

مطالعه عددی تولید و انتشار میدان صوتی حاصل از جریان حفره

علیرضا مالکی^۱، مجید مصباح^{۲*}، آرمان محسنی^۲

^۱ تهران، حکیمیه، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، ۱۶۵۸۹-۵۳۵۷۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ تهران، حکیمیه، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، ۱۶۵۸۹-۵۳۵۷۱، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m_mesbah@sbu.ac.ir

چکیده

در این مقاله میدان آکوستیکی حاصل از جریان حفره با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه موردی این تحقیق یک حفره دو بعدی کم عمق در جریان آزاد با ماخ ۰/۵ می‌باشد. یک روش ترکیبی که در آن میدان محاسباتی به دو بخش میدان جریان و میدان آکوستیک تقسیم می‌شود، به کار گرفته شده است. میدان جریان به وسیله حل معادلات ناپایدار متوسط گیری شده ناویر-استوکس و انتشار امواج صوتی حاصل از آن توسط روش انتگرال سطح شبیه‌سازی شده است. مشخصات جریان نوسانی سیال در درون حفره مورد آنالیز و شدت و جهت انتشار امواج صوتی در دور دست، شبیه‌سازی شده است. در مقایسه با نتایج ارائه شده در سایر مقالاتی که از روش‌های دقیق‌تر مانند گردابه‌های بزرگ و شبیه‌سازی مستقیم استفاده شده است، تطابق مناسبی مشاهده می‌گردد.

کلمات کلیدی: آیروآکوستیک؛ جریان حفره؛ روش ترکیبی؛ یورنر؛ انتگرال سطح.

۱- مقدمه

آیروآکوستیک^۱، علم بررسی امواج صوتی است که در اثر نوسانات فشاری ایجاد شده توسط جریان سیال به وجود می‌آیند. از کاربردهای این علم در صنعت می‌توان از کنترل، پیش‌بینی و کاهش صدا ماشین‌آلات صنعتی، به‌ویژه توربوماشین‌ها نام برد. آیروآکوستیک کاربرد بسیاری در کاهش صدای هواپیماها و سیستم‌های تولید گرما و برق هم‌زمان دارد. از امواج آکوستیک می‌توان در کنترل جریان‌های سیال استفاده کرد و جدایش جریان را عقب انداخت.

هدف از انجام این پژوهش، ایجاد ابزار شبیه‌سازی آیروآکوستیکی است که توانایی شبیه‌سازی میدان صوتی حاصل از جریان سیال را با دقت مناسبی داشته باشد. در این مقاله شکل نوسانی و یک مد^۲ که سابقاً فقط توسط روش‌هایی با دقت بالا (با هزینه

¹ Aeroacoustic

² Wake mode

محاسباتی بالا) مورد مطالعه واقع شده است توسط روش محاسباتی یورنر شبیه سازی گردیده و میدان صوتی حاصل از آن در دور دست مدل شده است. در این تحقیق، از جریان حفره که از مسائل پرکاربرد صنعتی می باشد به منظور مطالعه موردی استفاده شده است. به دلیل اهمیت جریان حفره در صنعت (در توربوماشین ها، خودروسازی، قطارهای پرسرعت و غیره) آیروداکوستیک جریان حفره همواره مورد توجه محققین بوده است. دی روک [۱] جریان عبوری از حفره را با روش ال.ای.اس^۱، شبیه سازی کرده است و در پژوهش خود از روش های متفاوت کوپلینگ استفاده نموده است. نگوچی [۲] با انجام آزمایش نشان داده است که علت صدای غالب در دیواره کمپرسور، تشدید جریان درون حفره، می باشد. وانگ [۳] با شبیه سازی ال.ای.اس و انجام آزمایش، صدای پنجره سقف خودرو را بررسی کرده است. جریان حول بازو پانتوگراف^۲ قطار به صورت یک استوانه در حفره و با روش دی.ای.اس^۳ توسط کیم [۴] مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سال های اخیر، روش های عددی بسیاری به منظور شبیه سازی میدان اکوستیک ایجاد شده توسط سیال، به وجود آمده است. این روش ها را می توان به دو دسته کلی روش های مستقیم و روش های ترکیبی تقسیم نمود. در روش های مستقیم، میدان محاسباتی شامل میدان جریان (میدان نزدیک^۴) و میدان اکوستیک (میدان دور^۵) می باشد. اما در روش ترکیبی مسئله به دو بخش میدان نزدیک و میدان دور که به صورت مجزا شبیه سازی می شوند، تفکیک می گردد. منظور از میدان نزدیک، بخشی از جریان سیال است که عامل و منبع تولید صوت می باشد. منظور از میدان دور، مناطقی است که از منابع تولید صوت فاصله دارند و در این مناطق تاثیر تغییرات دینامیکی سیال بر روی تولید صدا ناچیز است. استفاده از روش های مستقیم، به دلیل هزینه محاسباتی فراوان، بسیار محدود است و امروزه در عمل، روش های ترکیبی در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند. در روش های ترکیبی، جریان ناپایدار میدان نزدیک را می توان با استفاده از روش های متفاوت دینامیک سیالات محاسباتی مانند دی.ان.اس^۶، ال.ای.اس و یا یورنر^۷ شبیه سازی نمود. روش های ال.ای.اس و دی.ان.اس می توانند با دقت بالایی، بازه وسیعی از فرکانس امواج اکوستیکی را شبیه سازی کنند. اما این روش ها، به دلیل هزینه محاسباتی بسیار بالا و محدودیت کاربرد آن ها در هندسه های پیچیده و سرعت های بالای جریان، هنوز به صورت گسترده مورد توجه صنعت قرار نگرفته اند. از طرفی حل جریان یورنر به دلیل هزینه محاسباتی بسیار کمتر نسبت به دو روش یاد شده و قابلیت آن در شبیه سازی جریان با شکل هندسه پیچیده، همواره مورد توجه صنعت بوده است. از آن جایی که اغتشاشات غالب صوتی در صنعت تونال نویز^۸ می باشد، در این تحقیق ابزاری فراهم شده است که با استفاده از یورنر بتوان این نویز را شبیه سازی نمود.

در روش های ترکیبی می توان از روش های کوپل کردن و انتگرال سطح نام برد. روش های کوپلینگ، مانند روش های لایتهیل [۵]، کرل [۶] و فاکس ویلیامز [۷]، میدان دور را به وسیله معادله موج شبیه سازی می کنند و در روش های انتگرال سطح از یک سطح، به منظور شبیه سازی میدان دور استفاده می شود. در این پژوهش، از یک روش انتگرال سطح [۸،۹] به منظور شبیه سازی میدان دور (میدان اکوستیک) استفاده شده است. این روش تاثیر حضور جریان آزاد در میدان دور را نیز در نظر می گیرد که باعث افزایش دقت این روش در شبیه سازی میدان می شود.

در ادامه چگونگی شبیه سازی میدان نزدیک و میدان دور توضیح داده شده است و بخش سوم شامل آنالیز شبیه سازی میدان نزدیک و میدان دور است و همچنین نتیجه گیری و خلاصه مقاله در بخش چهارم جمع آوری شده است.

¹ Large Eddy Simulation (LES)

² Pantograph

³ Detached Eddy Simulation (DES)

⁴ Near field

⁵ Far field

⁶ Direct Numerical Simulation (DNS)

⁷ Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes (URANS)

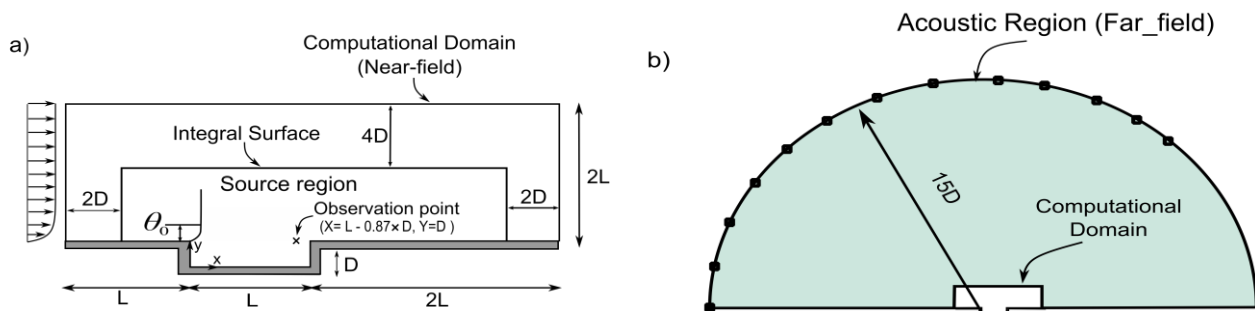
^۸ تونال نویز (Tonal noise) به صدایی گفته می شود که دارای فرکانس غالب در بازه فرکانسی است.

۲- شبیه‌سازی میدان نزدیک و میدان دور

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، در این پژوهش، از یک روش ترکیبی به منظور مطالعه میدان آکوستیکی ایجاد شده از جریان سیال استفاده شده است. میدان نزدیک توسط حل معادلات یورنر شبیه‌سازی می‌شود که جزئیات آن در بخش ۱-۲ ارائه شده است. روش شبیه‌سازی میدان دور به وسیله روش سطح انتگرال فراست [۸]، در بخش ۲-۲ گردآوری شده است. همچنین از معادلات قربانی اصل [۹] که اثر حضور جریان متوسط در میدان دور را در نظر می‌گیرند، به عنوان معادلات حاکم بر میدان آکوستیک استفاده شده است. در این راستا، نرم‌افزاری جهت شبیه‌سازی میدان آکوستیک در دوردست براساس حل میدان جریان تهیه گردیده است.

۱-۲ شبیه‌سازی میدان نزدیک

در این پژوهش از جریان حفره که کاربردهای بسیاری در صنعت دارد به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. شکل ۱- (a) میدان نزدیک یک حفره دوبعدی با نسبت طول به عرض چهار ($L/D=4$) را نمایش می‌دهد. در این شبیه‌سازی عدد ماخ جریان آزاد برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است. جریان بالادست شامل پروفیل لایه مرزی بلازیوس می‌باشد و به‌گونه‌ای تنظیم شده است که در لبه جلویی حفره^۱، نسبت طول حفره به ضخامت مومنتوم برابر با 102 باشد ($L/\theta_0=102$). در این شبیه‌سازی مقدار عدد رینولز براساس عمق حفره برابر با 1500 است. دامنه میدان محاسباتی جریان و سطح انتگرال استفاده شده، در شکل ۱- (a) نشان داده شده است.



شکل ۱- (a) شکل شماتیک میدان نزدیک (میدان جریان)، بعد سوم میدان نزدیک (راستای Z) به صورت عمود بر میدان و پادساعتگرد تعریف شده است. (b) محل بررسی شدت صوت در میدان دور

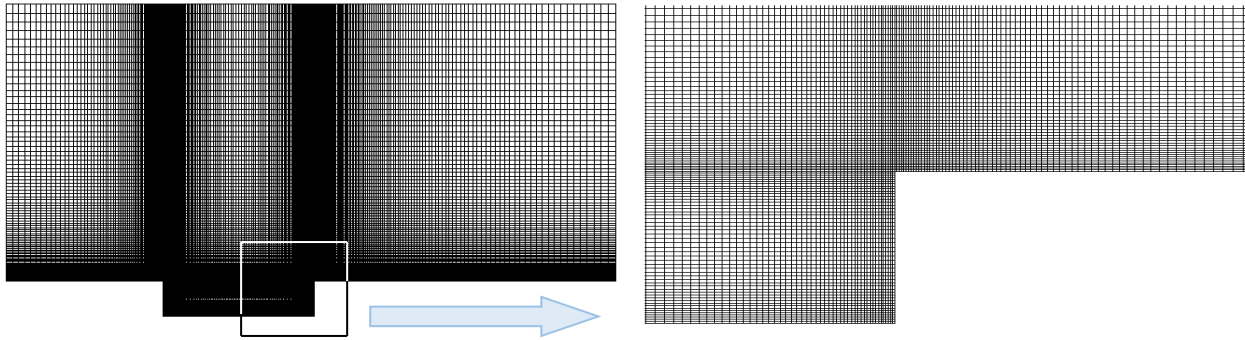
شبکه محاسباتی استفاده شده در پژوهش در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شبکه میدان نزدیک، از 37000 سلول مستطیلی شکل به گونه‌ای بهره گرفته شده است که مقدار y^+ همواره کمتر از یک باشد.

در این مقاله از معادلات تراکم‌پذیر متوسط‌گیری شده رینولز در حالت غیر دائم (یورنر)، استفاده شده است. همچنین جهت شبیه‌سازی میدان نزدیک از نرم‌افزار متن باز آپن‌فوم^۲ و حلگر تراکم‌پذیر غیردائم رویمپل‌فوم^۳ بهره گرفته شده است و به منظور افزایش دقت حل، از روش‌های گسسته‌سازی مرتبه دو و از مدل آشفتگی SST $k-\omega$ که توانایی پیش‌بینی دقیق لزجت آشفته را در نواحی نزدیک و دور از دیوار دارد، استفاده شده است [۱۱-۱۰]. در این پژوهش جهت پایداری حل از بازه‌های زمانی برابر با 10^{-8} ثانیه استفاده شده که مطابق با آن، حداکثر عدد کورانت برابر با 0.9 است.

¹ Leading edge

² OpenFOAM

³ rhoPimpleFoam



شکل ۲- شبکه محاسباتی شبیه‌سازی میدان جریان

۲-۲ شبیه‌سازی میدان دور

در نرم‌افزار تهیه شده به منظور مطالعه میدان دور، معادلات فاکس و ویلیامز [۷-۸] در فرم انتگرالی ارائه شده توسط قربانی اصل [۹] به عنوان معادلات حاکم بر میدان آکوستیک به کار گرفته شده است. در این معادلات، تاثیر حضور جریان بر میدان آکوستیک توسط ضریب داپلر^۱ اعمال می‌شود. در روش سطح انتگرال، یک سطح بسته به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که تمامی منابع صوتی محاسبه شده در میدان نزدیک را در بر گیرد. شکل ۱- (a)، سطح انتگرال را در داخل دامنه محاسباتی میدان نزدیک نمایش می‌دهد. در هنگام شبیه‌سازی میدان نزدیک، نوسانات میدان جریان (فشار، سرعت و چگالی) در این سطح استخراج می‌گردد و میدان آکوستیک با حل معادلات حاکم، براساس این داده‌ها محاسبه می‌شود. مزیت روش سطح انتگرال در این می‌باشد که تاثیر تولید صوت از میدان آشفته جریان (منابع صوتی چهار قطبی) را با کمترین هزینه محاسباتی نسبت به سایر روش‌ها در نظر می‌گیرد. دامنه میدان دور شبیه‌سازی شده در این پژوهش متناظر با شکل ۱- (b) می‌باشد.

در معادلات فرست و قربانی اصل جمله فشار آکوستیک به دو بخش اصلی P_T' و P_L' تقسیم می‌شود که به ترتیب صدای ضخامت^۲ و صدای بارگذاری^۳، نامیده می‌شوند که این نام‌گذاری برگرفته از مسائل ضخامت و بارگذاری خطی آیرودینامیک است [۸]. برای سطح انتگرال^۴ ثابت معادلات به صورت زیر ساده می‌شود که در آن‌ها، M_∞ عدد ماخ جریان و C_0 سرعت صوت می‌باشد [۹] (تعاریف منابع تولید صوت Q و L و همچنین R و R^* در مرجع گردآوری شده است).

$$4\pi p_T'(\vec{x}, t, \vec{M}_\infty) = \int_S \left[\frac{(1 - M_{\infty R}) \dot{Q}}{R^*} \right]_e ds - \int_S \left[Q \frac{C_0 M_{\infty R^*}}{R^{*2}} \right]_e ds \quad (1)$$

$$4\pi p_L'(\vec{x}, t, \vec{M}_\infty) = \frac{1}{C_0} \int_S \left[\frac{\dot{L}_R}{R^*} \right]_e ds - \int_S \left[\frac{L_{R^*}}{R^{*2}} \right]_e ds \quad (2)$$

$$p' = p_T' + p_L' \quad (3)$$

¹ Doppler effect

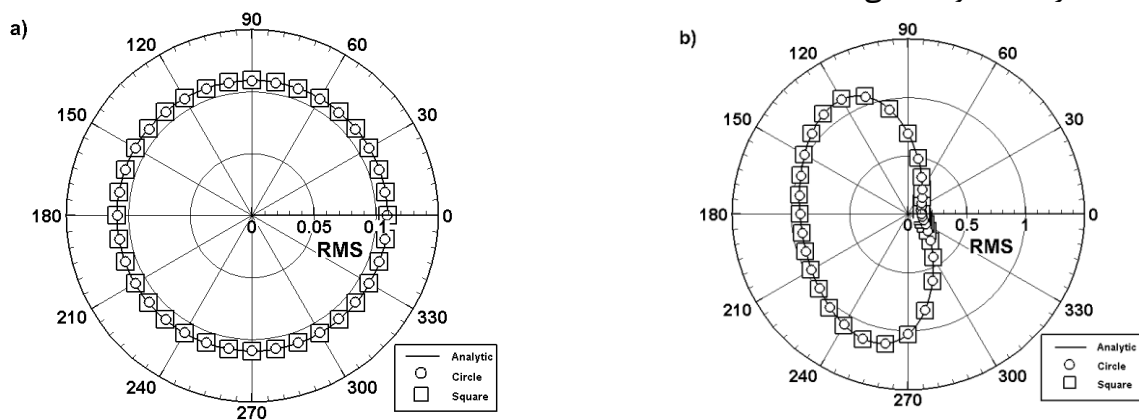
² Thickness noise

³ Loading noise

⁴ Surface integral

معادلات فوق (روش سطح انتگرال) به گونه‌ای نوشته شده‌اند که اثر حضور منابع صوتی چهارقطبی حجمی موجود در درون این سطح را در نظر می‌گیرند. به عبارتی، سطح انتگرال به گونه‌ای انتخاب می‌شود که شدت آشفتگی (اثرات چهارقطبی) در بیرون از سطح ناچیز باشد.

به منظور راستی‌آزمایی نرم‌افزار آیروآکوستیک ایجاد شده، از دو مطالعه موردی (دو عدد ماخ جریان متفاوت) استفاده شده است. در راستی‌آزمایی اول، یک تک‌قطبی در مرکز مختصات با ماخ جریان صفر قرار داده می‌شود. دو سطح انتگرال با شکل متفاوت که یکی کره به شعاع یک متر و دیگری مکعب مستطیل به ابعاد $1 \times 1 \times 0.2$ متر است، به صورت متقارن حول تک قطبی در نظر گرفته می‌شوند. شدت صوت در نقاطی واقع در دایره‌ای به شعاع 20 متر محاسبه و با نتایج تحلیلی مقایسه می‌گردد. شکل ۳- (a) شدت صوت محاسبه شده براساس سطح انتگرال گیری کره، مکعب و حل تحلیل را مقایسه می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود حل تحلیلی و حل عددی برای سطوح مختلف انتگرال‌گیری برابر است. شکل ۳- (b) تاثیر ماخ جریان در مقدار و جهت انتشار صوت را نشان می‌دهد. براساس این شکل، حل‌های به دست آمده از سطوح مختلف انتگرال‌گیری و حل تحلیلی کاملاً برهم منطبق می‌باشند هرچند جهت صوت منتشر شده یکنواخت نمی‌باشد.



شکل ۳- مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آیروآکوستیک طراحی شده در دو سطح کره و مکعب، با حل تحلیلی تک قطبی، در دایره‌ای واقع بر صفحه XY و به شعاع 20 متر (a)، $\vec{M}_\infty = (0, 0, 0)$ ؛ (b)، $\vec{M}_\infty = (0.7, 0.1, 0.5)$ ؛ نتایج تحلیلی به صورت خط، نتایج کره به صورت دایره و مکعب به صورت مربع، نمایش داده شده است.

۳- نتایج

نتایج این مقاله در دو بخش شبیه‌سازی میدان نزدیک و میدان دور ارائه می‌شود. در بخش میدان نزدیک نوسانات جریانی که عمدتاً به دلیل تشکیل و رها شدن گردابه‌های درون حفره می‌باشند مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش میدان دور، شبیه‌سازی شدت صوت در دوردست که براساس نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی میدان نزدیک به دست آمده است مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

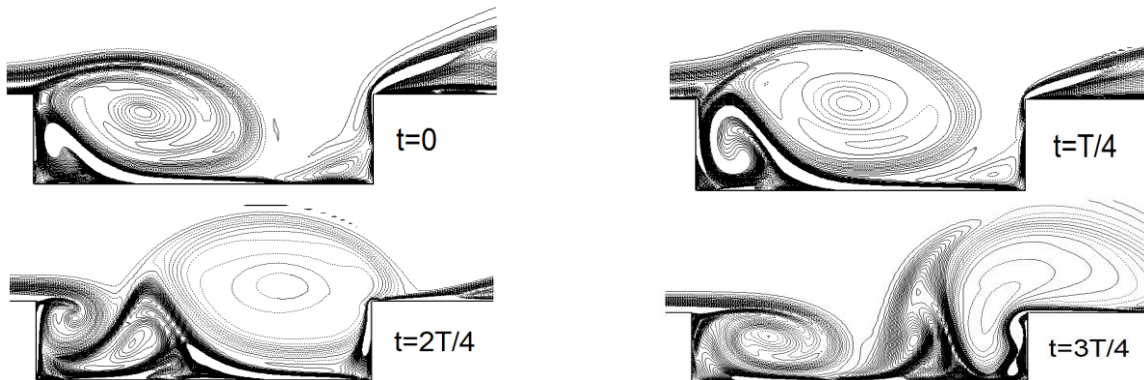
۱-۳ نتایج شبیه‌سازی میدان نزدیک (جریان حفره)

شبیه‌سازی به دست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که در درون حفره گردابه تشکیل می‌شود و به طور متناوب رها می‌گردد. شکل (۴) مراحل مختلف تشکیل و تخلیه گردابه را در یک دوره تناوب نشان می‌دهد. مطابق با شکل، در لبه جلویی حفره گردابه‌ای کوچک تشکیل می‌شود. انرژی جریان عبوری از روی حفره توسط جریان برشی به درون حفره منتقل شده و موجب رشد این گردابه می‌گردد. این گردابه تا ابعاد حفره رشد می‌کند و در نهایت با برخورد به لبه انتهایی^۱ حفره رها می‌شود. در اثر

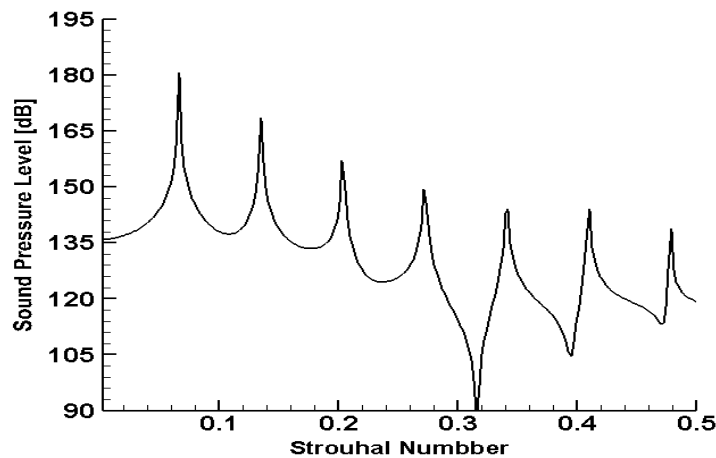
¹ Trailing edge

برخورد و شکستن گردابه، امواج فشاری بسیاری قوی‌ای از اطراف لبه انتهایی حفره ساطع می‌گردد. این شکل از نوسان جریان درون حفره، و یک مد^۱ نامیده می‌شود.

در این مقاله، حل میدان جریان توسط روش‌های شبیه‌سازی دقیق‌تر مانند روش دی.ان.اس [۱۲] و ال.ای.اس [۱]، ارزشیابی شده است. شکل (۵) میزان شدت صوت در مقابل عدد استروهال^۲ ($St = (D/U_\infty) fr$) را نشان می‌دهد. فرکانس اولین هارمونیک در مقیاس استروهال برابر با ۰/۰۶۶ است. لازم به ذکر است که این نتایج با داده‌های بدست آمده از حل‌های دقیق‌تر انطباق دارد (حدود ۳ درصد خطا وجود دارد).



شکل ۴- میدان گردابه‌ای در یک دوره تناوب میدان سیال. ۲۷ خط هم‌تراز $\omega_2 D/U_\infty$ در بازه ۵- الی ۳ نمایش داده شده است. مقادیر منفی به صورت نقطه نمایش داده شده است.



شکل ۵- نمودار شدت صوت نسبت به عدد استروهال در نقطه $(L - 0.87 \times D, D)$

۲-۳ نتایج شبیه‌سازی میدان دور

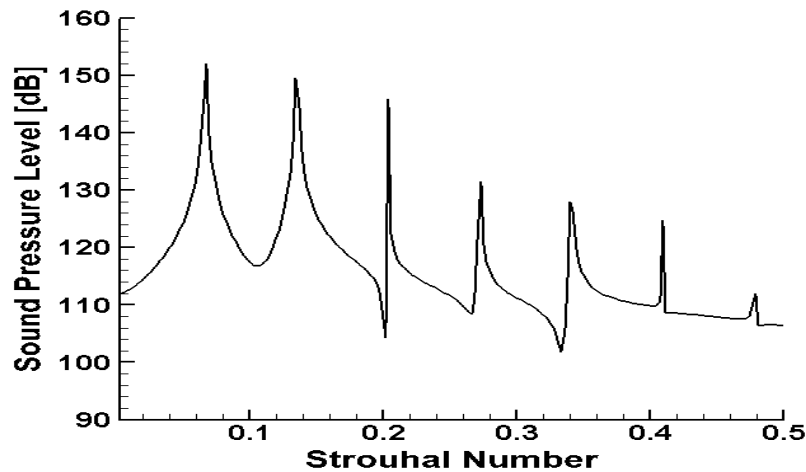
همانطور که قبلاً اشاره شده است در نرم‌افزار آیروآکوستیک از معادلات سطح انتگرال استفاده شده است. این معادلات در اصل معادلات دیفرانسیلی فاکس ویلیامز هستند که با استفاده از توابع گرین سه‌بعدی [۱۳] به صورت روابط انتگرالی بازنویسی شده‌اند. در نتیجه لازم است که سطح انتگرال‌گیری سه‌بعدی باشد. با توجه به این که مطالعه موردی میدان نزدیک بر روی حفره دوبعدی صورت گرفته است نیاز است که داده‌های استخراج شده از این حل به صورت سه‌بعدی ارائه گردد. بدین منظور با بسط نتایج استخراج شده به اندازه ۱۲ برابر عمق حفره و در جهت بعد سوم میدان (راستای Z)، داده‌های سه‌بعدی حاصل می‌شود. این تکنیک سابقاً توسط

² Wake mode

³ Strouhal

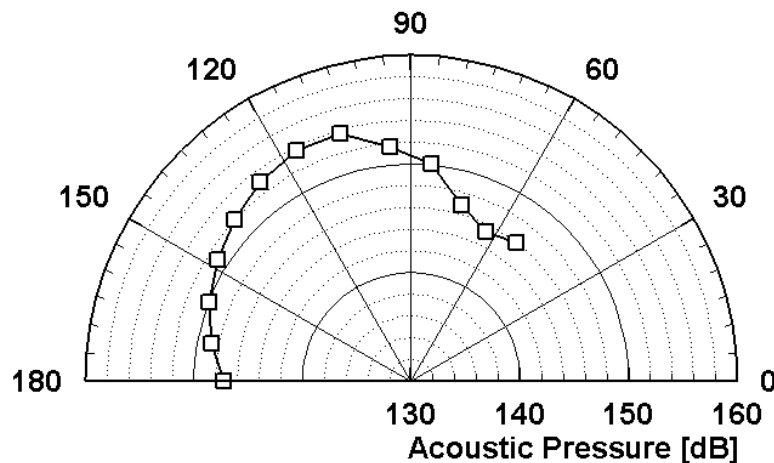
تعدادی از محققین به کار گرفته شده است [۱۱،۱۴،۱۵]. نمودار ارائه شده در شکل (۶)، مقدار شدت صوت در مقابل عدد استروهل را در نقطه‌ای با شعاع $15D$ و زاویه $۱۳۷/۵$ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس اولین هارمونیک برابر با $۰/۰۶۷$ می‌باشد که همان فرکانس به‌دست آمده از میدان نزدیک (شکل (۵)) می‌باشد. همچنین عدد استروهل هارمونیک دوم برابر با $۰/۱۳۴$ است که نشان می‌دهد هارمونیک بالاتر این موج صوتی است. مطابق با شکل‌های (۵) و (۶)، شدت صوت اولین هارمونیک به دلیل افزایش فاصله از حفره به اندازه ۳۰ دسی بل کاهش پیدا کرده است.

به منظور راستی آزمایشی جواب‌های به دست آمده در دور دست از نرم‌افزار انسیس ۱۶ ۲۰ که قابلیت مطالعه آیرواکوستیک را نیز دارد استفاده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار انسیس و نرم‌افزار طراحی شده نشان می‌دهد که فرکانس اولین هارمونیک برابر و شدت صوت، اختلافی کمتر از یک درصد دارد.



شکل ۶- نمودار تغییرات فشار در مقابل عدد استروهل در نقطه‌ای با شعاع $15D$ و زاویه $۱۳۷/۵$ درجه نسبت به مرکز مختصات.

در شکل (۷) جهت‌گیری موج صوتی حاصل از جریان حفره در نقاط واقع بر کمانی به شعاع $15D$ از مرکز مختصات نمایش داده شده است. مطابق با این شکل، صوت حاصل از حفره به بالا دست جریان گسترش پیدا می‌کند به طوری که بین شدت صوت بالادست و پایین دست اختلاف وجود دارد. مطابق با این شکل، بیشترین شدت صوت در نواحی اطراف زاویه ۱۲۰ درجه مشاهده شده است.



شکل ۷- نمودار جهت‌گیری امواج صوتی در کمانی با شعاع $15D$ نسبت به مرکز مختصات

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میدان آکوستیک ایجاد شده توسط یک حفره دوبعدی با نسبت $L/D = 4$ و عدد ماخ 0.5 ، مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، یک نرم‌افزار محاسباتی آیروآکوستیک براساس روش ترکیبی یورنز و سطح انتگرال طراحی شده است که مقایسه داده‌های خروجی این نرم‌افزار با نرم‌افزار انسیس، هم‌پوشانی خوبی را نشان می‌دهد و تایید کننده نتایج نرم‌افزار طراحی شده است. نتایج میدان آکوستیک نشان می‌دهد که با استفاده از روش تبدیل داده‌های دوبعدی به سه‌بعدی میدان جریان (به صورت یکنواخت)، می‌توان میدان آکوستیک را با استفاده از معادلات سه‌بعدی انتگرال سطح به خوبی پیش‌بینی کرد. در ادامه این تحقیق روش فاکس ویلیامز دوبعدی که معادلات آن با استفاده از معادلات دوبعدی گرین حل می‌شود به نرم‌افزار اضافه خواهد شد که معادلات آن‌ها در مراجع [۱۶، ۱۷، ۱۸] گردآوری شده است. لازم به ذکر است نرم‌افزار طراحی شده به منظور محاسبات آیروآکوستیکی، به دلیل هزینه محاسباتی بسیار کمتر روش یورنز نسبت به روش‌های ال.ای.اس و دی.ان.اس و امکان استفاده از آن در هندسه‌های پیچیده، می‌تواند کاربر بسیاری در صنعت داشته باشد.

مراجع

1. W. De Roeck, G. Rubio, M. Baelmans, W. Desmet, "Toward accurate hybrid prediction techniques for cavity flow noise applications". *International journal for numerical methods in fluids*, 61(12), 1363-1387 (2009).
2. M. Noguchi, K. Sano, S. Takeshita, "Cavity resonance and noise reduction in a rotary compressor". *IEEE transactions on industry applications*, (6), 1118-1123 (1983).
3. Y. Wang, H. C. Lee, K. M. Li, Z. Gu, J. Chen, "Experimental and numerical study of flow over a cavity for reduction of buffeting noise". *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4), 600-610 (2012).
4. H. Kim, "Unsteady aerodynamics of high speed train pantograph cavity flow control for noise reduction". In *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (p. 2848) (2016).
5. M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically I. General theory". *Proc. R. Soc. Lond. A*, 211(1107), 564-587 (1952).
6. N. Curle, "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound". *Proc. R. Soc. Lond. A*, 231(1187), 505-514 (1955).
7. J. F. Williams, D. L. Hawkings, "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion". *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 264(1151), 321-342 (1969).
8. K. S. Brentner, F. Farassat, "Analytical comparison of the acoustic analogy and Kirchhoff formulation for moving surfaces". *AIAA journal*, 36(8), 1379-1386 (1998).
9. G. Ghorbaniasl, C. Lacor, "A moving medium formulation for prediction of propeller noise at incidence". *Journal of Sound and Vibration*, 331(1), 117-137 (2012).
10. K. S. Brentner, J. S. Cox, C. L. Rumsey, B. A. Younis, "Computation of sound generated by flow over a circular cylinder: an acoustic analogy approach". In *NASA Conference Publication* (pp. 289-296). NASA (1997).
11. W. Shao, J. Li, "Analytical and Numerical Investigations on the Aeroacoustical Oscillation of Flow Past the Cavity". In *ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition* (pp. V02BT41A005-V02BT41A005). American Society of Mechanical Engineers (2015).
12. C. W. Rowley, *Modeling, simulation, and control of cavity flow oscillations*. CALIFORNIA INST OF TECH PASADENA (2001).
13. M. S. Howe, *Theory of vortex sound* (Vol. 33). Cambridge University Press (2003).
14. B. A. Singer, K. S. Brentner, D. P. Lockard, G. M. Lilley, "Simulation of acoustic scattering from a trailing edge". *Journal of Sound and Vibration*, 230(3), 541-560 (2000).
15. G. B. Ashcroft, K. Takeda, X. Zhang, "A numerical investigation of the noise radiated by a turbulent flow over a cavity". *Journal of Sound and Vibration*, 265(1), 43-60 (2003).
16. D. P. Lockard, "An efficient, two-dimensional implementation of the Ffowcs Williams and Hawkings equation". *Journal of Sound and Vibration*, 229(4), 897-911 (2000).
17. Y. P. Guo, "Application of the Ffowcs Williams/Hawkings equation to two-dimensional problems". *Journal of Fluid Mechanics*, 403, 201-221 (2000).
18. A. Bozorgi, L. Siozos-Rousoulis, S. A. Nourbakhsh, G. Ghorbaniasl, "A two-dimensional solution of the FW-H equation for rectilinear motion of sources". *Journal of Sound and Vibration*, 388, 216-229 (2017).