

پیش‌بینی عددی نویز دوردست برای هندسه‌های مختلف با استفاده از روش هیبریدی

میلاذ ذبیحی نژاد^۱، علی اکبر دهقان^{۲*}، محمد فرمانی^۳

۱- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲)

چکیده

در این مقاله با هدف بررسی آنالوژی صوتی کرل و فرم فشرده کرل در پیش‌بینی نویز دوردست، جریان اطراف هندسه‌هایی با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و بیضی با اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰، در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم شبیه‌سازی شده است. برای حل جریان تراکم‌ناپذیر از روش رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. به منظور پیش‌بینی مقادیر تراز فشار صوت در دوردست با استفاده از آنالوژی صوتی کرل، داده‌برداری مقادیر نوسانات فشار بر روی سطح با استفاده از ابزار کاوشگر انجام شده در حالیکه در فرم فشرده کرل از نوسانات ضریب نیروی برآ استفاده شده است. در بخش اول نتایج این مطالعه، به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش عددی به کاررفته، متوسط ضرایب آیرودینامیکی (ضرایب پسا و برا)، متوسط ضریب فشار، عدد استروهل و فرم و روند توسعه ساختارهای همدوس جریان با استفاده از معیار کیو مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مشخص گردید که نوسانات نیروهای برآ، پسا، و تلاطم جریان از عوامل تاثیرگذار بر تراز فشار صوت می‌باشند. در بخش دوم نتایج از پژوهش حاضر، سطح صدای تولید شده ناشی از برخورد سیال به هندسه بررسی شده است که به منظور اعتبارسنجی، از نتایج مربوط به تراز فشار صوت دوردست هندسه با سطح مقطع مربعی استفاده شده و کارایی روش حل عددی مناسب ارزیابی شده است. در نهایت نتایج این مطالعه نشان داد که هندسه با سطح مقطع مربعی بیشترین و هندسه با سطح مقطع بیضی کمترین تراز فشار صوت دوردست را ایجاد می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، مدل رهیافت گردابه‌های بزرگ، آنالوژی صوتی، نرم‌افزار اوپن‌فوم

Far-field noise prediction for different geometries with Hybrid method

Abstract

In this study, to investigating the efficiency of the Curle and the compact form of the acoustic analogy in the far-field noise prediction, the flow around a square, a circular and an elliptic cross-sectional geometry at Reynolds numbers of 46000 and 69000 are simulated in the open-source software, OpenFOAM. The large eddy simulation approach has been used to simulate the incompressible flow around the geometries. To predict the far-field sound pressure levels with the Curle acoustic analogy, the data of the surface pressure fluctuations has been used, which were saved during the simulations through the probe utility of OpenFOAM, while with the compact form of the Curle acoustic analogy, the fluctuations of the lift coefficient have been used. To validate the numerical approach in the study, in the first part of the results, the average aerodynamic coefficients (lift, drag coefficients), mean pressure coefficient, Strouhal number and the formation of the coherent structures of the flow through Q-criterion are investigated. It was concluded that the fluctuations of the lift and drag forces, as well as the turbulence intensity are the main parameters affecting the far-field sound pressure level. In the second part of the results of the present study, the far-field sound pressure level due to the interaction of the flow with the geometries were investigated. To validate the results in this section, the far-field sound pressure level of the geometry with square cross-section has been investigated and the proper precision of the approach has been evaluated. Finally, the results of the study have shown that the geometry with the square cross-section produces the maximum and the geometry with the elliptical cross-section produces the minimum far-field sound pressure level.

Keywords: Numerical investigation, Large eddy simulation, acoustic analogy, Software OpenFOAM

مقدمه

جریان سیال اطراف هندسه‌های جریان‌بند^۱، از مسائل پرطرفدار به شمار می‌آید که تحقیقات تجربی، تحلیلی و عددی بسیاری در این زمینه انجام گرفته، لیکن همچنان فیزیک‌های ناشناخته‌ای در این مسائل وجود دارد. صوت تولید شده ناشی از هندسه‌های جریان‌بند در بسیاری از فضاها زیست انسان وجود دارد که می‌توان به مواردی مثل حصارهای به کار رفته در مهندسی معماری، کابل‌های محافظ مربوط به پل‌ها در مهندسی عمران و ... اشاره کرد [۱].

جریان حول اجسام جریان‌بند، ذاتاً ناپایدار بوده و این ناپایداری سبب ایجاد نوسانات نیروهای آیرودینامیکی می‌شود. در بیشتر مواقع این پدیده به دلیل ریزش گردابه است. ریزش گردابه در مقطع عرضی هندسه باعث تولید صدای آهنگین شده که این صدا تأثیرات نامطلوبی را به همراه دارد. ارتعاشی که در اثر این نیروهای نوسانی ایجاد شده ساختار مکانیکی هندسه را نیز تهدید می‌کند. توانایی کنترل صدای تولید شده و طراحی وسایلی برای کاهش نویز ناشی از جریان حول اجسام جریان‌بند، مستلزم شناخت مفاهیم و فیزیک مکانیزم تولید صدا است [۲].

پیچیدگی‌ها و فیزیک مرتبط با پیش‌بینی نویز دوردست^۲ و محاسبات هواصوتی^۳ با روش‌های عددی، چالشی است که طی دهه‌های گذشته توجه محققان بسیاری را به خود معطوف ساخته است.

روش انتگرالی موسوم به آنالوژی صوتی از جمله روش‌های محبوب و پرکاربرد در پیش‌بینی نویز دوردست است. در این روش، جریان در میدان نزدیک^۴ اطراف جسم با استفاده از یک روش عددی زمانمند، مثل روش حل معادلات غیردائم متوسط‌گیری شده جریان به روش رینولدز^۵ یا رهیافت شبیه‌سازی گردابه بزرگ و یا روش مستقیم حل عددی، شبیه‌سازی

می‌شود. در مقایسه با روش مستقیم که در آن تولید و انتشار امواج صوتی به‌طور مستقیم با حل کامل معادلات ناویر-استوکس محاسبه می‌شود، روش انتگرالی نیاز به زمان محاسباتی بسیار کمتری دارد و در بیشتر موارد انتخاب اصلی برای محققین است.

شبیه‌سازی عددی از جریان اطراف هندسه بیضوی در اعداد رینولدز بالا با استفاده از معادلات غیردائم متوسط‌گیری شده به روش رینولدز توسط روات و همکاران [۳] انجام شده است. هدف از این مطالعه ارزیابی ضریب پسا در انواع مختلف نسبت محوری و سرعت ورودی بوده است. از نتایج مهم این مطالعه، کاهش ۴۰ تا ۴۵ درصدی ضریب پسا برای محدوده عدد رینولدز در نظر گرفته شده با نسبت محوری ۰/۶، نسبت به هندسه دایره‌ای است.

جریان آرام حول سیلندر بیضوی با در نظر گرفتن اثرات نسبت محوری (نسبت محور کوچک به بزرگ) توسط فاروکی و همکاران [۴] به صورت عددی بررسی شده است. پارامترهای مختلف از قبیل: ضریب پسا، توزیع فشار و سرعت به عنوان توابعی از نسبت محوری گزارش شده و نتایج نشان دهنده افزایش اندازه دنباله و ضریب پسا با افزایش نسبت محوری است.

شارما و همکاران [۵] به مطالعه عددی ساختار جریان پایین‌دست اجسام جریان‌بند با اشکال مختلف پرداخته‌اند. تغییر اشکال نظیر دایره تا بیضی با تغییر در نسبت محوری ضمن ثابت نگه‌داشتن عدد رینولدز بدست آمده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که ویژگی جریان کاملاً وابسته به شکل و نسبت انسداد اشکال مختلف است. همچنین فشار متوسط و انرژی جنبشی آشفته برای نسبت انسداد و نسبت منطری‌های مختلف ارائه شده است.

مطالعه دقیقی در مورد ویژگی‌های جریان سیال بر روی یک سیلندر بیضوی به صورت عددی توسط رامان و همکاران [۶] انجام گرفته است. شبیه‌سازی‌ها برای اعداد رینولدز مختلف از ۵۰ تا ۵۰۰ با نسبت محوری بین ۰/۱ تا ۱ انجام شده است. تأثیر نسبت محوری برای همه اعداد رینولدز محسوس بوده، به طوری‌که مقادیر طول دنباله، ضریب پسا و عدد استروهمال با کاهش نسبت محوری برای یک عدد رینولدز مشخص، کاهش یافته‌است.

در زاویه حمله ۱۳ درجه می‌رسد و تا محدوده زاویه حمله ۱۵ درجه افزایش می‌یابد و سپس تقریباً ثابت می‌گردد. در زاویه حمله ۱۳ درجه جدایی جریان در لبه جلویی و اتصال به سطح در نزدیکی لبه عقبی رخ می‌دهد.

تأثیر زبری سطح و عدد رینولدز بر صدای تولید شده از یک هندسه مربعی در زوایای حمله صفر، ۳۰ و ۴۵ درجه به صورت تجربی در مطالعه هاجسون [۱۲] بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که زبری سطح، تغییرات قابل توجهی در حداکثر سطح شدت صوت و عدد استروهاال ایجاد نمی‌کند.

در مطالعه دورنینو و همکاران [۲] تراز فشار صوت منتشر شده ناشی از جریان حول هندسه مربعی در دوردست به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که حداقل مقدار تراز فشار صوت در محدوده زوایای حمله بین ۱۳ و ۱۴ درجه رخ داده و سپس با افزایش زاویه حمله تراز فشار صوت نیز افزایش می‌یابد.

در مطالعه مولر [۱۳]، کار تجربی دورنینو و همکاران [۲] به صورت عددی با رهیافت گردابه‌های بزرگ^۷ در عدد رینولدز ۵۰۰۰ و در سه زاویه حمله صفر، ۱۳ و ۴۵ درجه شبیه‌سازی شده است. در شبکه با تعداد سلول‌های مناسب نتایج پیش‌بینی شده برای زاویه حمله صفر درجه مطابقت خوبی با نتایج مطالعات دیگر دارد. همچنین رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دقت شبکه محاسباتی بالا، الگوی متوسط جریان و تراز فشار صوت را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده است.

دولان [۱۴] فرم فشرده^۸ آنالوژی صوتی کرل برای جریان حول دو هندسه دایره‌ای پشت سرهم را ارائه داده است. در شکل فشرده آنالوژی صوتی کرل، نیروهای هیدرودینامیکی ناپایا (که از انتگرال فشارهای نوسانی بدست آمده‌اند و لذا یک خاصیت انتگرالی است) برای محاسبه نویز دوردست استفاده می‌شوند.

یک روش جدید برای محاسبه نویز آیرودینامیکی تولید شده توسط سیلندر دایره‌ای به صورت عددی توسط دولان [۷] ارائه شده است. در این روش، برای حل جریان آشفتنه از شبیه‌سازی معادلات غیردائم متوسط‌گیری شده به روش رینولدز و برای محاسبه نویز میدان دوردست از فرم فشرده آنالوژی صوتی کرل استفاده شده است.

نویز منتشر شده از هندسه‌ها با سطح مقطع‌های مختلف شامل مقاطع مربعی، دایره‌ای، مستطیلی و بیضوی به صورت تجربی توسط ایگل‌سیاس [۸] بررسی شده است. در این مطالعه، وابستگی نویز آیرودینامیکی به عواملی مثل شکل سطح مقطع هندسه، سرعت جریان بالادست، زاویه حمله و زاویه انتشار صوت بررسی شده است.

بررسی جریان تراکم‌ناپذیر آشفتنه اطراف استوانه در عدد رینولدز ۹۰۰۰۰ با استفاده از رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توسط کای و همکاران [۹] به صورت عددی انجام شده است. برای محاسبه تراز فشار صوت در دوردست نیز از روش فوکس ویلیامز-هاو‌کینگز^۶ استفاده شده است. در مطالعه مورد اشاره نتایج قابل قبولی در مقایسه با داده‌های تجربی برای نیروهای پسا و برای نوسانی بدست آمده است. تراز فشار صوت در عدد استروهاال مربوط به ریزش گردابه، دقیقاً پیش‌بینی شده است.

مارگنات [۱۰] انتشار صدا ناشی از جریان آرام حول یک هندسه مستطیلی تحت زوایای حمله مختلف با یک روش عددی دو مرحله‌ای را بررسی کرده است. از نتایج مهم این مطالعه، تناسب قدرت صوت منتشر شده از هندسه با توان دوم عدد ماخ، نیروهای برآ، پسا و نیز توان اول عدد استروهاال است. بررسی تجربی تولید صدا ناشی از برخورد سیال با هندسه مربعی برای اولین بار توسط فوجیتا و همکارانش [۱۱] انجام شده است که هندسه مربعی به صورت عمودی بین دو صفحه در خروجی نازل تونل باد قرار گرفته است. صدای آیرودینامیکی تولید شده به وسیله جریان در مختصات (۰، ۱، ۰) از هندسه مربعی (موقعیت میکروفون در زاویه ۹۰ درجه از هندسه قرار دارد) برای زوایای حمله صفر تا ۹۰ درجه با استفاده از میکروفن اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار تراز فشار صوت از زاویه حمله صفر درجه به حداقل مقدار خود

مسائل آیرودینامیکی در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم، عملیات ریاضی آنالوژی صوتی کرل با استفاده از توابع تعریف شده موجود در کتابخانه اوپن‌فوم تحت برنامه‌نویسی ++C کدنویسی و در کتابخانه نرم‌افزار اعمال شده است.

توجه به این نکته ضروری است که، در سال‌های اخیر معمولاً برای حل مسائل دینامیک سیالات از حلگرهای متن‌باز^{۱۰} و به‌روزی همچون اوپن‌فوم استفاده می‌شود. مزیت این تغییر رویکرد به انعطاف‌پذیری و قابلیت دسترسی نرم‌افزارهای متن‌باز و حذف هزینه‌های بالای استفاده از کدهای تجاری مرتبط است. در نرم‌افزار اوپن‌فوم برای مدل‌سازی هر زیر شاخه از مکانیک سیالات نیاز به تعریف پارامترهای مورد نیاز مسأله و پس از آن فراخوانی یک حلگر منحصر به فرد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که انتخاب حلگر، مهمترین و در عین حال دشوارترین مرحله در مدل‌سازی جریان به وسیله نرم‌افزار اوپن‌فوم است.

در مطالعه حاضر، برای نخستین بار در کشور، پیش‌بینی نویز دوردست ناشی از جریان اطراف اجسام دارای سطح مقطع مختلف با استفاده از رهیافت هیبریدی شامل ترکیب آنالوژی صوتی کرل و یا فرم فشرده کرل با رهیافت گردابه‌های بزرگ در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم انجام شده است. برای پیش‌بینی نویز دوردست، جریان تراکم‌ناپذیر در اطراف اجسام با سطح مقطع‌های مختلف، تحت زاویه حمله صفر درجه و اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ شبیه‌سازی شده است. همچنین از ابزار کاوشگر برای داده‌برداری نوسانات فشار روی سطح هندسه ضمن حل میدان جریان، استفاده شده است. نوسانات فشار داده‌برداری شده بعنوان منابع اصلی صوت منتشر شده و داده ورودی کد محاسباتی آنالوژی صوتی کرل و نوسانات ضریب نیروی برآ بعنوان داده ورودی کد محاسباتی فرم فشرده کرل مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پیش‌بینی تراز فشار صوت در دوردست برای هندسه با سطح مقطع مربعی با نتایج تجربی در دسترس [۲] مقایسه و اعتبارسنجی شده است. بعلاوه متوسط ضرایب آیرودینامیکی، متوسط ضریب فشار، عدد استروهل و فرم و روند توسعه ساختارهای همدوس جریان با استفاده از معیار کیو برای هندسه با سطح مقطع‌های مربعی، دایره‌ای و بیضوی بررسی شده است.

صدای آیرودینامیکی تولید شده از حضور گوه در دنباله هندسه دوبعدی مربعی به منظور کنترل نویز، برای عدد رینولدز ۲۲۰۰۰ به روش عددی، توسط سامیون و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه برای پیش‌بینی نویز اطراف اجسام جریان‌بند دوبعدی با استفاده از روش هیبریدی از رهیافت حل جریان با معادلات غیردائم متوسط‌گیری شده به روش رینولدز و قیاس صوتی بر اساس فرم فشرده آنالوژی صوتی کرل استفاده شده است.

پیاده‌سازی، ارزیابی و اعتبارسنجی آنالوژی صوتی کرل در پیش‌بینی نویز دوردست جریان اطراف هندسه مربعی با اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰، در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم^۹ توسط ذبیحی‌نژاد و همکاران [۱۶] انجام شده است. برای حل جریان تراکم‌ناپذیر از روش حل معادلات غیردائم متوسط‌گیری شده به روش رینولدز با مدل تلاطم کا-امگا و رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. به‌منظور پیش‌بینی مقادیر تراز فشار صوت در دوردست با استفاده از آنالوژی صوتی کرل، داده‌برداری مقادیر نوسانات فشار بر روی سطح هندسه مربعی با استفاده از ابزار کاوشگر انجام شده است. در این مطالعه متوسط ضرایب آیرودینامیکی (ضرایب پسا و برا)، متوسط ضریب فشار و عدد استروهل بررسی شده و مشخص گردید که نوسانات نیروهای برآ، پسا و تلاطم جریان از عوامل تاثیرگذار بر تراز فشار صوت هستند.

مطابق اطلاعات نویسندگان، تاکنون مقایسه همزمان کارآیی آنالوژی صوتی کرل و فرم فشرده کرل برای تعیین نویز دوردست ناشی از جریان اطراف هندسه با سطح مقطع‌های مختلف در نرم‌افزار اوپن‌فوم انجام نشده است. برای پیش‌بینی نویز دوردست با استفاده از فرم فشرده آنالوژی صوتی کرل، مجموع اثر نیروهای نوسانی به عنوان چشمه نویز دوردست در نظر گرفته می‌شود در حالیکه در آنالوژی صوتی کرل از توزیع فشارهای نوسانی وارد به سیال که خاصیتی موضعی و وابسته به ساختار جریان اطراف هندسه دارند، استفاده می‌گردد. همچنین آنالوژی صوتی کرل در نرم‌افزار اوپن‌فوم اعمال نشده و این نرم‌افزار در زمینه پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی و حل مسائل آیرودینامیکی دارای کتابخانه کاملی از کدهای محاسباتی مورد نیاز نیست. به همین خاطر توسط نویسندگان مطالعه حاضر، با هدف رفع بخشی از نیازمندی لازم جهت حل

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (۴)$$

در مفاهیم رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تنش‌های مقیاس زیر شبکه به صورت رابطه (۵) است.

$$\tau_{ij} = (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) + (\bar{u}_i \bar{u}'_j + \bar{u}'_j \bar{u}_i) + \bar{u}'_i \bar{u}'_j \quad (۵)$$

نقش تنش مورد اشاره در رابطه فوق، در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مشابه تنش رینولدز در معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس است. در همین ارتباط، در سال ۱۹۶۳ اسماگورینسکی تنش‌های مقیاس زیر شبکه را به صورت رابطه (۶) ارائه داد.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad (۶)$$

که \bar{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش، δ_{ij} دلتا کرونگر^{۱۱} و ν_T لزجت تلاطم هستند. در این مطالعه از مدل زیر شبکه استفاده شده است. این مدل نسبت به مدل‌های دیگر نتایج بهتری را شبیه‌سازی می‌کند [۱۹].

که لزجت زیر شبکه‌ای ν_T با توجه به مدل اسماگورینسکی دینامیکی استخراج می‌شود.

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (۷)$$

در مدل اسماگورینسکی دینامیکی، ضریب ثابت C_s ، به صورت محلی و با استفاده از دو فیلتر شبکه با عرض Δ و فیلتر آزمون با عرض 2Δ ، بدست می‌آید. برای تعیین ضریب ثابت C_s ، تانسور L_{ij} با توجه به دو فیلتر شبکه با نماد $(\cdot\cdot\cdot)$ و فیلتر آزمون با نماد $(\cdot\cdot\cdot)$ در قالب تساوی جرمانو، تعریف شده است.

$$L_{ij} = 2\bar{\Delta}^2 \left| C_s \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij} - 4C_s^2 \left| \hat{S} \right| \hat{S}_{ij} \right| \quad (۸)$$

در واقع تانسور L_{ij} سهم تنش‌های مقیاس‌های زیر شبکه‌ای است که اندازه‌های کوچکتر از فیلتر آزمون و بزرگتر از فیلتر شبکه دارند. با توجه به مدل اسماگورینسکی دینامیکی ضریب ثابت C_s طبق معادله (۹) بدست می‌آید.

$$C_s^2 = \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (۹)$$

$$M_{ij} = 2\bar{\Delta}^2 \left(\left| \hat{S} \right| \hat{S}_{ij} - \alpha^2 \left| \bar{S} \right| \bar{S}_{ij} \right) \quad (۱۰)$$

معادلات حاکم

مدل اغتشاشی رهیافت گردابه‌های بزرگ

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر قابل

بیان است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j + p \delta_{ij} + 2\mu S_{ij}) = 0 \quad (۲)$$

رابطه (۱) معادله بقای جرم و رابطه (۲) معادله مومنتوم است که در این معادلات، u_i نشان دهنده بردار سرعت، p بیانگر میدان فشار و S_{ij} تانسور نرخ کرنش است که:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ براساس تئوری کولموگروف پایه‌گذاری شده است [۱۷]. در این تئوری فرض شده است که گردابه‌های بزرگ وابسته به هندسه جریان هستند و مشخصات گردابه‌های کوچک برای تمام هندسه‌ها یکنواخت است. معادلات رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با اعمال نمودن نوعی فیلتر عمومی مکانی بر معادلات اصلی جریان بدست می‌آیند. این کار برای محدود نمودن اندازه مقیاس‌های موجود در جریان انجام می‌گیرد. در این فرآیند، یک متغیر عمومی به یک مولفه با مقیاس بزرگ و یک مولفه با مقیاسی کوچک‌تر از اندازه شبکه تجزیه می‌شود. فیلتر نمودن سرعت به صورت رابطه (۳) می‌باشد [۱۸].

$$\bar{u}_i = \int G(x, x') u_i(x') dx' \quad (۳)$$

در این رابطه منظور از $G(x, x')$ تابع فیلتر است که نوسانات مکانی با طولی کوچک‌تر از Δx را میرا می‌کند. اگر معادلات ناویراستوکس فیلتر شوند، معادلات به‌دست آمده شباهت زیادی با معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویراستوکس دارند. برای جریان تراکم‌ناپذیر بدون نیروی حجمی معادله ساده‌شده ناویراستوکس در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به صورت رابطه (۴) است [۱۸].

که $\alpha = \hat{\Delta}/\bar{\Delta} \approx 2$ است. به منظور کاهش نوسانات حل، از میانگین گیری مکانی در طول یک صفحه موازی با دیوار استفاده شده و در نهایت ضریب ثابت C_s از رابطه (۱۱) بدست می آید.

$$C_s^2 = \frac{\langle L_{ij} M_{ij} \rangle}{\langle M_{ij} M_{ij} \rangle} \quad (11)$$

مدل اسماغورینسکی دینامیکی، از دقت بالاتری نسبت به مدل های استاتیکی، برخوردار است.

آنالوژی صوتی کرل

براساس فرضیه کلی لایتھیل [۲۰]، آنالوژی کرل یک تعمیم بر آنالوژی لایتھیل است که اثر مرزهای جامد در تولید نویز را اعمال کرده است [۲۱]. براساس فرضیه کرل، دو اصل به تولید صدای کلی اضافه شده است: الف) صدای تولید شده از چهار قطبی های^{۱۲} آنالوژی صوتی لایتھیل، با در نظر گرفتن انتشار صوت ناشی از حضور مرزهای جامد و انکسار در حضور مرزهای جامد محاسبه خواهد شد. ب) منابع دو قطبی^{۱۳} تولید صوت، که به واسطه تأثیر نیروهای نوسانی آیرودینامیکی بر مرزهای جامد در سیال به وجود می آیند.

جزئیات بیشتر مرتبط با آنالوژی صوتی کرل در مرجع [۲۱] ارائه شده و در این بخش تنها برخی معادلات کلیدی و مفاهیم اصلی مربوط به آنالوژی کرل برجسته شده است.

لایتھیل تابع اسکالر مربوط به متغیر صوتی ρ' را با گرفتن مشتق زمانی از معادله پیوستگی و تفریق آن از دیورژانس معادله مومنوم بدست آورد. در این محاسبه، فرض شده که نیروهای خارجی و منابع جرمی وجود ندارند. معادله موج ناهمگن (معادله لایتھیل) به صورت زیر بدست می آید [۲۰]:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (12)$$

که تانسور تنش لایتھیل در رابطه (۱۳) تعریف شده است.

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} (p' - c_0^2 \rho') - \tau_{ij} \quad (13)$$

از این رو، $\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = 0$ ، T_{ij} تانسور تنش لایتھیل، c_0 سرعت صوت و δ_{ij} دلتای کرونکر است.

رابطه (۱۲) شامل هیچ فرضیه ای نیست، بنابراین می تواند به عنوان معادله دقیق فیزیکی برای انتشار صوت مورد توجه قرار گیرد. این رابطه به عنوان معادله موج ناهمگن با فرضیاتی که ترم سمت راست معادله مستقل از ترم سمت چپ شناخته می شود، در نظر گرفته شده و اطمینان حاصل می شود که انتشار صوت از منبع آن جدا شده است.

آنالوژی صوتی کرل به این گونه است که وجود منابع دو قطبی را با اضافه کردن ترم $\partial f_i / \partial x_i$ به سمت راست رابطه (۱۲) و اعمال اثر حضور مرزهای جامد، آنالوژی لایتھیل را تعمیم داده است. در عددهای ماخ پایین، منابع دو قطبی نسبت به منابع چهار قطبی، در تولید نویز موثرترند، چراکه در این رژیم های جریانی، مکانیزم اصلی تولید و پخش امواج صوتی، سطوح جامد هستند. این سطوح با انعکاس و انکسار اصوات ساطع شده در میدان جریان، سبب تغییر مشخصات امواج صوتی می گردند و لذا در این شرایط، میدان صوتی با در نظر گرفتن منابع دو قطبی و صرف نظر از منابع چهار قطبی، محاسبه می شود [۲۱].

شکل کلی از حل معادله موج ناهمگن لایتھیل در رابطه (۱۴) نشان داده شده است [۲۱].

$$\rho' = \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_V \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial y_i \partial y_j} \frac{1}{|x-y|} dV(y) + \frac{1}{4\pi} \int_S \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial n} \rho + \frac{1}{c_0 r} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right\} dS(y) \quad (14)$$

ترم های $\partial^2 T_{ij} / \partial y_i \partial y_j$ ، $\partial \rho / \partial t$ و $\partial \rho / \partial n$ مربوط به رابطه (۱۴) در گام های زمانی قبل تر یعنی $t - r/c_0$ محاسبه شده است، که $r = |x - y|$ است. شبه سنجه های x موقعیت منبع صوت، y موقعیت شنونده، n بردار نرمال به سمت بیرون از سطح، V حجم کل خارج از مرزهای جامد و S سطح مرزهای جامد را نشان می دهند.

$$p'(x,t) \cong \frac{x_i x_j}{4\pi \|x\|^3 c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_V [T_{ij}] dV(y) - \quad (17)$$

$$\frac{x_j}{4\pi \|x\|^2 c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_S p n_i dS$$

باتوجه به فرضیات در نظر گرفته شده برای رسیدن به رابطه فوق، این رابطه یک رابطه دقیق نیست لذا به هنگام استفاده از معادله کرل باید به فرضیاتی توجه شود. این فرضیات در مرجع [۲۱] ارائه شده است.

برای جریان‌های با عدد ماخ پایین، اولین ترم رابطه (۱۷) که انتگرال روی حجم است را می‌توان نادیده گرفت، به طوری که منابع چهار قطبی نادیده گرفته شود.

فرم فشرده آنالوژی صوتی کرل

به منظور پیش‌بینی نویز دوردست ناشی از نیروی نوسانی F که بر سیال ساکن وارد شده، می‌توان معادله کرل [۲۱] را به صورت زیر ساده سازی کرد [۷].

$$p'(x,t) = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{F_i}{r} \right] = \frac{1}{4\pi c_0} \frac{x_i}{r^2} \left[\frac{\partial F_i}{\partial t} \right] \quad (18)$$

که F_i مولفه‌های بردار نیروی وارد بر سیال توسط جسم است. در فرم فشرده کرل (رابطه (۱۸))، فرض می‌گردد که نویز دارای خاصیت دوقطبی است و اندازه آن توسط نیروی نوسانی F کنترل می‌شود [۷].

به منظور بررسی تراز فشار صوت بر روی سطح هندسه، داده‌برداری نوسانات فشار سطحی هندسه نسبت به زمان با استفاده از ابزار کاوشگر انجام شده و طبق رابطه (۱۹) محاسبه شده است.

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p'_{rms}}{p_{ref}} \quad (19)$$

$$p'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} (p_1'^2 + p_2'^2 + \dots + p_n'^2)}$$

$$p'_i = p_i - \bar{p}_i$$

در این رابطه p_i و $p_{ref} = 20 \mu pa$ ها فشار استاتیکی بر حسب پاسکال هستند. پارامتر n برابر با تعداد نمونه‌هایی است که برای هر نقطه ثبت شده، به عبارت دیگر این پارامتر با تعداد گام زمانی برابر است.

رابطه ساده شده کرل (۱۴) با معرفی تابع گرین^{۱۴} و ساده تر کردن آن از نظر ریاضی به صورت رابطه (۱۵) بیان شده است [۲۱].

$$\rho'(x,t) = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}}{r} dV(V) - \quad (15)$$

$$\frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{n_i}{r} (\rho \delta_{ij} - \tau_{ij}) dS(y)$$

مشتقات درون انتگرال‌ها حل و $\rho' = p'/c_0^2$ برای رسیدن به تخمین نوسانات فشار دوردست استفاده می‌گردد که در رابطه (۱۶) نشان نشان داده شده است.

$$p'(x,t) \cong \frac{x_i x_j}{4\pi \|x\|^2 c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_V \left[\frac{T_{ij}}{r} \right]_{re} dV(y) - \quad (16)$$

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \left[\frac{\rho v_i}{r} \right]_{re} n_i dS -$$

$$\frac{x_j}{4\pi \|x\| c_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{P_{ij} + \rho v_i v_j}{r} n_i dS$$

زمان تاخیر^{۱۵} (te) بر روی سطح می‌تواند نادیده گرفته شود، فرض بر این است که ناحیه منبع به عنوان جسم متمرکز عمل کرده، و به صورت $r = |x|$ با $y = 0$ بازنویسی می‌شود. اولین ترم انتگرال، بیانگر صدای تولید شده مربوط به چهار قطبی‌هایی است که توسط مرزهای جامد، منعکس و منتشر می‌شود. دومین ترم انتگرالی بیانگر میدان صوتی تک قطبی^{۱۶} است که به سبب جرم عبوری از سطح ایجاد می‌شود، در صورتیکه در مسئله تزریق و مکش وجود نداشته باشد، این ترم قابل صرف‌نظر کردن است. v_i و v_j سرعت‌های سطح صفر هستند. فشار هیدرودینامیکی که درون تانسور تنش $P_{ij} = p \delta_{ij} - \sigma_{ij}$ قرار دارد و ترم لزجت^{۱۷} σ_{ij} با توجه به محاسبات بیشتر، در نظر گرفته نمی‌شود.

۱۳ /

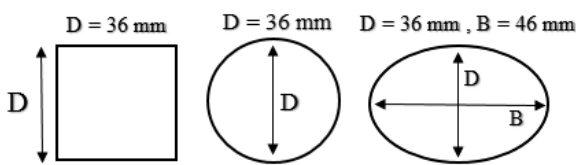
بنابراین رابطه به صورت زیر ساده شده است:

بیان مسئله و استقلال حل از شبکه محاسباتی

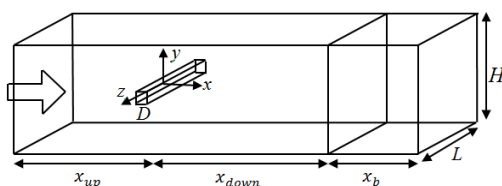
در این بخش سه هندسه با سطح مقطع مختلف شامل سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و بیضوی مطابق شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور اعتبارسنجی روش حل عددی، در ابتدا هندسه مربعی با طول ضلع $D=36\text{ mm}$ و مطابق با مطالعه تجربی دورنینو [۲]، مدل‌سازی و شبکه محاسباتی مناسب ایجاد شده است (شکل ۲). با هدف حذف امواج صوتی انعکاسی ناشی از حضور مرزهای میدان حل، x_{up} طول بالادست جریان با اندازه $15D$ ، x_{down} طول پایین دست جریان با اندازه $40D$ و x_b طول بافر با اندازه $10D$ انتخاب شده است. منطقه بافر عمل میراکنندگی امواج را انجام می‌دهد و در برخی از مطالعات عددی [۱۳]، با هدف حذف نوسانات فشار در مرز خروجی بکار رفته است. H ارتفاع میدان حل با اندازه $10D$ و L اندازه دهانه هندسه در راستای بعد سوم میدان حل برابر با $12/5D$ انتخاب شده است.

میدان حل به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و چهاروجهی شبکه‌بندی شده و به منظور افزایش دقت محاسباتی از شبکه با تراکم بیشتر در نزدیکی هندسه استفاده شده است. نمونه‌ای از شبکه تولید شده در نزدیکی هندسه، در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۱- شماتیک هندسه‌های مورد بررسی



شکل ۲- شماتیک دامنه حل محاسباتی

عدد استروهال برای جریان حول یک هندسه را می‌توان با استفاده از رابطه (۲۰) به دست آورد:

$$St = \frac{fD}{U} \quad (20)$$

که St عدد استروهال، D طول مرجع، U سرعت جریان آزاد و f فرکانس ریزش گردابه است. برای محاسبه فرکانس ریزش گردابه از نمودار تغییرات زمانی ضریب برآ استفاده شده است. در نمودار ضریب برآ در گام‌های زمانی مختلف فاصله بین دو قله یا دو دره متناوب بدست می‌آید. با استفاده از رابطه (۲۱) فرکانس ریزش گردابه محاسبه شده است. همچنین می‌توان از تغییرات زمانی ضریب برآ تبدیل فوریه گرفت و نوسانات نیروی برآ (فرکانس ریزش گردابه) را بدست آورد.

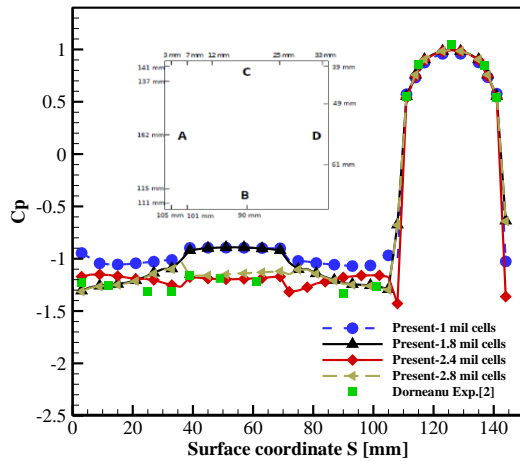
$$f = \frac{1}{\Delta t} \quad (21)$$

در این رابطه Δt فاصله زمانی بین دو قله متوالی است. عدد رینولدز را می‌توان از رابطه (۲۲) بدست آورد:

$$Re = \frac{UD_H}{\nu} \quad (22)$$

که U سرعت جریان، D_H قطر هیدرولیکی و ν لزجت سینماتیکی است.

همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی عددی جریان از نرم‌افزار اوپن‌فوم استفاده شده است. این نرم‌افزار یک ابزار فوق‌العاده قوی برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از مسائل کاربردی در حوزه مکانیک سیالات است و بیش از ۸۰ حلگر برای مسائل مختلف مهندسی در آن پیش‌بینی شده است. همچنین به دلیل متن‌باز بودن برنامه، امکان اضافه کردن و اعمال تغییرات در این حلگرها وجود دارد [۲۲]. برای مدل‌سازی هندسه از حلگر پیزوفوم^{۱۸} استفاده شده است. گسسته‌سازی زمانی در حالت غیردائم به روش رو به عقب^{۱۹} بوده و برای محاسبه گرادیان‌ها از الگوریتم خطی گاوس^{۲۰} استفاده شده است.

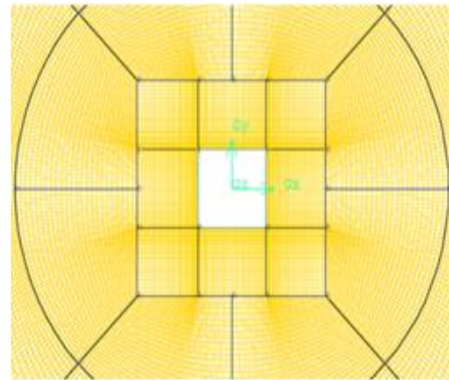


شکل ۴- ضریب فشار متوسط روی سطح هندسه در شبکه‌های مختلف برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰

نتایج

در بخش اول نتایج، به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش عددی به کاررفته، مشخصه‌های آیرودینامیکی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌برداری مشخصه‌های جریان و صوت بعد از مدت زمان لازم برای یکبار عبور جریان از دامنه حل محاسباتی و اطمینان از تثبیت جریان شبه‌پایا در اطراف هندسه شروع شده و در مدت زمان لازم برای چهار بار عبور جریان از دامنه حل محاسباتی ذخیره و در نهایت متوسط گیری زمانی انجام شده است. همچنین گام زمانی حل عددی 10^{-4} ثانیه، با توجه به مقدار عدد کورانت کمتر از ۱ برای پایداری حل زمانمند انتخاب شده است.

در شکل ۵، ضریب فشار متوسط اطراف هندسه مربعی برای زاویه حمله صفر درجه و اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ در مقایسه با مطالعه تجربی دورنینو [۲] نشان داده شده است. ضریب فشار متوسط اطراف هندسه از پارامترهای موثر در توصیف الگوی جریان اطراف هندسه است. با توجه به شکل ۵، نقاط کاوشگر جهت داده برداری فشار، مطابق با الگوی ارائه شده روی سطح هندسه مربعی تعریف شده است.



شکل ۳- شبکه تولید شده در نزدیکی هندسه مربعی

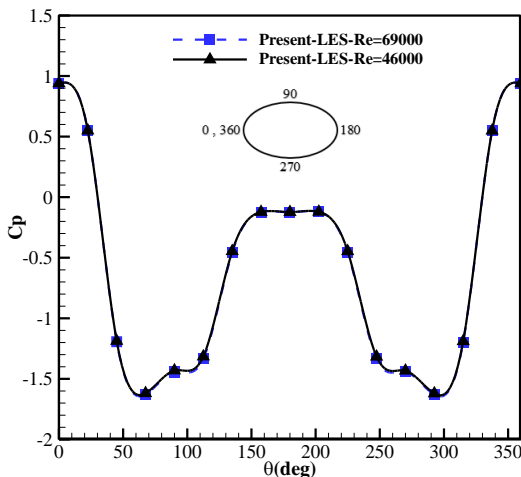
به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، چهار شبکه محاسباتی در محدوده ۱ تا ۲/۸ میلیون سلول ایجاد شده و ضریب فشار متوسط (C_p) روی سطح هندسه در عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ برای تمام شبکه‌ها در زاویه حمله (α) صفر درجه محاسبه شده است (شکل ۴). با توجه به اختلاف کم نتایج شبکه با ۲/۴ میلیون سلول با نتایج شبکه ۲/۸ میلیون سلول و نتایج تجربی [۲] و به‌منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه محاسباتی، شبکه با ۲/۴ میلیون سلول، به عنوان شبکه مورد بررسی انتخاب شده است. در تحقیق حاضر، در مدل‌سازی‌های تلاطم از تابع دیواره استفاده شده است. در نزدیکی هندسه دقت پارامترهای شبکه‌بندی $y^+ < 7$ بوده که در محدوده معیارهای ارائه شده برای شبکه بندی میدان حل در رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با دقت بالا [۲۳]، بدست آمده است. در شکل ۴، نتایج ضریب فشار متوسط (C_p) روی سطح هندسه برای تمام شبکه‌ها در مقایسه با نتایج تجربی [۲] نشان داده و اعتبارسنجی شده است.

شرط مرزی در مرز ورودی برای سرعت از نوع دیریکله ($U = cte$)، برای فشار از نوع نیومن ($\frac{\partial p}{\partial n} = 0$) انتخاب شده است. با توجه به کار تجربی دورنینو [۲] شرط مرزی در مرز خروجی و صفحات بالایی و پایینی برای فشار از نوع دیریکله ($P = cte$)، برای سرعت از نوع نیومن ($\frac{\partial u}{\partial n} = 0$) در نظر گرفته شده است. از طرفی با توجه به قرارگیری دو صفحه در دو طرف هندسه در مطالعه تجربی، از شرط مرزی دیوار بدون لغزش استفاده شده است.

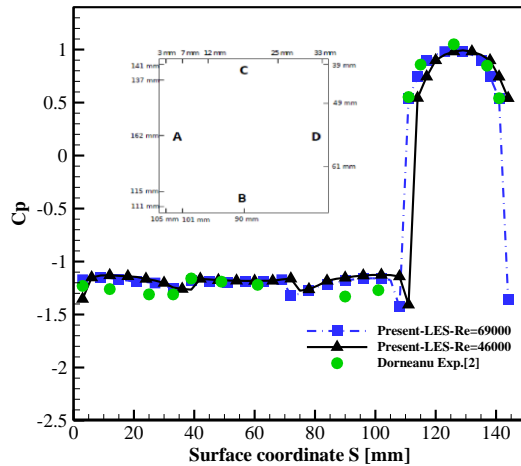
طی یک روند مورد انتظار، توزیع فشار از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه به صورت کاهشی و از زاویه ۹۰ تا ۱۸۰ درجه به صورت افزایشی می‌باشد. همچنین از زاویه ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه روند متقارنی مشابه زوایای قبل، مشاهده شده و ضریب فشار متوسط در محدوده زاویه ۱۳۵ تا ۲۲۵ درجه تغییر قابل توجهی نداشته است.

در شکل ۷، ضریب فشار متوسط در اطراف هندسه بیضوی برای اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ و زاویه حمله صفر درجه نشان داده شده است. در این حالت نیز، طی یک روند مورد انتظار، توزیع فشار از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه به صورت کاهشی و از زاویه ۹۰ تا ۱۸۰ درجه به صورت افزایشی می‌باشد. همچنین از زاویه ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه روند متقارنی مشاهده شده است. ضریب فشار متوسط در محدوده زاویه ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه تغییر قابل توجهی نداشته است.

از آنجا که ضریب فشار منفی، ناشی از اثر جدایش جریان، تشکیل و ریزش گردابه‌ها و تشکیل ناحیه دنباله است، بنابراین با تغییر سطح مقطع جسم از حالت دایره به بیضی و کاهش نسبت منطری سطح مقطع (نسبت ضلع عمود به جریان به ضلع موازی با جریان)، تغییرات ضریب فشار با شیب و مقدار کمتری اتفاق افتاده است. از طرفی با توجه به نتایج، روند تغییرات ضریب فشار متوسط مستقل از عدد رینولدز در محدوده مورد مطالعه است.



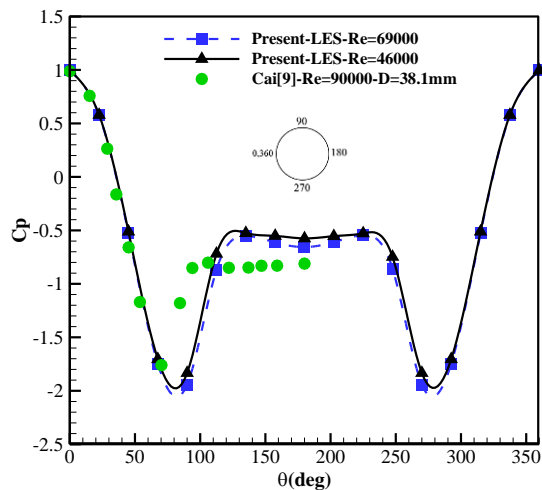
شکل ۷- توزیع فشار اطراف هندسه بیضوی در عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰



شکل ۵- توزیع فشار اطراف هندسه مربعی در عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰

با توجه به اینکه جدایش جریان از سطح هندسه در نقاط فصل مشترک وجه A با وجه های C و B قرار دارد، بنابراین ضریب فشار در تمام نقاط کاوشگر روی سطوح B, C و D تقریباً هم اندازه خواهند بود و ضریب فشار در نقاط کاوشگر روی سطح A با جابجایی از مرکز سطح به سمت نقاط جدایش جریان روبه کاهش خواهد بود.

در شکل ۶، ضریب فشار متوسط در اطراف هندسه دایره‌ای برای اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ و زاویه حمله صفر درجه در مقایسه با مطالعه عددی کای و همکاران [۹] نشان داده شده است.



شکل ۶- توزیع فشار اطراف هندسه دایره‌ای در عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰

روند تغییرات ضریب پسا از هندسه با سطح مقطع مربعی به سطح مقطع بیضوی کاهش می‌یابد. هندسه با سطح مقطع مربعی نسبت به سطح مقطع دایره‌ای مقدار ضریب پسا بیشتری دارد که به دلیل وجود لبه‌های تیز و ناحیه دنباله بزرگ است. همچنین علت کاهش ضریب پسا از هندسه با سطح مقطع دایره‌ای به سطح مقطع بیضوی این است که، نسبت ضلع عمود بر جریان به ضلع موازی با جریان هر چه کمتر شود، هندسه ما به هندسه دوکی شکل نزدیک‌تر شده که باعث کاهش ضریب پسا می‌گردد. چراکه ناحیه جدایش جریان و تغییرات ناگهانی خطوط جریان در اطراف هندسه روند ملایم‌تری را دارد. همچنین از آنجا که گردابه‌های کوچکتری در ناحیه دنباله جریان شکل می‌گیرد، فرکانس ریزش گردابه بیشتر خواهد شد و در نتیجه عدد استروهمال افزایش می‌یابد که این روند افزایشی عدد استروهمال از هندسه با سطح مقطع مربعی به سطح مقطع بیضوی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

فرم و روند توسعه ساختارهای همدوس جریان روی مدل هندسه مربعی، دایره‌ای و بیضوی برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ با استفاده از معیار کیو در شکل ۸ نشان داده شده است. معیار کیو نامتغیر دوم تانسور گرادیان سرعت است که برای مشاهده ساختارهای همدوس در جریان استفاده شده و طبق روابط (۱۷) بدست می‌آید.

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij})$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

Ω_{ij} و S_{ij} به ترتیب بخش پادمقارن و متقارن تانسور نرخ کرنش هستند. پارامتر کیو بیانگر ناحیه‌ای از میدان جریان سیال است که مقدار ورتیسیتیته از مقدار شدت کرنش بزرگتر است. بنابراین در جریان تراکم‌ناپذیر، Q اندازه موضعی بیشتر بودن شدت چرخش نسبت به شدت کرنش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که $Q > 0$ الزاماً به معنی وجود نقطه فشار مینیمم درون ناحیه تعریف شده نیست. اگرچه در اکثر مواقع، این شرط برای فشار $Q > 0$ اتفاق می‌افتد. معمولاً این کمیت در ناحیه میدان حل، به صورت صفحات با مقدار ثابت Q نشان داده می‌شود. با توجه به شکل ۸، برای هندسه با سطح مقطع

مقادیر متوسط گیری شده ضریب پسا و عدد استروهمال در جدول ۱ برای اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ در زاویه حمله صفر درجه با نتایج سایر محققان ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقدار متوسط‌گیری شده ضریب برآ در تمامی حالات صفر است.

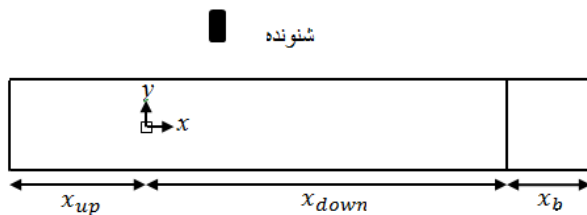
با توجه به جدول ۱، مقدار متوسط ضریب پسا و عدد استروهمال هندسه با سطح مقطع مربعی در مطالعه حاضر با نتایج تجربی دورنینو [۲] از تطابق خوبی برخوردار است که خطای عددی کمتر از ۷٪ می‌باشد. در مطالعه حاضر با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد استروهمال کاهش می‌یابد، چراکه با افزایش عدد رینولدز سرعت جریان زیاد شده درحالی که عدد استروهمال با سرعت جریان رابطه عکس دارد و افزایش سرعت سبب کاهش عدد استروهمال می‌گردد.

جدول ۱- ضرایب متوسط پسا و عدد استروهمال برای اعداد رینولدز

	۶۹۰۰۰ و ۴۶۰۰۰	
	C_D	St
کار حاضر - مربعی ۶۹۰۰۰	۲/۰۲	۰/۱۲۳
کار حاضر - مربعی ۴۶۰۰۰	۲/۰۵	۰/۱۲۹
کار حاضر - دایره‌ای ۶۹۰۰۰	۱/۱۵	۰/۲۶
کار حاضر - دایره‌ای ۴۶۰۰۰	۰/۵۱	۰/۲۶۸
کار حاضر - بیضوی ۶۹۰۰۰	۰/۴۴	۰/۳۱
کار حاضر - بیضوی ۴۶۰۰۰	۰/۲	۰/۳۱۴
دورنینو [۲] - مربعی ۶۹۰۰۰	۱/۹	۰/۱۱۴
دورنینو [۲] - مربعی ۴۶۰۰۰	۱/۹	۰/۱۱۸
دولان [۷] - دایره‌ای ۲۲۰۰۰	۰/۹۵	۰/۲۴
کای [۹] - دایره‌ای ۹۰۰۰۰	۱/۰۵-۱/۲	-
روات [۳] - بیضوی ۱۰۰۰۰۰۰	۰/۲۱-۰/۶۳	-

در بخش دوم نتایج، سطح صدای تولید شده ناشی از برخورد سیال به هندسه بررسی شده است. بدین منظور، یک شنونده در مختصات (۰, ۰/۵۵, ۰/۲۱) خارج از میدان حل عددی مطابق با کار تجربی دورنینو [۲] تعریف شده است (فاصله به متر هستند). در شکل ۹ موقعیت قرار گیری شنونده نشان داده شده است.

در جدول ۲، تراز فشار صوتی دوردست برای زاویه حمله صفر و اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ در موقعیت شنونده مورد نظر، ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، با کاهش عدد رینولدز، مومنتوم جریان کاهش یافته که موجب کم شدن نوسانات فشار و نیروی برآ می‌گردد و در نهایت تراز فشار صوت کاهش پیدا کرده است. برای هندسه با سطح مقطع مربعی، هر دو روش آنالوژی صوتی تراز فشار صوت در دوردست را در مقایسه با کار تجربی دورنینو [۲] به خوبی پیش‌بینی کرده است. خطای عددی برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ کمتر از ۸٪ و برای عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ کمتر از ۱۲٪ می‌باشد. قابل ذکر است که این درصد خطا را می‌توان به اختلاف شدت آشفتگی جریان ورودی و پارامترهایی همچون اختلاف زبری سطح در مدل‌سازی عددی با هندسه تجربی مرتبط دانست. همچنین در عدد رینولدز پایین، آنالوژی صوتی کرل به نتایج تجربی [۲] نزدیک‌تر است. مقدار تراز فشار صوت در عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ برای روش فشرده کرل بیشتر از روش کرل گزارش شده است.

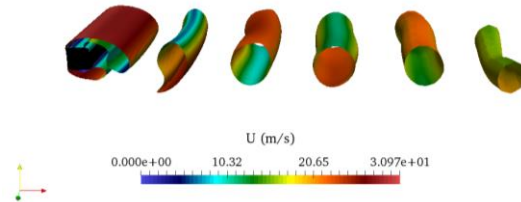


شکل ۹- نحوه قرار گیری شنونده‌ها

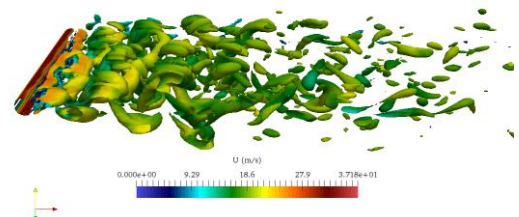
جدول ۲- تراز فشار صوت در دوردست صوتی برای اعداد رینولدز

	۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰		
	Curle	Curle's compact	Dorneanu[2]
کار حاضر- مربعی ۶۹۰۰۰	۹۴/۲۷	۹۵/۰۸	۱۰۴
کار حاضر- مربعی ۴۶۰۰۰	۸۳/۴۸	۷۸/۳۶	۹۵/۹

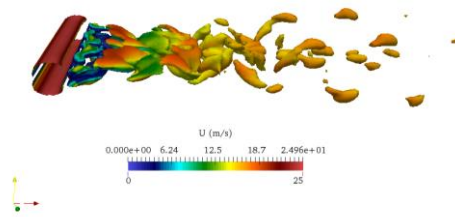
مربعی، جدایش جریان بروی اضلاع بالا و پایین وجه جلویی هندسه اتفاق افتاده است که در نتیجه آن گردابه‌هایی با ابعاد فیزیکی بزرگتر مشاهده شده است.



الف) هندسه مربعی



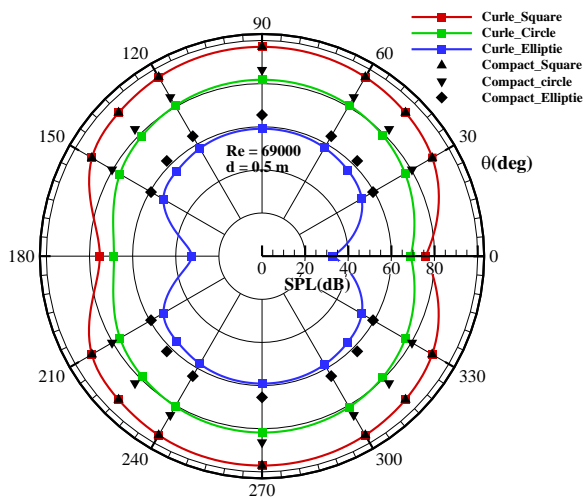
ب) هندسه دایره‌ای



ج) هندسه بیضوی

شکل ۸- کانتور معیار کیو ($Q = 2 \times 10^4$)، رنگ آمیزی شده با مقادیر سرعت لحظه‌ای

با تغییر سطح مقطع به دایره و حذف گوشه‌های تیز، جدایش جریان به تعویق افتاده و گردابه‌هایی با ابعاد فیزیکی کوچکتر نسبت به سطح مقطع مربعی مشاهده می‌گردد. در نهایت برای سطح مقطع بیضوی، ریزش گردابه‌ها با ابعاد فیزیکی کوچکتری نسبت به دو سطح مقطع دیگر مشاهده شده است.



شکل ۱۰- نمودار جهتی تراز فشار صوت برای سطح مقطع مختلف

بسیار کمتر از طول مشخصه امواج صوتی متاثر از گردابه‌های ریزش یافته در ناحیه دنباله جسم می‌باشد. بنابراین هرچه اندازه نسبت منظری (نسبت ضلع عمود به جریان به ضلع موازی به جریان) جسم کوچکتر شود، اندازه گردابه‌های ریزش شده در ناحیه دنباله کوچکتر بوده و لذا طول موج کوچکتری دارد. با کاهش طول موج امواج صوتی و کاهش اختلاف آن با طول مشخصه سطح مقطع جسم، پیش‌بینی انجام شده با فرم فشرده کرل از دقت کمتری برخوردار است.

تأثیر سرعت جریان ورودی بر روی تراز فشار صوت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به این منظور شنونده‌هایی در فاصله شعاعی ۰/۵ متری از مرکز سطح مقطع برای زاویه صفر درجه تا ۳۶۰ درجه با اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ برای روش آنالوژی صوتی کرل در نظر گرفته شده است. با افزایش عدد رینولدز تراز فشار صوت دوردست افزایش یافته است چراکه منبع اصلی نویز برای هندسه‌های جریان‌بند، افزایش نوسانات نیروی برآ و فشار و افزایش تلاطم می‌باشد.

در شکل ۱۲ تأثیر فاصله بر تراز فشار صوت نشان داده شده، بدین منظور شنونده‌ها در دو فاصله شعاعی ۰/۵ متر و ۱ متر برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ برای روش آنالوژی صوتی کرل در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمام زوایا در فاصله ۰/۵ متری تراز فشار صوت بیشتر از فاصله ۱ متری است.

کار حاضر- دایره‌ای	۷۹/۴۵	۸۴/۳۱	-
۶۹۰۰۰			
کار حاضر- دایره‌ای	۶۶/۹۱	۶۵/۸۸	-
۴۶۰۰۰			
کار حاضر- بیضوی	۵۶/۷۷	۶۳/۴۴	-
۶۹۰۰۰			
کار حاضر- بیضوی	۴۶/۰۷	۴۴/۲۵	-
۴۶۰۰۰			

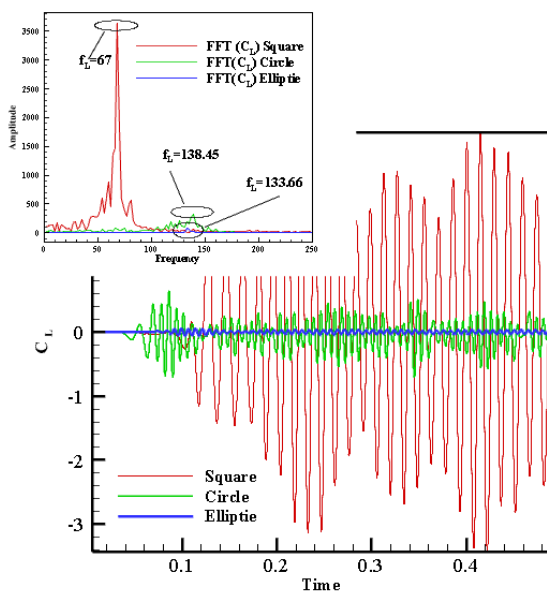
در حالیکه برای عدد رینولدز ۴۶۰۰۰ این گونه نیست. دلیل این اختلاف اینگونه می‌تواند استنباط شود که در روش کرل، نوسانات فشار بر روی هر یک از سطوح گسسته هندسه در شبکه محاسباتی بعنوان منبع تولید صوت در نظر گرفته می‌شود، در حالیکه در روش فشرده کرل، نوسانات ضریب برآ رو کل سطح به صورت انتگرالی متوسط سطح، بعنوان منبع تولید صوت فرض شده است. در نتیجه روش فشرده کرل به داده برداری از روی سطح هندسه وابسته نمی‌باشد در حالیکه در روش کرل اینگونه است. همچنین تراز فشار صوت دوردست در هندسه با سطح مقطع مربعی بیشتر از دایره‌ای و بیضوی است. بعلاوه، دلیل کاهش تراز فشار صوت در دوردست از سطح مقطع مربعی به بیضوی، کاهش نیروی برآ و فشار نوسانی می‌باشد.

تأثیر سطح مقطع هندسه بر روی تراز فشار صوت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به این منظور شنونده‌هایی در فاصله شعاعی ۰/۵ متری از مرکز سطح مقطع برای زاویه صفر درجه تا ۳۶۰ درجه با عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ برای دو روش آنالوژی صوتی کرل و فرم فشرده کرل در نظر گرفته شده است.

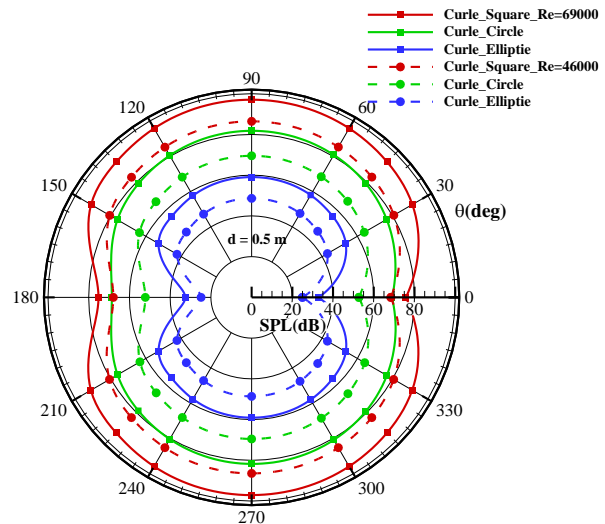
با توجه به شکل ۱۰، با تغییر سطح مقطع از مربعی به بیضی، تراز فشار صوت پیش‌بینی شده توسط دو روش آنالوژی صوتی برای تمامی زوایا کاهش یافته، که این به دلیل کاهش نوسانات فشار و نیروی برآ بوده و در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ قابل مشاهده است. همچنین با تغییر سطح مقطع از مربعی به بیضی، تراز پیش‌بینی شده فشار صوت دوردست از روش کرل و فرم فشرده کرل با اختلاف مشاهده شده است. در فرم فشرده کرل فرض اساسی بر این مبنا است که طول مشخصه هندسه

فشار صوت یا به عبارتی نوسانات فشار بر حسب زمان و طیف فرکانسی آن در زاویه ۱۲۰ درجه از هندسه با سطح مقطع‌های مختلف در عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ که از آنالوژی صوتی کرل بدست آمده در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

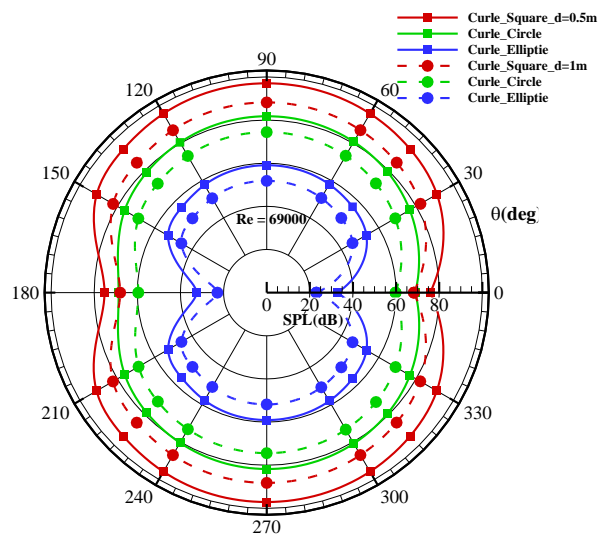
از مقایسه شکل ۱۳ و شکل ۱۴ می‌توان دریافت که ریزش متناوب گردابه‌ها باعث نوسان نیروهای آیرودینامیکی و تولید صوت شده است. فرکانسی که ریزش گردابه در آن اتفاق افتاده، برابر با فرکانس بزرگترین قله نمودار طیفی فرکانسی فشار صوت است.



شکل ۱۳ - ضریب نیروی برآ و طیف فرکانسی ضریب برآ در عدد رینولدز ۶۹۰۰۰



شکل ۱۱ - نمودار جهتی تراز فشار صوت در فاصله ۰/۵ متری در اعداد رینولدز مختلف



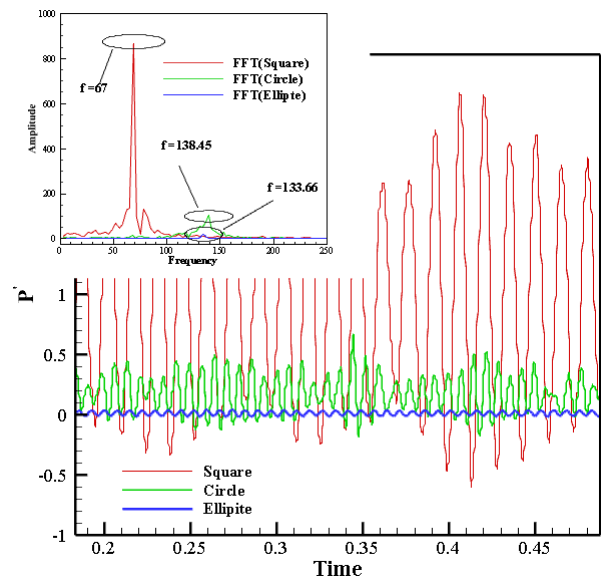
شکل ۱۲ - نمودار جهتی تراز فشار صوت در فواصل مختلف برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰

در شکل ۱۳ ضریب نیروی برآ بر حسب زمان و همچنین طیف فرکانسی ضریب برآ، برای عدد رینولدز ۶۹۰۰۰ در زاویه حمله صفر برای سطح مقطع‌های مختلف نشان داده شده است. فرکانس پیش‌بینی شده برای نوسانات ضریب برآی هندسه با سطح مقطع‌های مربعی، دایره‌ای و بیضوی به ترتیب ۶۷، ۱۳۸/۴۵ و ۱۳۳/۶۶ هرتز بدست آمده است. همچنین با توجه به نوسانات ضریب برآ می‌توان فرکانس ریزش گردابه را استخراج و عدد استروهال را محاسبه کرد.

با تغییر سطح مقطع به دایره‌ای و حذف گوشه‌های تیز، گردابه‌هایی با ابعاد فیزیکی کوچکتر نسبت به سطح مقطع مربعی و در نهایت برای سطح مقطع بیضوی، گردابه‌هایی با ابعاد فیزیکی کوچکتری نسبت به دو سطح مقطع دیگر مشاهده شده است.

نتایج بررسی تراز فشار صوتی دوردست نشان داده که با افزایش عدد رینولدز، مومنوم جریان افزایش و موجب زیاد شدن نوسانات فشار و نیروی برآ می‌گردد که در نهایت تراز فشار صوت افزایش می‌یابد.

در نهایت نتایج نشان داده که با تغییر سطح مقطع از مربعی به بیضوی، تراز فشار صوت پیش‌بینی شده توسط دو روش آنالوژی صوتی کاهش یافته و بیشترین تراز فشار صوت به ترتیب برای سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و بیضوی است. دلیل کاهش تراز فشار صوت، کاهش نوسانات فشار و نیروی برآ بوده است.



شکل ۱۴ - فشار صوت و طیف فرکانسی فشار صوت در زاویه ۱۲۰ درجه از هندسه با سطح مقطع مختلف در عدد رینولدز ۶۹۰۰۰

نتیجه‌گیری

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Bluff Body
- ۲ Far-Field Noise
- ۳ Aeroacoustics
- ۴ Near-Field Flow
- ۵ Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes
- ۶ Ffowcs Williams and Hawkings
- ۷ Large-Eddy Simulation
- ۸ Compact Form
- ۹ OpenFoam
- ۱۰ Open Source Code
- ۱۱ Kronecker Delta
- ۱۲ Quadrupoles
- ۱۳ Dipole Sources
- ۱۴ Green's Function
- ۱۵ Retarded Time
- ۱۶ Monopole
- ۱۷ Viscosity
- ۱۸ PisoFoam
- ۱۹ Backward
- ۲۰ Gauss Linear Algorithm

منابع و مراجع

- [1].S. Becker, M. Escobar, C. Hahn, I. Ali, M. Kaltenbacher, B. Basel, M. Grunewald, "Experimental and Numerical Investigation of the Flow Induced Noise from a Forward Facing Step", 2005

مطالعه حاضر به بررسی آنالوژی صوتی کرل و فرم فشرده کرل در پیش‌بینی نویز دوردست اختصاص یافته است. بدین منظور جریان اطراف هندسه‌هایی با سطح مقطع مربعی، دایره‌ای و بیضوی با اعداد رینولدز ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ در نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم شبیه‌سازی شده است. برای حل جریان تراکم‌ناپذیر از روش رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است.

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی روش عددی به‌کاررفته، ضریب فشار متوسط، متوسط ضرایب پسا و برآ و عدد استروهمال جریان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای ارزیابی روش حل عددی، نتایج هندسه با سطح مقطع مربعی با نتایج تجربی دورنینو [۲] مقایسه شده که از تطابق مناسبی برخوردار است.

نتایج این مطالعه نشان داده که روند تغییرات ضریب پسا از هندسه با سطح مقطع مربعی به بیضوی کاهش، در حالیکه روند تغییرات عدد استروهمال افزایشی است. همچنین ضریب فشار متوسط و عدد استروهمال مستقل از عدد رینولدز در محدوده مورد بررسی در این مطالعه است. بعلاوه، با توجه به روند توسعه ساختارهای همدوس بر اساس معیار کیو، برای هندسه با سطح مقطع مربعی، گردابه‌ها با ابعاد فیزیکی بزرگ و

- [13].A. Mueller, "Large eddy simulation of cross-flow around a square rod at incidence with application to tonal noise prediction", 2012.
- [14].C.J. Doolan, "Flow and Noise Simulation of the NASA Tandem Cylinder Experiment using OpenFOAM", In 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference) (p.3157)2009
- [15].S.R.L. Samion, M.S.M. Ali, A. Abu, C.J. Doolan, R.Z.-Y. Porteous, "Aerodynamic sound from a square cylinder with a downstream wedge", Aerospace Science and Technology, 53, 85-94, 2016
- [۱۶]. ذبیحی نژاد، میلاد. دهقان، علی اکبر. فرمانی، محمد. "پایه سازی و ارزیابی قیاس صوتی کرل به منظور پیش بینی نوفه دوردست برای یک هندسه مربعی"، مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران، شماره ۱، دوره ۹، صفحات ۵۵-۶۹، ۱۴۰۰
- [17].C.H.L. X. Jiang, "Numerical techniques for direct and large eddy simulations", Florida: CRC Press, 4th Edition, pp. 19-24, 2016
- [18].M. Lesieur, "Turbulence in Fluids", 4th Edition, Germany: Springer Science & Business Media, pp. 419-452, 2008
- [19].J.C. Y. P. Wang, H. C. Lee, "Accurate simulations of surface pressure fluctuations and flow-induced noise near bluff body at low mach numbers The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications" (BBAA7), Shanghai, China, 2012
- [20].M.J. Lighthill, "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
- [21].C. N, "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 231(1187) 505-514, 1955
- [22].C.J. Greenshields, "OpenFOAM user guide", OpenFOAM Foundation Ltd, version, 3(1) e2888, 2015
- [23].C. Wagner, T. Hüttl, P. Sagaut, "Large-eddy simulation for acoustics", Cambridge University Press, 2007
- [2].J.F. Dorneanu, A. Mueller, P. Rambaud, E.T.A.v.d. Weide, A. Hirschberg, "Tonal and Silent Wake Modes of a Square Rod at Incidence", Acta Acustica united with Acustica, 102(3)419-422, 2016
- [3].M. Rawat, R. Gupta, R. Sarviya, "Numerical Simulation of Flow Around An Elliptical Cylinder at High Reynolds Numbers", International Journal of Fluids Engineering, 5(1) 29-37, 2013
- [4].Z. Faruquee, D.S. Ting, A. Fartaj, R.M. Barron, R. Carriveau, "The effects of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder", International Journal of Heat and Fluid Flow, 28(5), 1178-1189, 2007
- [5].A. Sharma, P. Kumar, S.K. Singh, "Numerical analysis of flow structures behind the bluff body at different aspect ratio", in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, pp. 012056, 2018
- [6].S.K. Raman, K. Arul Prakash, S. Vengadesan, "Effect of axis ratio on fluid flow around an elliptic cylinder—a numerical study", Journal of fluids engineering, 135(11), 2013
- [7].C.J. Doolan, "Computational bluff body aerodynamic noise prediction using a statistical approach", Applied Acoustics, 71(12) 1194-1203, 2010
- [8].E. Latorre Iglesias, D.J. Thompson, M.G. Smith, "Experimental study of the aerodynamic noise radiated by cylinders with different cross-sections and yaw angles", Journal of Sound and Vibration, 361, 108-129, 2016
- [9].J.C. Cai, J. Pan, A. Kryzhanovskiy, S.J. E, "A numerical study of transient flow around a cylinder and aerodynamic sound radiation", Thermophysics and Aeromechanics, 25(3) 331-346, 2018
- [10].F. Margnat, "Hybrid prediction of the aerodynamic noise radiated by a rectangular cylinder at incidence", Computers & Fluids, 109 13-26, 2015
- [11].W.S. H. Fujita, H. Furutani, H. Suzuki, "Experimental investigations and prediction of aerodynamic sound generated from square cylinders", 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, pp. 2369-2375, 1998
- [12].T.F.B. F. V. Hutcheson, "Noise radiation from single and multiple rod configurations", International Journal of Aeroacoustics, 11, No. 3, pp. 291-333, 2012