۱۳. افت فشار سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی و اندازه‌ی فشار صوت در نقطه‌ی آزمون به ازای مقادیر مختلف نسبت مساحت.

افقی مقادیر مختلف نسبت مساحت انبساطی (با انقباضی) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت مساحت، میزان افت فشار سیستم کانال افزایش و میزان سطح فشار آکوستیکی در نقطه‌ی آزمون ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت مساحت، قدرت گردابه و شدت جدایش جریان در محل افزایش ناگهانی، سطح مقطع به شدت افزایش یافته و محدوده‌ی گسترده‌تری از میدان جریان سیال را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد که سبب افزایش اندازه‌ی نوسانات فشاری نسبت به فشار متوسط محیط درون کانال هوارسانی می‌شود. افزون بر این در محل کاهش ناگهانی سطح مقطع، نواحی مرده با گردابه‌های بزرگ‌تر و شدت اغتشاش بالا گسترش خواهد یافت و انرژی بیشتری از جریان هوا جذب خواهد کرد که سبب کاهش قابلیت انجام کار (فشار) جریان هوا می‌شود. در مقادیر کوچک نسبت مساحت ($۱ < m < ۳$)، اندازه‌ی گردابه‌ها در المان b نسبت به حالتی که سیستم کانال هوارسانی فاقد این المان باشد، کوچک‌تر بوده و در نتیجه نویز کم‌تری تولید می‌شود. علاوه بر این، چون این انتشار امواج به صورت آنی و تصادفی است، بر اثر تداخل و برن‌گر این امواج کسری از قدرت آنها خنثی می‌شود. با افزایش نسبت مساحت ($m \geq ۳$)، اندازه و قدرت گردابه‌ها در المان b و به تبع آن میزان اغتشاش جریان افزایش می‌یابد که سبب انتشار امواج صوتی با قدرت بالاتری می‌شوند.

در طراحی کانال‌ها -- به ویژه داکت‌ها برای توربین‌های گازی -- بیشترین افت فشار مجاز کانال هوارسانی به صورت تقریبی در محدوده‌ی ۱۵ کیلوپاسکال قابل



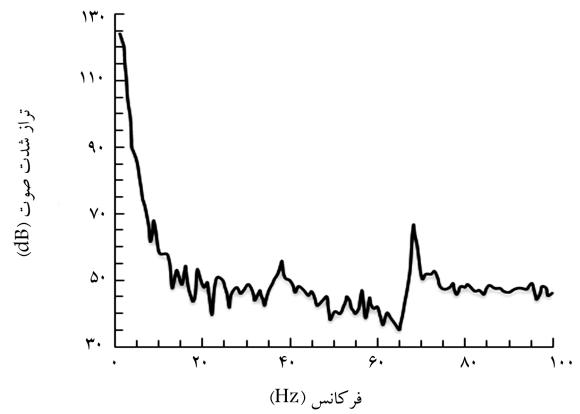
شکل ۱۸. کانتور تراز شدت صوت در صفحه‌ی آزمون با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان از سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی.

ابتدا افزایش و سپس به مقدار کم‌تری از مقدار آن در ورودی کانال کاهش می‌یابد. این امر بدان علت است که با پیشروی جریان درون کانال، با تغییر ناگهانی سطح مقطع کانال، به لایه‌ی مرزی و همچنین گردابه‌های اغتشاشی موجود در جریان سیال اجازه‌ی رشد داده نمی‌شود. در نتیجه میانگین تراز شدت صوت در ورودی کانال (میکروفن ۱) کاهش می‌یابد. با ورود جریان به محفظه‌ی آرامش، سرعت متوسط جریان کاهش و در گوشه‌های محفظه‌ی آرامش گردابه‌های نسبتاً ضعیفی تولید می‌شود که سبب افزایش میانگین تراز شدت صوت در وسط کانال (میکروفن ۲) می‌شود. با ورود جریان به قسمت انتهایی کانال، سرعت متوسط جریان افزایش و لبه‌های نوک تیز سبب جدایش جریان در این قسمت می‌شوند که با توجه به تقارن شکل هندسی، قدرت این جدایش کوچک بوده و سبب میرایی گردابه‌ها با اندازه‌ی بزرگ‌تر می‌شود. در نتیجه میانگین تراز شدت صوت در خروجی کانال (میکروفن ۳) نسبت به ورودی کانال (میکروفن ۱) به میزان ۲۰ دسی‌بل کاهش می‌یابد.

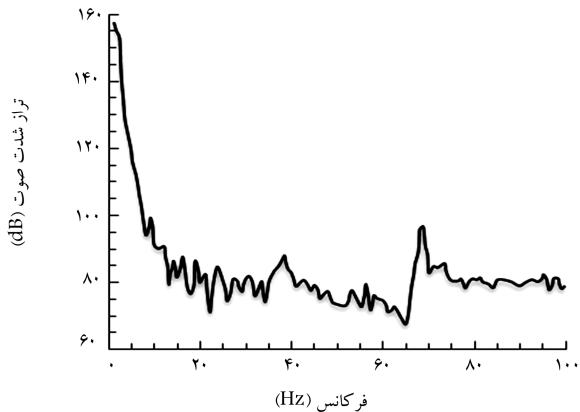
۵.۴. بررسی عملکرد آکوستیکی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی در فرکانس غالب سیستم با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان

در بخش‌های ۱.۴ و ۲.۴ بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان و با فرض این که در کانال هوارسانی فقط امواج صفحه‌ی منتشر می‌شود، به تعیین ابعاد هندسی کانال در فرکانس غالب سیستم پرداختیم. در این قسمت امواج صوتی منتشره در سیستم کانال هوارسانی با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان از آن مطالعه و بررسی می‌شود.

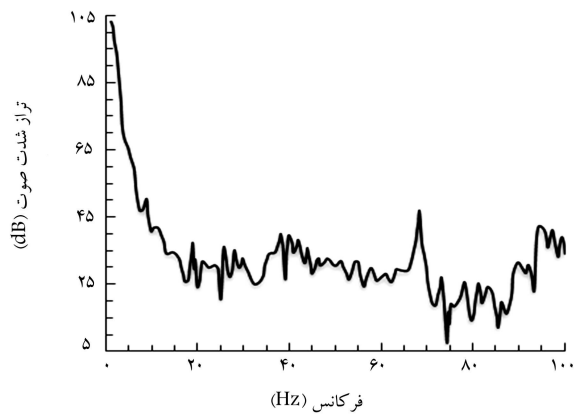
کانتور تراز شدت صوت در صفحه‌ی آزمون و در فرکانس ۲۳ هرتز، در شکل ۱۸ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان، انحراف از حالت انتشار امواج صفحه‌ی در سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی وجود دارد که این امر به دلیل اثرات عبور جریان از سیستم کانال و همچنین اثر منابع چهارقطبی در تولید نویز است که سبب ایجاد مدهایی با مراتب بالاتر در سیستم کانال هوارسانی می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن اثرات عبور جریان از سیستم کانال، امواج صوتی به صورت امواج صفحه‌ی در سیستم منتشر نخواهند شد.



شکل ۱۵. تراز فشار صوت در اطراف ورودی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی (میکروفن ۱).



شکل ۱۶. تراز فشار صوت در اطراف محفظه‌ی آرامش سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی (میکروفن ۲).



شکل ۱۷. تراز فشار صوت در اطراف خروجی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی (میکروفن ۳).

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، نمودار تراز شدت صوت نسبت به فرکانس به ترتیب در میکروفن‌های ۱ و ۲ و ۳ نمایش داده شده است. در نمودار این شکل‌ها روی محور عمودی، تراز شدت صوت برحسب دسی‌بل و روی محور افقی، فرکانس برحسب هرتز نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود میانگین تراز شدت صوت با پیشروی در امتداد محور کانال هوارسانی از ورودی به سمت خروجی آن،

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور ارائه روشی برای بررسی عملکرد آکوستیکی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی، برای یافتن حالت مناسبی بین عملکرد آکوستیکی و آئرو دینامیکی کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی انجام شده است. بر این اساس:

ابتدا با توجه به الزامات آئرو دینامیکی و آکوستیکی، سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی به سه قسمت ورودی، محفظه آرامش و خروجی کانال با سطح مقطع دایروی تعیین شد و با استفاده از نظریه امواج صفحه‌یی درون کانال، بدون در نظر گرفتن اثرات عبور جریان و همچنین با در نظر گرفتن محدودیت‌های فضایی درون شناور، ابعاد هندسی قسمت‌های ورودی و خروجی کانال در فرکانس غالب سیستم (۲۳ هرتز)، محاسبه شد. سپس با استفاده از روش‌های عددی، اندازه‌ی مناسب سطح مقطع میانی کانال (محفظه آرامش) هم از نظر آئرو دینامیکی و هم از نظر آکوستیکی بررسی و تعیین شد. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش سطح مقطع محفظه آرامش نسبت به سطح مقطع ورودی یا خروجی کانال، عملکرد آئرو دینامیکی سیستم کانال کاهش (افزایش افت فشار) می‌یابد و عملکرد آکوستیکی آن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

به منظور تعیین پیکربندی مناسب برای سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی با توجه به این که موتورخانه‌ی شناور در طبقات ۲۴ پایین شناور قرار دارد و در نتیجه بخش اعظمی از قسمت انتهایی کانال هوارسانی همواره در زیر ذخیره‌ی بویانسی^{۲۵} شناور (در زیر سطح آب دریا) قرار خواهد گرفت و نیز با توجه به این که

هدف از این طراحی، تولید و انتشار کم‌ترین میزان نویز ناشی از عبور جریان هوا از سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی برای جلوگیری از شناسایی شناور توسط امواج سونار شناورهای زیرسطحی دشمن است، پیکربندی سیستم کانال هوارسانی به توربین گاز دریایی در حالت نسبت انبساط $m = 2$ که در آن کم‌ترین تراز شدت صوت در اطراف خروجی کانال نسبت به بقیه حالت‌ها اتفاق می‌افتد، برای این کاربرد توصیه می‌شود.

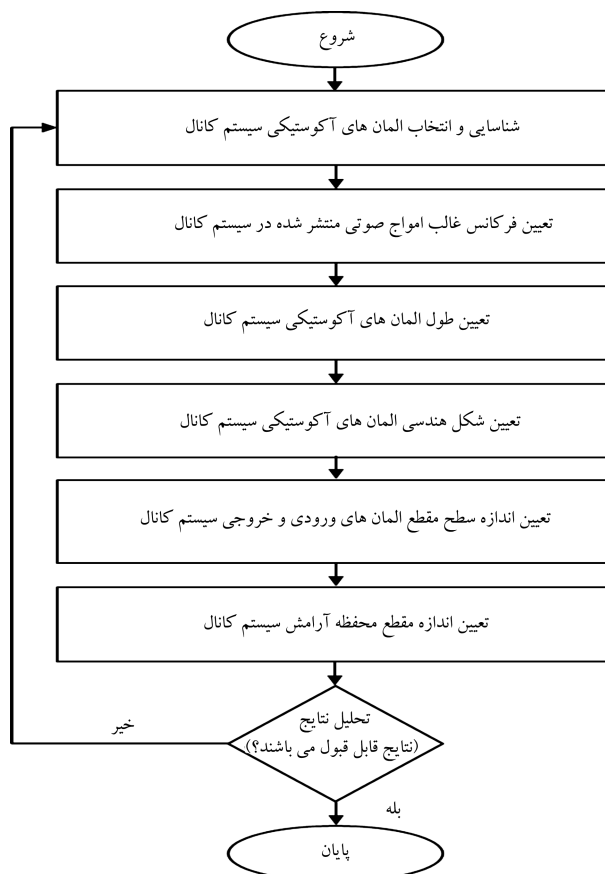
با توجه به مطالب بیان‌شده در بخش‌های مختلف این نوشتار، الگوریتم طراحی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی که بیان‌گر روند طراحی سیستم است، استخراج و در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

فهرست علائم

- a : سرعت صوت (m/s)؛
- C_s : ثابت اسمگوریشسکی؛
- D : قطر کانال دایروی (m)؛
- f : فرکانس صوت (Hz)؛
- k : عدد موج (rad/m)؛
- L : ضریب تصحیح کارال؛
- l : طول کانال (m)؛
- M : عدد ماخ؛
- m : نسبت سطح مقطع کانال؛
- p : فشار (pa)؛
- q : منبع تولید صوت؛
- r_0 : شعاع کانال دایروی (m)؛
- S : سطح مقطع کانال (m^2)؛
- \vec{S}_i : مؤلفه کرنشی میدان جریان؛
- \vec{T}_i : تانسور تنش لاتیلهیل؛
- t : زمان (s)؛
- u : سرعت ذرات ($m \cdot s^{-1}$)؛
- Y_0 : امیدانس آکوستیکی کانال ($m \cdot s^{-1}$)؛
- V : حجم کانال (m^3)؛
- v : سرعت جرمی ($kg \cdot s^{-1}$)؛
- Z_M : امیدانس کل کانال؛
- $1/Z_C$: ادمیتانس کل کانال؛
- Z : امیدانس آکوستیکی ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)؛

علائم یونانی

- $\delta(f)$: تابع دلتای دبراک؛
- Δ : ابعاد شبکه میدان حل؛
- ξ : امیدانس آکوستیکی مخصوص ($m \cdot s$)؛
- λ : طول موج (m)؛
- ν : گردابه‌ی ویسکوزیته ($pa \cdot s \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$)؛
- τ_{ij} : تنش برشی (pa)؛
- ω : سرعت زاویه ایی موج (rad/s).



شکل ۱۹. الگوریتم طراحی سیستم هوارسانی به توربین گاز دریایی.

پانوشته‌ها

1. Finite Element Method (FEM)
2. Boundary Element Method (BEM)
3. transmission losses
4. Muffler
5. Boussinesq approximation
6. monopole
7. dipole
8. quadrupole
9. free space Green function
10. Fowcs Williams and Hawkings
11. spey marine gas turbine
12. mass flow inlet
13. outflow
14. wall
15. Reynolds average navier - Stokes equation
16. direct navier - Stokes equation
17. large Eddy simulation
18. steady - state solution
19. full foad
20. Resonance
21. start
22. sound pressure level (SPL)
23. sound navigation and ranging (Sonar) frequency
24. deck
25. Bouncy

منابع (References)

1. Liu, E., Yan, S., Peng, S., Huang, L. and Jiang, Y. "Noise silencing technology for manifold flow noise based on ANSYS fluent", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **29**, pp. 322-328 (2016).
2. Mak, C.M., Wang, X. and Ai, Z.T. "Prediction of flow noise from in-duct spoilers using computational fluid dynamics", *Applied Acoustics*, **76**, pp. 386-390 (2014).
3. Hillenbrand, J., Becker, S., Sailer, T., Wetzel, M. and Hausner, O. "Numerical simulation of turbulence induced flow noise in automotive exhaust systems using scale-resolving turbulence models", *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, **132**, pp. 719-729 (2016).
4. Guasch, O., Pont, A., Baiges, J. and Codina, R. "Concurrent finite element simulation of quadrupolar and dipolar flow noise in low Mach number aeroacoustics", *Computers & Fluids*, **133**, pp. 129-139 (2016).
5. Bilawchuk, S. and Fyfe, K.R. "Comparison and implementation of the various numerical methods used for calculating transmission loss in silencer systems", *Applied Acoustics*, **64**, pp. 903-916 (2003).
6. Zhang, Z., Li, J. and Mak, C.M. "Simulation analysis of acoustic attenuation performance for different shape of an expansion chamber silencer", *Information and Computing Science*, **02**, pp. 10-13 (2009).
7. Wu, C.J., Wang, X.J. and Tang, H.B. "Transmission loss prediction on a single inlet/double outlet cylindrical expansion chamber muffler by using the modal meshing approach", *Applied Acoustics*, **69**, pp. 173-178 (2008).
8. Wu, C.J., Wang, X.J. and Tang, H.B. "Transmission loss prediction on SIDO and DISO expansion chamber mufflers with rectangular section by using the collocation approach", *International Journal of Mechanical Sciences*, **49**, pp. 872-877 (2007).
9. Kårekull, O., Efraimsson, G. and Åbom, M. "Prediction model of flow duct constriction noise", *Applied Acoustics*, **82**, pp. 45-52 (2014).
10. Ji, Z.L. "Acoustic attenuation performance analysis of multi chamber reactive silencers", *Journal of Sound and Vibration*, **283**, pp. 459-466 (2005).
11. Chu, C.I., Hua, H.T. and Liao, I.C. "Effects of three dimensional modes on acoustic performance of reversal flow mufflers with rectangular cross-section", *Computers and Structures*, **79**, pp. 883-890 (2001).
12. Mohammed, R. and Allam, S. "Modelling and analysis of single expansion chamber using response surface methodology", *International Journal of Engineering Research and Applications*, **02**, pp. 651-658 (2012).
13. Tsuji, T., Tsuchiya, T. and Kagawa, Y. "Finite element and boundary element modeling for the acoustic wave transmission in mean flow medium", *Journal of Sound and Vibration*, **255**(5), pp. 849-862 (2002).
14. Munjal, M.L., *Acoustics of Ducts and Muffler with Application to Exhaust and Ventilation System Design*, A Wiley, Newyork, pp. 1-66 (1987).
15. Sagut, P., *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*, Scientific Computation, Springer Berlin Heidelberg, pp. 45-89 (2010).
16. Wilcox, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edition, DCW Industries, pp. 56-189 (2004).
17. Wang, M., Freund, J.B. and Lele, S.K. "Computational prediction of flow generated sound", *Annual. Review of Fluid. Mechanics*, **38**, pp. 483-512 (2006).
18. Howe, M.S., *Theory of Vortex Sound (Cambridge Texts in Applied Mathematics)*, Cambridge University Press, pp. 63-156 (2003).
19. Munjal, M.L. "Plane wave analysis of side inlet/outlet chamber mufflers with mean flow", *Applied Acoustics*, **52**(2), pp. 165-175 (1997).
20. *Naval Sea Systems Command*, NAVSEA S9512-BS-MMA-010 HVAC Equipment Manual, pp. cahnge 9 - 1, Direction of Commander (1991).
21. Fox, R.W. and McDonald, T., *Introduction to Fluid Mechanics*, Wiley, Newyork, pp. 150-175 (1994).
22. Carlyon, J., *Marine Propellers and Propulsion*, 3nd edition, Elsevier Ltd, Butter worth - Heineman, pp. 247-260 (2012).