



تحلیل آکوستیک جریان آشفته حول استوانه نوسانی و ثابت در رینولدزهای ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰

نیلوفر کمال خانی^{۱*}، زهرا شمالی^۲، جعفر غضنفریان^۳

^۱ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، ۱۳۱۵۷۷۳۳۱۴، دکتری.

^۲ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، ۱۳۱۵۷۷۳۳۱۴، استادیار.

^۳ایران، زنجان، بلوار دانشگاه، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، دانشیار.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: niloofar_kamalkhani@yahoo.com

چکیده

تحلیل هیدروآکوستیکی جریان سه بعدی و آشفته حول استوانه در محدوده رینولدزهای ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ در دو حالت ثابت و نوسانی به صورت عددی انجام شده است. نوسان استوانه در راستای عمود بر جریان اصلی با فرکانس ۰/۲۳ هرتز و دامنه ۰/۴ متر اعمال شد تا تاثیر تحریک خارجی بر حرکت جدایش گردابه ها و تولید صدا بررسی گردد. شبیه سازی با استفاده از روش حجم محدود در نرم افزار این فوم و مدل اشفتهگی (*Spalart - AllmarasDDES*)، ترکیبی از مدل *LES* و *RANS*، استفاده شده و تحلیل آکوستیکی بر پایه معادله فاکس-ویلیامز هاو کینگز (*FW - H*) با بهره گیری از نقاط مشاهده گر مشخص شده صورت گرفت. نتایج نشان می دهد که نوسان استوانه باعث افزایش فرکانس گردابه ها می گردد. همچنین در ادامه ضرایب نیروی درگ و لیفت مورد بررسی قرار می گیرد. بر اساس آنالوژی فاکس-ویلیامز هاو کینگز، افزایش تابش صوتی به تقویت مؤلفه دو قطبی نیروهای سطحی روی استوانه نسبت داده می شود. بنابراین، حرکت نوسانی استوانه مکانیسم غالب تولید صوت را تغییر داده و قفل شدگی فرکانسی کلاسیک بین رهائش گردابه ها و تحریک سازه را ایجاد نمی کند. این یافته ها پیامدهای مهمی برای طراحی سازه های جریان پذیر و کاهش نویز آکوستیکی دارند.

کلمات کلیدی: تحلیل هیدروآکوستیکی؛ *Spalart - AllmarasDDES*؛ معادله *FW - H*؛ جدایش گردابه ها

مقدمه

جریان سیال حول استوانه یکی از مسائل بنیادی مکانیک سیالات است که با افزایش عدد رینولدز، از حالت پایا به جریان ناپایدار با جدایش گردابه ای گذار می کند. جدایش متناوب گردابه ها در پشت استوانه موجب نوسانات نیروهای آیرودینامیکی و ایجاد نویز

آیرودینامیکی با فرکانسی مرتبط با عدد استروهال می‌شود. در حالت نوسانی، هم‌زمانی فرکانس نوسان استوانه و فرکانس جدایش گردابه‌ها منجر به پدیده قفل‌شدگی فرکانسی (lock-in) و تشدید نوسانات فشار و صوت می‌گردد. این تشدید به صورت افزایش سطح فشار صوتی و ظهور هارمونیک‌های جدید در میدان دور مشاهده می‌شود. آنالوژی‌های آکوستیکی با جداسازی نوسانات جریان از انتشار صوت، منابع صوتی نظیر تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی را مدل‌سازی کرده و امکان پیش‌بینی نویز جریان‌های آشفته را فراهم می‌کنند. اولین بار لایتهیل [۱] برای بررسی صدای جت سیال و اصول اساسی صدای تولید شده در جریان سیال از آنالوژی‌های آکوستیکی استفاده کرد. با این حال، این روش محدودیت‌هایی دارد و نمی‌تواند به طور گسترده در تمامی شرایط استفاده شود. در مقاله "تأثیر مرزهای جامد بر صدای آیرودینامیکی" نوشته کرل [۲] چندین یافته مهم مرتبط با تولید و رفتار صدای آیرودینامیکی در حضور مرزهای جامد مشخص شده‌است. یکی از این موارد تأثیر مرزی است، در این مورد کرل نشان داد که مرزهای جامد به طور قابل توجهی بر انتشار امواج صوتی تولید شده توسط منابع آیرودینامیکی تأثیر می‌گذارند. وجود مرزها می‌تواند میدان صوتی را تغییر دهد و بر دامنه و جهت انتشار صدا تأثیر بگذارد. در این مقاله مکانیسم تولید نویز آیرودینامیکی، به ویژه در رابطه با جریان هوا در اطراف ساختارها را تشریح می‌کند. کرل بر تأثیر تعاملات سطحی با جریان توربولانسی در تولید صدا تأکید کرد. وی چارچوب ریاضی برای درک چگونگی تعامل امواج صوتی با مرزها ارائه داد. او روش‌هایی برای تحلیل تأثیر لبه‌ها و سطوح بر تابش صوتی معرفی کرد که درک نظری از رفتار صدا در زمینه‌های مختلف آیرودینامیکی را بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها برای مهندسی به ویژه در طراحی هواپیماها، وسایل نقلیه و ساختارها برای کاهش نویز ناخواسته دارای کاربردهای عملی است. اطلاعات به دست آمده از این مطالعه به استراتژی‌های بهتر کنترل نویز در آیرودینامیک کمک می‌کند. کارهای کرل راه را برای تحقیقات بیشتر در رابطه بین دینامیک سیالات و آکوستیک هموار کرد و بر مطالعات بعدی در هر دو زمینه نظری و کاربردی آکوستیک تأثیر گذاشت.

فاکس ویلیامز و هاو کینگز [۳] در مورد تولید صدا توسط توربولانس و سطوح در حرکت دلخواه، پایه‌های مهمی را برای درک رابطه بین دینامیک سیالات و آکوستیک بنا نهاد. این تحقیق، اصولی را در تئوری آیروآکوستیک ایجاد کرد و به تحلیل چگونگی تولید صدا از جریان‌های توربولانسی و تعامل آن‌ها با سطوح پرداخت. یافته‌های آن‌ها تأثیرات گسترده‌ای در مهندسی، فیزیک، و علوم محیطی داشته و به پیشرفت‌های کنترل نویز و بهبود طراحی‌های تکنولوژیکی کمک کرده است. این مقاله به عنوان یک کار محوری در تولید نویز و کنترل آن باقی مانده و در بسیاری از مطالعات بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. هاردین و لامکین [۴] در این پژوهش به تعامل بین امواج صوتی و توربولانس در جریان ویک، روش‌های عددی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی صدا، الگوهای جریان ویک و تحلیل فرکانس‌های تولید شده توسط ریزش گردابه‌ها در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰ می‌پردازند. یافته‌ها برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌هایی مثل پل‌ها و ساختمان‌ها جهت کاهش آلودگی صوتی بسیار کاربردی هستند. این مطالعه به درک بهتری از رابطه دینامیک سیالات و آکوستیک کمک کرده و به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات بعدی در این زمینه عمل می‌کند. "تولید صدا توسط یک استوانه دایره‌ای دو بعدی در جریان یکنواخت" توسط و اینوئه و هاتاکیاما [۵]، مکانیسم‌های تولید صدا ناشی از جریان در اطراف یک استوانه دایره‌ای را مورد بحث قرار می‌دهد. به طور خاص چگونگی برهمکنش جریان با شکل استوانه که منجر به تولید امواج صوتی می‌شود را تجزیه تحلیل می‌کنند. مقاله کازالینو و جیکوب در سال ۲۰۰۳ [۶] با عنوان "پیش‌بینی صدای آیرودینامیکی از میله‌های دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی آماری جانبی" به بررسی تولید صدای آیرودینامیکی توسط میله‌های دایره‌ای در محدوده رینولدز 2×10^5 تا 2×10^4 Re و استفاده از آنالوژی فوکس-وليامز پرداخته است. کازالینو و جیکوب با موفقیت توانستند اثرات سه‌بعدی در جریان‌های اطراف میله‌های دایره‌ای را شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند. مقاله "روش محاسباتی ارزیابی صدای غیرکامپکت بر اساس نظریه صدای گردابه" توسط تاکایشا، میازاوا و کاتو در سال ۲۰۰۷ [۷]، یک روش محاسباتی جدید برای ارزیابی صدای غیر متمرکز توسعه داد. این روش بر اساس نظریه صدای گردابه‌ای کار می‌کند و برای پیش‌بینی صدای تولید شده توسط جریان‌های توربولانسی استفاده می‌شود. در این مقاله استدلال شده است که روش المان مرزی کارآمدترین وسیله برای محاسبه تابع گرین آیروآکوستیک برای این مشکل است، زیرا به حداقل زمان CPU نیاز دارد و مستعد خطاهای عددی مانند پراکندگی و اتلاف در حین انتشار و شرایط تابش نیست. تراکول و کوپیف [۸] مطالعه عددی با استفاده از شبیه‌سازی‌های بزرگ آشفته (LES) را برای بررسی جریان آشفته در اطراف یک استوانه گرد استاندارد و یک استوانه که در قسمت عقب آن کوتاه شده است، ارائه می‌دهند. ایده کوتاه‌کردن استوانه از کارهای تجربی کاپیف و همکاران الهام گرفته شده است، که پیشنهاد کردند این تغییرات می‌تواند به کاهش قابل توجهی در نویز تولیدشده توسط جریان آشفته منجر

شود. در شبیه‌سازی‌ها تأیید شد که کاهش قابل توجهی در شدت تابش نویز (حدود ۲- دسی بل) برای استوانه کوتاه‌شده مشاهده می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که استفاده از هندسه‌های کوتاه‌شده می‌تواند یک استراتژی ساده و مؤثر برای کاهش نویز در کاربردهای عملی شامل ساختارهای استوانه‌ای، مانند چرخ‌فرودها، باشد. در پژوهش عددی اورسل و همکاران [۹] نتایج با پژوهش آزمایشگاهی روول و همکاران [۱۰] مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد که روش متوسط‌گیری رینولدز برای محاسبه صدای ناشی از جریان حول استوانه دقت مناسبی نداشته و اختلاف قابل توجهی در مقادیر بیشینه صدا و فرکانس متناظر وجود دارد. کمترین خطای مشاهده‌شده برای عدد استروهال، ۲۵ درصد بود. در مطالعه‌ای تجربی و عددی، چوی و همکاران [۱۱] از مدل توربولانسی LES و فرمولی توسعه داده شده جهت در نظر گرفتن منبع صوتی چهارقطبی، برای پیش‌بینی نویز ناشی از جریان اطراف یک استوانه دایره‌ای در محیط زیر آب استفاده کردند. نتایج حاصل از این روش با نتایج آزمایشات و روش FW-H مقایسه شد و با اختلافی کمتر از ۱ دسی‌بل تطابق خوبی نشان داد، که نشان‌دهنده دقت بالای این روش در پیش‌بینی نویز چهارقطبی است. غضنفریان و رضایی [۱۲] به تحلیل هیدروآکوستیک جریان سه‌بعدی و توربولانسی بر روی استوانه‌های فوق آبگریز و نوسانی با عدد رینولدز ۳۹۰۰ پرداخته‌اند. جهت بررسی تولید و انتشار صدا از آنالوژی آکوستیکی فوکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده کرده و مشاهده کردند برای استوانه ثابت فوق آبگریز منجر به افزایش ۸ درصدی عدد استروهال و کاهش ۶ دسی‌بل در سطح کلی فشار صدا شده است. میانگین ضریب کشش ۴۰ درصد و میانگین جذرمربعات ضریب بالابرنده ۷۵۰ درصد افزایش یافته است. همچنین الگوهای متقارن در حالت ثابت و قفل‌شده و الگوهای نامتقارن در حالت‌های غیرهمگام نوسان مشاهده شد.

معادلات حاکم و مسئله مورد بررسی

برای شبیه‌سازی جریان آشفته حول استوانه، از روش (*LES*) استفاده شد. در این پروژه مدل آشفتگی به کار رفته از نوع هیبریدی ^۱ (*Spalart - AllmarasDDES*) می‌باشد که ترکیبی از مدل *RANS* و *LES* است و امکان شبیه‌سازی دقیق نوسانات گردابه‌ای در جریان‌های با رینولدز متوسط تا بالا را فراهم می‌کند. پارامترهای مدل مطابق با پیش‌فرض‌های *OpenFOAM* تنظیم شده‌اند و شامل ضرایب کلاسیک (*Spalart - Allmaras*) و ضرایب (*DDES*) برای تعیین سهم ناحیه *RANS* و *LES* می‌باشد. از روش *cubeRootVol* برای تعیین طول مقیاس فیلتر *LES* استفاده شده است. تا انسجام با اندازه سلول‌های شبکه حفظ شود. جهت تحلیل آکوستیکی از آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده شده است. آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز ^۲ (*FW-H*) یک روش پیشرفته در علم دینامیک سیالات آکوستیکی است که برای تحلیل صدای تولید شده توسط جریان‌های سیال حول اجسام متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش توانست محدودیت‌های آنالوژی کرل را که فقط به اجسام ثابت توجه داشت، برطرف کند و امکان مطالعه روی اجسام متحرک را فراهم سازد. معادله *FW - H* یک معادله موج ناهمگن است که شامل منابع صوتی و نیروهای سطحی ناشی از جریان سیال است. این معادله از انجام عملیات ریاضی روی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به دست می‌آید و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_\infty v_n + p(u_n - v_n)] \delta(f) - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (1)$$

برای حل این معادله، از توابع گرین استفاده می‌شود که به ما اجازه می‌دهد معادله را به صورت انتگرال‌هایی روی سطح و حجم بنویسیم. انتگرال‌های سطحی مربوط به چشمه‌های صوتی تک‌قطبی و دوقطبی هستند. این انتگرال‌ها بیشتر در شرایطی که سطح کنترل شامل تمامی چشمه‌های صوتی باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتگرال‌های حجمی مربوط به چشمه‌های صوتی چهار قطبی هستند. اما در جریان‌هایی با عدد ماخ پایین و در حالتی که سطح کنترل شامل تمامی چشمه‌های صوتی باشد، این انتگرال‌ها می‌توانند قابل صرف‌نظر باشند و پاسخ نهایی تنها از طریق انتگرال‌های سطحی به دست آید. این روش و معادلات مرتبط با آن به ما اجازه می‌دهند تحلیل دقیقی از صدای تولید شده توسط جریان‌های پیچیده در اطراف اجسام متحرک انجام دهیم. هدف از مطالعه آکوستیک، تشخیص و تجزیه و تحلیل نویز، شناسایی و حذف نویزهای ناخواسته در محیط‌های مختلف، از

¹Spalart-Allmaras Delayed Detached Eddy Simulation

²Fox Williams-Hawkins

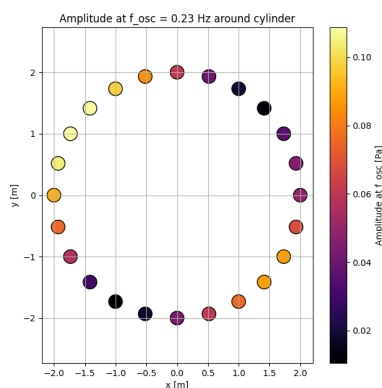
جمله صنعتی، شهری و خانگی و همچنین حفاظت از سلامت شنوایی و شناسایی و کاهش نویزهای محیطی که ممکن است به شنوایی انسان آسیب برسانند، می باشد. محدوده شنوایی گوش انسان معمولاً بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز است. این محدوده به طور کلی شامل اصواتی می شود که انسان ها می توانند بشنوند و احساس کنند. البته این محدوده بسته به سن، سلامت گوش و عوامل محیطی می تواند متفاوت باشد. نتایج آکوستیکی به صورت سطح فشار صدا در مقیاس دسی بل (dB) ارائه می شوند. سطح فشار صدا (SPL)^۳ به این شکل تعریف می شود:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p_e}{p_{ref}} \right) \quad (2)$$

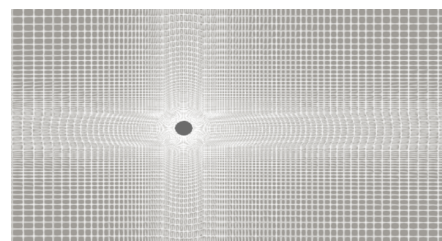
که در آن p_e فشار صوتی مؤثر (RMS) و $p_{ref} = 1 \mu Pa$ فشار مرجع در آب است. برای طیف صوتی، مقادیر SPL در برابر فرکانس های متناظر آن ها رسم می شوند. در این حالت، SPL با در نظر گرفتن فشار مؤثر به عنوان طیف دامنه ی داده های فشار صوتی نوسانی محاسبه می شود. با استفاده از نتایج طیف صوتی، می توان سطح کلی فشار صوتی ($OASPL$)^۴ را با جمع کردن تمامی دامنه های نویز موجود در طیف به دست آورد. [۱۳]

$$OASPL = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{SPL_i/10} \right) \quad (3)$$

در پروژه ی حاضر جریان آشفته و تراکم ناپذیر سیال نیوتونی حول استوانه در دو حالت نوسانی و ثابت در رینولدزهای ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰، مورد مطالعه قرار گرفته است. هندسه ی استوانه مورد مطالعه مطابق شکل ۱(آ) می باشد. به منظور مطالعه و



(ب) نمایش موقعیت پروب های اطراف استوانه



(آ) نمایش هندسه استوانه در دامنه شبیه سازی CFD

شکل ۱: نمودار (آ) ساختار مش استوانه در نرم افزار اپن فوم و (ب) نمایش موقعیت پروب ها در اطراف استوانه جهت اندازه گیری تغییرات فشار در میدان دور

تحلیل تابش آکوستیکی ناشی از جریان آشفته در اطراف استوانه، ۲۴ میکروفون به صورت یکنواخت در پیرامون استوانه و در سه شعاع مختلف (۲، ۴ و ۱۰ متر) با گام زاویه ای ۱۵ درجه در صفحه ی میانی ($z = 0$) قرار داده شده است. زاویه θ برابر ۰ درجه در راستای جریان ورودی و θ برابر ۱۸۰ درجه در پایین دست استوانه قرار دارد که بیشترین سطح نویز ناشی از جدایش گردابه در آن مشاهده می شود. برای تمامی میکروفون ها فشار مرجع برابر 10^{-6} پاسکال و فرکانس نمونه برداری FFT برابر ۱۰۲۴ هرتز در نظر گرفته شده است. محل قرارگیری پروب ها در شکل ۱(ب) نمایش داده شده است. در این شکل نقاط روشن تر نشان دهنده دامنه بالاتر فشار هستند و بنابراین مناطقی که پاسخ دینامیکی بیشتری به نوسان استوانه دارند، مشخص می شوند. این تصویر

³Sound Pressure Level

⁴Overall Sound Pressure Level

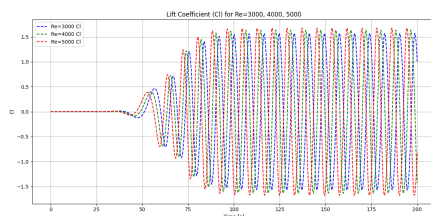
توزیع فضایی فشار و شدت اثر نوسان را در اطراف استوانه به وضوح نمایش می‌دهد.

صحت سنجی

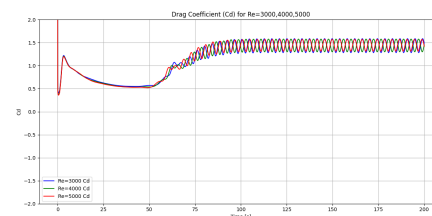
برای اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌های عددی، ضرایب آیرودینامیکی شامل ضریب پسمیانگین ($\overline{C_d}$)، جذر میانگین مربعات ضریب برآ ($C_{l,rms}$)، ضریب فشار در محل پشت استوانه ($C_{p,180^\circ}$) و عدد استروهال (St) برای جریان عبوری از روی استوانه‌ی دایره‌ای در اعداد رینولدز $Re = 3000$ ، 4000 و 5000 محاسبه شدند و با داده‌های معتبر تجربی و عددی مقایسه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر به ترتیب زیر می‌باشد:

جدول ۱: مقادیر ضرایب آیرودینامیکی و عدد استروهال در رینولدزهای مختلف

St_{FFT}	$\overline{C_{p,back}}$	$(C_l)_{RMS}$	$\overline{C_d}$	Re
۰/۲۲۹۹۵	۱/۱۷۰۵۰	۰/۹۲۰۹۴	۱/۲۲۲۱۹	۳۰۰۰
۰/۲۲۹۹۳	۱/۱۷۸۱۷	۰/۹۶۰۳۱	۱/۲۲۱۸۶	۴۰۰۰
۰/۲۲۹۹۴	۱/۱۹۰۴۱	۰/۹۹۵۳۹	۱/۲۲۹۲۲	۵۰۰۰



(ب) ضریب لیفت (C_l)



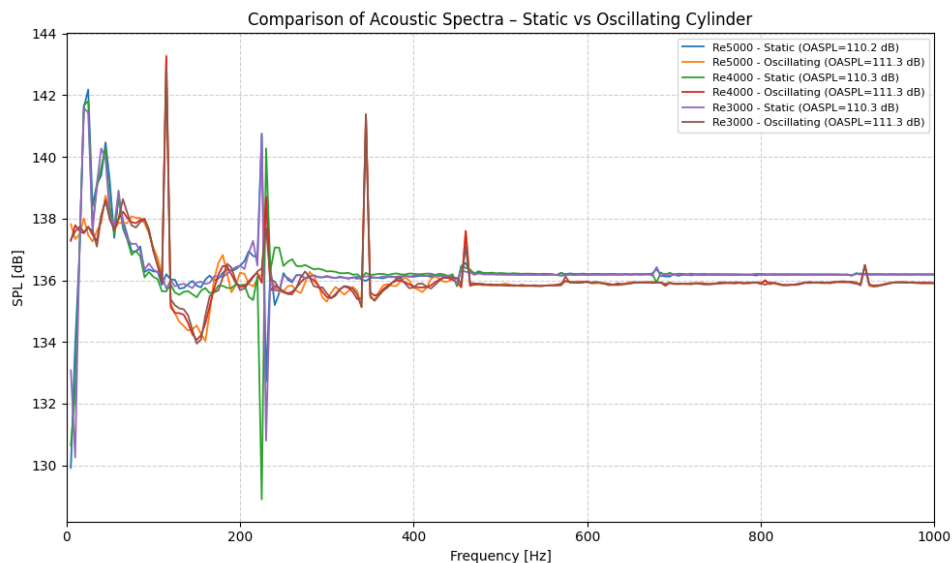
(آ) ضریب درگ (C_d)

شکل ۲: دو نمودار ضریب درگ و لیفت در کنار هم

این مقادیر با داده‌های تجربی و عددی معتبر ارائه‌شده توسط آشنباخ [۱۴]، نوربرگ [۱۵]، کراوچنکو و موین [۱۶] و میتال و بالاچاندار [۱۷] مقایسه شدند. به‌طور مثال، برای $Re = 3000$ ، مقدار مرجع ضریب پسا $\overline{C_d}$ بین ۱.۲۰ تا ۱.۳۵ و عدد استروهال St بین ۰.۲۱ تا ۰.۲۴ گزارش شده است که با نتایج حاضر تطابق خوبی دارد. برای $Re = 4000$ ، $\overline{C_d}$ بین ۱.۲۰ تا ۱.۳۰ و St بین ۰.۲۱ تا ۰.۲۳ است و برای $Re = 5000$ نیز $\overline{C_d}$ حدود ۱.۲۰ تا ۱.۳۰ و St بین ۰.۲۱ تا ۰.۲۳ گزارش شده است. مطابقت بین نتایج حاضر و داده‌های مرجع نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب شبکه و مدل آشفتگی (*SpalartAllmarasDDES*) استفاده‌شده در این تحقیق است و می‌تواند صحت محاسبات جریان و پارامترهای آیرودینامیکی را تضمین نماید.

نتایج

در نرم‌افزار اپن‌فوم با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، در رینولدزهای ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ استوانه‌ای با شعاع ۱ متر با فرکانس ۰/۲۳ هرتز نوسان داده شد و نتایج آن با استوانه ثابت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به شرح زیر در جدول زیر نگاشته شده‌است.



شکل ۳: مقایسه طیف آکوستیکی برای استوانه ساکن و نوسانی در عدد رینولدزهای مختلف. محور افقی فرکانس (Hz) و محور عمودی سطح فشار صوتی (SPL) بر حسب دسی بل را نشان می‌دهد. خطوط رنگی نمایانگر شرایط مختلف جریان هستند: استوانه ساکن و نوسانی در $Re = 5000$ ، $Re = 4000$ ، و $Re = 3000$. مشاهده می‌شود که نوسان استوانه باعث افزایش جزئی در $OASPL$ شده و تغییراتی در توزیع فرکانسی ایجاد کرده است. این نمودار برای تحلیل اثر نوسان بر انتشار صوت در جریان آشفته پیرامون اجسام مفید است.

جدول ۲: مقایسه سطح فشار صوتی کلی ($OASPL$)، بیشینه SPL و اختلاف آن‌ها بین استوانه ساکن و نوسانی در اعداد رینولدز مختلف

اختلاف (نوسانی - ساکن)			نوسانی			ساکن			Re
Δf	ΔSPL	$\Delta OASPL$	فرکانس (Hz)	SPL بیشینه	$OASPL$	فرکانس (Hz)	SPL بیشینه	$OASPL$	
۹۵/۰+	۱/۳۰+	۰/۹۷+	۱۱۵/۰	۱۴۲/۸۹	۱۱۱/۳۰	۲۰/۰	۱۴۱/۵۹	۱۱۰/۳۳	۳۰۰۰
۹۰/۰+	۱/۴۵+	۰/۹۹+	۱۱۵/۰	۱۴۳/۲۵	۱۱۱/۲۷	۲۵/۰	۱۴۱/۸۰	۱۱۰/۲۸	۴۰۰۰
۹۰/۰+	۱/۱۱+	۱/۰۰+	۱۱۵/۰	۱۴۳/۲۹	۱۱۱/۲۵	۲۵/۰	۱۴۲/۱۸	۱۱۰/۲۵	۵۰۰۰

جدول ۳: تغییرات تراز فشار صوتی و توان صوتی در اعداد رینولدز مختلف

عدد رینولدز	ΔSPL (dB)	افزایش توان صوتی تقریبی (%)	$\Delta OASPL$ (dB)	افزایش توان صوتی تقریبی (%)
۳۰۰۰	۱/۳۰	۳۵٪	۰/۹۷	۲۵٪
۴۰۰۰	۱/۴۵	۴۰٪	۰/۹۹	۲۵٪
۵۰۰۰	۱/۱۱	۲۹٪	۱/۰۰	۲۶٪

در جدول بالا کاهش توان صوتی بر اساس رابطه $\Delta L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$ محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده در هر سه عدد رینولدز، نوسان استوانه منجر به افزایش تراز فشار صوتی و توان صوتی تابش‌یافته نسبت به حالت ساکن شده است. اختلاف $OASPL$ بین دو حالت در حدود ۰/۹۷ تا ۱/۰۰ دسی بل است که متناظر با افزایشی در حدود ۲۵٪ تا ۲۶٪ در توان صوتی می‌باشد. این افزایش تقریباً مستقل از عدد رینولدز است و نشان می‌دهد که مکانیسم غالب تولید صوت در حالت نوسانی، تحت تأثیر مستقیم حرکت استوانه قرار دارد. علاوه بر این، مطابق نتایج جدول ۳، اختلاف تراز فشار صوتی در فرکانس غالب (ΔSPL) بین ۱.۱۱ تا ۱.۴۵ دسی بل گزارش شده است که متناظر با تغییر توان صوتی قابل توجه‌تری در حدود ۲۹٪ تا ۴۰٪ می‌باشد. این موضوع بیانگر آن است که نوسان استوانه تأثیر قوی‌تری بر بازتوزیع انرژی طیفی صوت نسبت به

افزایش انرژی کل تابش یافته دارد. در حالت استوانه ساکن، فرکانس متناظر با بیشینه SPL در بازه ۲۰ تا ۲۵ هرتز قرار دارد که با فرکانس طبیعی رهایش گردابه‌ها بر اساس قانون استرومال سازگار است. در مقابل، در حالت نوسانی، فرکانس غالب تابش صوتی به حدود ۱۱۵ هرتز منتقل می‌شود، در حالی که فرکانس نوسان مکانیکی استوانه تنها ۰.۲۳ هرتز است. این اختلاف چند مرتبه‌ای نشان می‌دهد که پیک آکوستیکی مشاهده شده مستقیماً ناشی از تحریک هارمونیک سازه نیست، بلکه حاصل تغییر غیرخطی در دینامیک ناحیه‌ی پس جریان و فرآیند تشکیل گردابه‌ها تحت تأثیر حرکت نوسانی استوانه می‌باشد. بر اساس آنالوژی فاکس - ویلیامز، افزایش توان صوتی و انتقال فرکانس غالب تابش صوتی که در جدول ۳ گزارش شده است، به تقویت مؤلفه‌ی دوقطبی منبع صوتی ناشی از نوسانات نیروهای سطحی روی دیواره‌ی استوانه نسبت داده می‌شود. نوسان استوانه موجب افزایش دامنه و نرخ تغییرات زمانی این نیروها شده و در نتیجه، تابش صوتی در فرکانس‌های بالاتر تشدید می‌گردد. بنابراین، نوسان استوانه منجر به قفل‌شدگی فرکانسی کلاسیک بین فرکانس رهایش گردابه‌ها و فرکانس تحریک سازه نمی‌شود، بلکه نوعی پاسخ غیرخطی جریان - سازه را ایجاد می‌کند که فرکانس غالب تابش صوتی را از فرکانس طبیعی رهایش گردابه‌ها جدا می‌سازد.

مراجع

- [1] Lighthill, Michael James. On sound generated aerodynamically i. *general theory. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 211(1107):564-587, 1952.
- [2] Curle, Neville. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 231:505-514, 1955.
- [3] Williams, BY J. E. Ffowcs and HAWKINGSt, D. L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 264:321 - 342, 1969.
- [4] Hardin, Jay C. and Lamkin, Stanley L. Aeroacoustic computation of cylinder wake flow. *AIAA Journal*, 22:51-57, 1984.
- [5] INOUE , OSAMU and HATAKEYAMA , NOZOMU . Sound generation by a two-dimensional circular cylinder in a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 471:285 - 314, 11 2002.
- [6] Casalino, Damiano and Jacob, Marc C. Prediction of aerodynamic sound from circular rods via spanwise statistical modelling. *Journal of Sound and Vibration*, 262:815-844, 2003.
- [7] Takaishi, Takehisa, Miyazawa, Masashi, and Kato, Chisachi. A computational method of evaluating non-compact sound based on the vortex sound theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121:1353-61, 04 2007.
- [8] Terracol, Marc and Kopiev, Victor. Numerical investigation of the turbulent flow around a truncated cylinder: noise reduction aspects. p. 2868, 2008.

- [9] Orselli, Reinaldo, Meneghini, Julio, and Saltara, Fabio. Two and three-dimensional simulation of sound generated by flow around a circular cylinder. *15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference)*, 05 2009.
- [10] Revell, James, Prydz, Roland A., and Hays, Anthony P. Experimental study of aerodynamic noise vs drag relationships for circular cylinders. *AIAA Journal*, 16:889–897, 1977.
- [11] Choi, Yo-Seb, Choi, Woen-Sug, Hong, Suk-Yoon, Song, Jee-Hun, Kwon, Hyun-Wung, Seol, Han-Shin, and Jung, Chul-Min. Development of formulation q1as method for quadrupole noise prediction around a submerged cylinder. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9, 02 2017.
- [12] Barandagh, Ali Rezaei and Ghazanfarian, Jafar. Hydroacoustics of turbulent flow over superhydrophobic and oscillating cylinders. *Ocean Engineering*, 294:116751, 2024.
- [13] Orselli, Reinaldo Marcondes, Meneghini, Júlio Romano, and Saltara, Fábio. Two and three-dimensional simulation of sound generated by flow around a circular cylinder. 2009.
- [14] Achenbach, E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $re = 5 \times 10^6$. *Journal of Fluid Mechanics*, 34(4):625–639, 1968.
- [15] Norberg, C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio. *Journal of Fluid Mechanics*, 258:287–316, 1994.
- [16] Kravchenko, A. G. and Moin, P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $re = 3900$. *Physics of Fluids*, 12(2):403–417, 2000.
- [17] Mittal, S. and Balachandar, S. Effect of three-dimensionality on the lift and drag of nominally two-dimensional cylinders. *Physics of Fluids*, 7(8):1841–1865, 1995.