



Numerical Study of the Effect of Flow Suction on the Reduction of Acoustic Noise Due to the Flow on a Three-Dimensional Cylinder

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Talesh Bahrami H.R.¹ PhD,

Parhizkar H.*² PhD,

Ghasemlooy S.² PhD

How to cite this article

Talesh Bahrami H.R., Parhizkar H., Ghasemlooy S. Numerical Study of the Effect of Flow Suction on the Reduction of Acoustic Noise Due to the Flow on a Three-Dimensional Cylinder. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(5):1049-1059.

ABSTRACT

Aeroacoustics is one of the key issues in the design of high-speed modern devices such as giant aircraft and high-speed trains. In this regard, it is tried to design these devices in such a way to have at least aerodynamic noise. The cylinder, as a bluff body, is widely used in the design of various devices, such as a landing gear. Therefore, the reduction of cylinder noise can be widely used. In the present study, numerical solution is used to present a method for reducing the noise generated by flow on the cylinder. This is done by flow suction from the grooves on the cylinder. Acoustic numerical calculations were performed, using LightHill's acoustic analog approach in the form of wave equations of Ffowcs-Williams & Hawkings model. The numerical solution is performed in the three-dimensional unsteady form, using the large eddy simulation turbulence model. The characteristics of the grooves, such as their dimensions and distance on the generated acoustic noise have been studied. The results show that the active control method presented in this paper is an effective and yet simple way to control noise. The cylinder used in the present study produces a noise of about 110 dB at a speed of 250 km/h. According to the results, it can be said that by optimally arranging the number of slots and creating a proper flow suction, its sound level can be reduced to about 60 dB.

Keywords Aeroacoustic Simulation; Ffowcs-Williams & Hawkings Model; Large Eddy Simulation Sound Pressure Level; Active Noise Control

CITATION LINKS

- [1] Effects of high-speed railway noise on the synaptic ultrastructure and phosphorylated ...
- [2] Flightpath 2050 Europe's vision ... [3] Landing gear aerodynamic noise prediction ... [4] Sound radiation from aircraft Wheel ... [5] Design and testing of low noise landing ... [6] Simulation of the noise of landing gear ... [7] Experimental study on aircraft landing ... [8] Reduce train community sound ... [9] Aerodynamic noise: A critical ... [10] Aerodynamic noise generated by Shinkansen ... [11] Aeroacoustic analysis of a cylinder in low Mach number flow ... [12] Experimental and numerical study on aerodynamic noise reduction of cylindrical rod with bionic ... [13] Two-dimensional circular cylinder ANDNACA0012 benchmark problems ... [14] A flow control technique for noise reduction of a rod-airfoil ... [15] Sound generated in laminar flow past a two-dimensional ... [16] Theory of vortex ... [17] Numerical simulation of the effect of bionic serrated ... [18] Experimental investigation of aero acoustic noise generation process from a wall ... [19] Comparison of different methods of numerical simulation of flow and sound fields around a square ... [20] The influence of solid boundaries upon ... [21] Plasma actuators for cylinder flow control ... [22] Reduction of aerodynamic noise from high-speed pantograph ... [23] Computation of vortex shedding and radiated sound for a circular cylinder ... [24] Intercity Transport Policy and Planning System: International ... [25] Prediction of unsteady loading on a circular cylinder in high ... [26] Fluctuating lift on a circular cylinder: Review ... [27] A challenging test case for large eddy simulation: High .. [28] Numerical Calculation of the Sound Produced by the Wind ... [29] Distribution of local pressure and skin friction around a circular ... [30] An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake ... [31] Experimental study of airframe noise vs. drag relationship for ... [32] Flow Around Circular Cylinders—Volume 1 ... [33] Fundamentals of acoustics ...

¹Mechanical Engineering Department, Mechanic Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

²Aerodynamics Department, Aerospace Faculty, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Aerospace Faculty, Malek, Ashtar University of Technology, Shabanlou Street, Lavizan, Tehran, Iran

Phone: +98 (21) 73207625

Fax: +98 (21) 22935341

hparhiz@mut.ac.ir

Article History

Received: March 25, 2018

Accepted: April 08, 2018

ePublished: May 01, 2019

بررسی عددی اثر مکش جریان بر کاهش نویز آکوستیک حاصل از جریان روی یک استوانه سه بُعدی

حمیدرضا طالش بهرامی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حمید پرهیزکار PhD

گروه آیرودینامیک، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

سجاد قاسملوی PhD

گروه آیرودینامیک، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

مقاله آیروآکوستیک، یکی از مباحث مهم در طراحی وسایل پرسرعت امروزی نظیر هواپیماهای غول‌پیکر و قطارهای سریع‌السیر است. در همین راستا تلاش بر این است که این وسایل به‌گونه‌ای طراحی شوند که حداقل نویز آیرودینامیک را داشته باشند. استوانه به‌عنوان یک جسم پُخ کاربردهای گسترده‌ای در طراحی تجهیزات مختلف نظیر ارابه فرود هواپیما دارد. بنابراین کاهش نویز استوانه می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای داشته باشد. در این مقاله یک روش برای کاهش نویز آیروآکوستیک حاصل از جریان روی استوانه ارایه و به‌صورت عددی مطالعه شده است. این کار با مکش جریان به داخل شیارهایی روی استوانه انجام شده است. محاسبه عددی آکوستیک، به روش قیاس آکوستیک لایت‌هیل و با به‌کارگیری معادلات موج فاکس ویلیام‌هاو کینگز انجام شده است. حل جریان به‌صورت سه‌بعدی و گذرا با زمان و با استفاده از مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ انجام می‌شود. مشخصات شیارها نظیر ابعاد و فاصله آنها روی نویز آکوستیک تولیدشده مورد مطالعه قرار داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که روش کنترل فعال ارایه‌شده در این مقاله، یک روش موثر و در عین حال ساده برای کنترل نویز است. استوانه مورد استفاده در تحقیق حاضر در جریان با سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت صدایی حدود ۱۱۰ دسی‌بل تولید می‌کند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که با چیدمان بهینه و تعداد شیارها و سرعت مناسب مکش جریان می‌توان سطح صدای حاصل از استوانه را تا حدود ۶۰ دسی‌بل کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی آیروآکوستیک، مدل فاکس ویلیام‌هاو کینگز، شبیه‌سازی گردابه بزرگ، سطح فشار صوت، کنترل فعال نویز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹

*نویسنده مسئول: hparhiz@mut.ac.ir

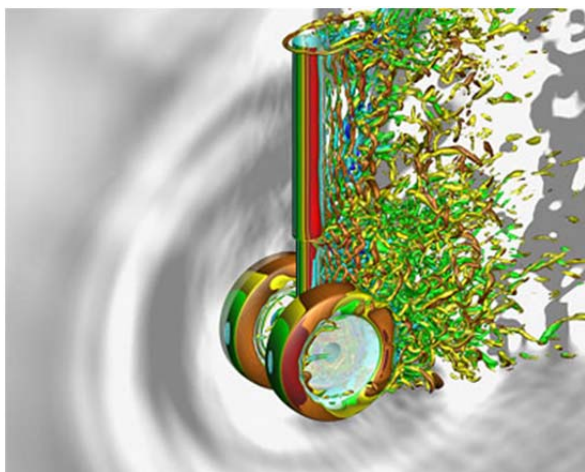
۱- مقدمه

با پیشرفت علم و تکنولوژی، تجهیزات مدرن و مختلفی برای رفاه انسان‌ها ساخته شده است. گاهی برخی از پیامدهای ناخواسته این تجهیزات و دستاوردها می‌تواند برای سیستم بدن انسان و محیط زیست مضر باشد. نویزهای آکوستیک مستمر یکی از مواردی است که عمدتاً در اثر برخی از مصنوعات بشری ایجاد می‌شود. نویزهای آکوستیک بیش از حد، علاوه بر این که بر سیستم شنوایی انسان اثر منفی می‌گذارد، می‌تواند منجر به مشکلات عصبی نیز شود [1].

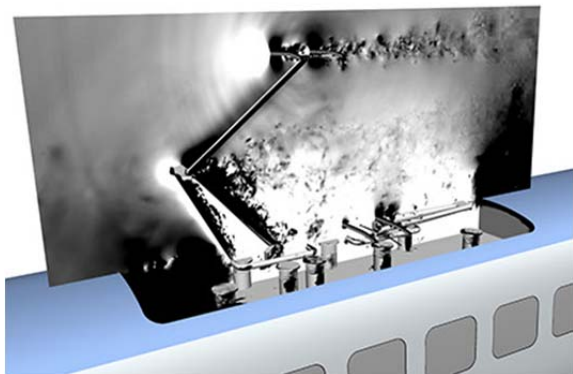
نویز آکوستیک می‌تواند در اثر عوامل و تجهیزات مختلفی ایجاد شود. به‌عنوان مثال در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی و ظهور هواپیماهای مسافربری غول‌پیکر، مساله نویزهای ایجادشده توسط آنها که موجب مزاحمت برای انسان بوده، نیز بسیار پررنگ‌تر شده است. از طرفی انجمن مشاوره تحقیقات هوافضای اروپا مقرر کرده است که باید تا سال ۲۰۵۰، نویز آکوستیک تولیدشده توسط هواپیماهای مسافربری به‌صورت ۶۵ درصدی کاهش یابد [2]. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاهش نویز آکوستیک در صنعت هوایی در دهه اخیر صورت گرفته است.

هنگام فرود هواپیما، زمانی که موتورها در حداقل وضعیت خود کار می‌کنند، عمده نویز آکوستیک در ارابه فرود، ترمزها و قسمت‌های تولیدکننده برآ ایجاد می‌شود [3]. در این بین، نویز آکوستیک تولیدشده در ارابه فرود بسیار پررنگ است [4]، به‌طوری که ۲۵٪ نویز در زمانی که موتور هواپیما خاموش و فلپ‌ها بسته هستند، ناشی از ارابه فرود است [5]. مطابق با شکل ۱ [6]، ارابه فرود از اجزای مختلف عموماً استوانه‌ای‌شکل با قطرهای و طول‌های مختلف تشکیل شده است که منجر به ایجاد یک میدان جریان پیچیده بین اجسام پخ می‌شود.

تنوع ابعاد اجزای مختل ارابه فرود منجر به یک طیف گسترده نویز آیرودینامیک می‌شود [7]. علاوه بر این، اجزای استوانه‌ای‌شکل، کاربردهای دیگری در اجسام پرسرعت دیگر نظیر پانتوگراف قطارهای پرسرعت (شکل ۲) [8]، دودکش و نرده‌های اطراف عرشه کشتی‌های بخار دارند که حضور آنها ضروری است، ولی مانند یک زائده غیرآیرودینامیک عمل می‌کنند و موجب ایجاد نویز آکوستیک می‌شوند. به‌عنوان مثال تحقیقات نشان می‌دهد که نویز آیروآکوستیک تولیدشده توسط یک قطار پرسرعت، در سرعت بیش از ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت، بر نویز مکانیکی غالب می‌شود [9] و عمده این نویز در اثر پانتوگراف است [10]. همچنین در بادهای دریایی شدید، دودکش‌ها و نرده‌های اطراف عرشه می‌توانند نویزهای آیرودینامیک قابل توجهی ایجاد کنند که می‌تواند بر سلامت جسمی و روانی کسانی که به‌مدت طولانی روی عرشه کار می‌کنند، اثر منفی داشته باشند. بنابراین، مطالعه نویز تولیدشده توسط اجسامی همچون استوانه از اهمیت زیادی برخوردار است.



شکل (۱) ارابه فرود به‌عنوان یک منبع تولید نویز [6]



شکل (۲) پانتوگراف به‌عنوان یک منبع تولید نویز [8]

صدا استفاده کردند.

از محدود تحقیقات آیرودینامیک انجام شده در ایران می‌توان به تحقیقات تجربی موحدی و همکاران^[18] و عددی محمدرضایی و همکاران^[19] برای محاسبه نویز حاصل از جریان روی یک منشور با مقطع مربعی اشاره نمود. آزمایش تجربی آنها در تونل باد آیرودینامیک اصلاح شده آکوستیک انجام گرفت و تحلیل‌های عددی را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام داده‌اند. از نتایج این تحقیقات این است که عامل مهم در انتشار صدا از چنین هندسه‌هایی، پدیده ریزش گردابه است. عدد استروهال به‌دست‌آمده برای سرعت سنج سیم داغ و میکروفون برای جریان حول سیلندر برابر با ۰/۱۱ بود. همچنین مشخص شد که سطح فشار صوتی کلی در محدوده سرعت ۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه در محدوده ۸۴ تا ۱۱۱ دسی‌بل تغییر می‌کند.

در جریان‌های با ماخ پایین، نویز آیرودینامیک عمدتاً به‌وسیله دوقطبی‌های تنها و در نتیجه نیروهای نوسانی وارده از سطح به سیال ایجاد می‌شود^[20]. مهم‌ترین عامل شکل‌گیری نیروهای نوسانی، ریزش گردابه‌ها و حرکت مغشوش‌گونه آنها اطراف جسم است^[16]. بنابراین برای کنترل این نویزهای آیرودینامیک لازم است که این گردابه‌های مغشوش به‌طور موثری کنترل شوند. کنترل جریان یکی از روش‌های متداول برای کاهش نویز القاشده توسط جریان است. روش‌های مختلفی نظیر اکچوئیتورهای پلاسما^[21]، موجی‌کردن^[12]، چرخاندن سطح^[14] و استفاده از مواد متخلخل^[22] برای کنترل نویز آیرودینامیک روی هندسه‌هایی نظیر استوانه استفاده شده است.

روش‌های کنترل نویز ناشی از جریان حول اجسام را می‌توان به روش‌های کنترل فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد. روش‌های کنترل فعال را می‌توان به دو دسته کنترل فعال با بازخورد و بدون بازخورد یا ساده دسته‌بندی کرد. به‌طور کلی، کاهش نویز در روش‌های کنترل فعال را می‌توان به‌صورت موثرتری نسبت به کنترل غیرفعال انجام داد و همچنین روش‌های کنترل فعال ساده نیازمند به حسگر نبوده و بنابراین اجرای آنها آسان‌تر است.

همان‌طور که گفته شد، نویز آیرودینامیک در اثر اعمال نیروهای نوسانی از جسم به سیال ایجاد می‌شود. عامل اصلی تولید این نیروهای نوسانی، جدایش گردابه‌ها و حرکت مغشوش‌گونه گردابه‌های جدا شده در نزدیکی جسم یا برخورد و چسبیدن مجدد آنها به سطح است^[16]. بنابراین برای تخمین نویز حاصل از این پدیده باید شبیه‌سازی مناسبی از وضعیت گردابه‌ها در نزدیکی جسم ارائه شود. دقیق‌ترین روش برای تخمین گردابه‌ها و محاسبات آیرودینامیک، روش "حل مستقیم معادلات (DNS)" است. اما به هر حال، برای محاسبات جریان‌های رینولدز بالا به روش حل مستقیم معادلات، منابع محاسباتی مورد نیاز بسیار بیشتر از رایانه‌های سریع کنونی است و بنابراین فعلاً باید به روش‌های ارزان‌تری (به‌لحاظ محاسباتی) اکتفا کرد^[23]. بین روش‌های ارزان‌تر محاسباتی، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به‌لحاظ دقت بسیار نزدیک به روش حل مستقیم معادلات است و در عین حال، هزینه محاسباتی بسیار کمتری ایجاد می‌کند. در این روش، تنها گردابه‌های بزرگ که بخش عمده‌ای از انرژی جریان را در بردارند، حل می‌شوند^[23].

مرور منابع فوق نشان می‌دهد که نویز آیرودینامیک یکی از دغدغه‌های مهم محققان در طراحی وسایل پُرسرعتی است که در نزدیکی مناطق مسکونی و اداری تردد می‌کنند و عدم کنترل آن می‌تواند در درازمدت مشکلات فیزیکی و روانی عمیقی را برای

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای روی نویز تولید شده توسط استوانه و روش‌های کنترل و کاهش آن انجام شده است. به‌عنوان مثال کریمی و همکاران^[11] نویز تولید شده توسط یک استوانه سخت شناور در یک جریان با ماخ پایین را با کوپل دینامیک سیالات محاسباتی و روش المان مرزی (BEM) مورد مطالعه قرار دادند. آنها از قیاس آکوستیک لایت‌هیل برای تخمین نویز آکوستیک از داده‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند. ژانگ و همکاران^[12] با الهام از لبه حمله بال جغد، زبری‌هایی را روی یک میله استوانه‌ای شکل به‌منظور کاهش نویز آیرودینامیک ایجاد کردند. آنها این زبری‌ها را به‌صورت موج‌های طولی روی استوانه ایجاد کرده و اثر آن را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از نرم‌افزار عددی ANSYS FLUENT به‌همراه شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) به‌منظور شبیه‌سازی جریان و از روش فاکس ویلیام‌هاو کینگز برای تخمین صدا استفاده شده است. آنها نشان دادند که با این روش می‌توان فرکانس جدایش گردابه‌ها که منجر به نوسانات ضریب برآ می‌شود را کاهش داد و همچنین سطح صدای تولید شده توسط استوانه را به اندازه ۶/۷ دسی‌بل کم کرد.

لی و لیو^[13] از نرم‌افزار ANSYS FLUENT برای شبیه‌سازی نویز آکوستیک پراکنده شده از یک استوانه دو‌بعدی و یک ایرفویل استفاده کردند. آنها برای شبیه‌سازی جریان ابتدا از روش‌های مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده براساس رینولدز (RANS) و سپس برای حل دقیق‌تر جریان از مدل گردابه‌های جدا شده (DES) و مدل گردابه‌های بزرگ استفاده کردند. در این مطالعه، در ادامه برای تخمین صدا از قیاس آکوستیک لایت‌هیل استفاده شده است.

سیوزوس روسولیس و همکاران^[14] برای افزایش نیروی برآ، کاهش نیروی درگ و کنترل نویز آکوستیک یک ایرفویل، ایده جانمایی یک استوانه چرخان در جبهه ایرفویل را پیشنهاد دادند. برای این کار آنها استوانه مذکور را با فرکانس نصف تا دو برابر فرکانس جدایش گردابه‌ها چرخانده و نشان دادند که این روش می‌تواند موثر واقع شود. این محققان از نرم‌افزار FLUENT، مدل $k-\omega$ SST و برای تخمین صدا از روش فاکس ویلیام‌هاو کینگز استفاده کردند.

لیو و همکاران^[15] صدای تولید شده در پشت یک منشور مربعی دو‌بعدی در جریان آرام را مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای شبیه‌سازی جریان از نرم‌افزار FLUENT و برای تخمین سطح صدا از تئوری صدای پاول^[16] استفاده کردند. این تحقیق نشان داد که دامنه سیگنال‌های صدا در جریان دوردست با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که بر خلاف رینولدزهای پایین، سیگنال‌های فشار در میدان دوردست در جریان‌های با رینولدزهای بالاتر شامل جملات هارمونیک هستند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در جریان‌های با ماخ کمتر از ۰/۱ میدان نویز عمدتاً ناشی از منابع دوقطبی است و در جریان‌های با ماخ‌های بالاتر، اثرات منابع چهارقطبی نیز اهمیت پیدا می‌کنند.

شی و همکاران^[17] نویز آکوستیک تولید شده از یک استوانه دوار را با ایجاد زبری‌های سینوسی و نیز برش بخشی از شانه استوانه را به تقلید از لبه حمله بال جغد کم کردند. آنها نشان دادند که با زبری سینوسی ایجاد شده می‌توان فرکانس جدایش گردابه‌ها را کاهش داد و نیروهای آیرودینامیک نوسانی وارد بر استوانه را کنترل نمود و بدین ترتیب نویز آکوستیک را کاهش داد. آنها برای این کار از نرم‌افزار FLUENT و روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل‌سازی جریان و از روش فاکس ویلیام‌هاو کینگز برای تخمین

که در آن V حجم سلول است. همین طور تابع فیلتر در اینجا به صورت رابطه ۳ است:

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{V}, & x' \in v \\ 0, & x' \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

با انجام عمل فیلتر، معادلات پیوستگی و مومنتوم به صورت روابط ۴ و ۵ به دست می آیند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0, \quad \text{پیوستگی} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad \text{مومنتوم} \quad (5)$$

که در آن x_i تانسور جهت (های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به جهت های x ، y و z اشاره می کند)، $\bar{u}_i$ مولفه سرعت فیلترشده در جهت x_i ، t متغیر زمان، ρ چگالی، $\bar{p}$ فشار فیلترشده و σ_{ij} تانشر تنش در اثر ویسکوزیته مولکولی است که به صورت رابطه ۶ تعریف می شود:

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad (6)$$

و τ_{ij} تنش ابعاد زیر شبکه است که به صورت رابطه ۷ تعریف می شود:

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (7)$$

تنش ابعاد زیر شبکه که در اثر فیلتر به وجود می آید، نامعلوم است و نیاز به مدل سازی دارد. در این مورد τ_{ij} به صورت رابطه ۸ تعریف می شود:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

که در آن μ_t ویسکوزیته اغتشاشی زیر شبکه و S_{ij} تانسور نرخ کرنش است که با رابطه ۹ تعریف می شود:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

در اینجا از روش اسماکورینسکی- لیلی به منظور مدل سازی زیر شبکه استفاده می شود. در این روش ویسکوزیته گردابه ای با رابطه ۱۰ تعریف می شود:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

که در آن L_s طول اختلاط ابعاد زیر شبکه ای و $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ است و L_s با رابطه ۱۱ محاسبه می شود:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad (11)$$

که در آن κ ثابت فن کارمن، d فاصله نسبت به نزدیک ترین دیواره، C_s ثابت اسماکورینسکی و Δ بعد شبکه محلی است که با توجه به حجم سلول محاسباتی با رابطه ۱۲ تعیین می شود:

$$\Delta = V^{1/3} \quad (12)$$

ثابت اسماکورینسکی در این مطالعه ۰/۱ در نظر گرفته شده است. معادلات پیوستگی به روش الگوریتم سیمپل، حل و جداسازی معادلات سرعت و فشار با استفاده از میان یابی رای کو انجام می شود. حل در میدان زمان به صورت ضمنی و با دقت مرتبه دوم انجام می شود.

همان طور که گفته شد، روشی که در اینجا به منظور تخمین نویز آیروداکستیک مورد استفاده قرار می گیرد، بر مبنای معادلات فاکس ویلیام هاوکینگز و حل انتگرالی آن است. این مدل تنها برای تخمین نویز انتشار یافته از یک جسم به یک فضای باز مناسب است. بدین ترتیب، این مدل نمی تواند انتشار موج صدا به خاطر

انسان ایجاد کند. همچنین استوانه یکی از هندسه های پر کاربرد در صنایع مختلف است، بنابراین شبیه سازی و کنترل نویز آکوستیک آن می تواند کاربردهای گسترده ای داشته باشد. بین روش های عددی که بتوانند با دقت و هزینه محاسباتی معقولی، گردابه ها و پیامد آن یعنی نویز آکوستیک را محاسبه نمایند، روش شبیه سازی گردابه های بزرگ روش مناسبی است. ضمن این که نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS FLUENT به همراه روش های محاسبه صدا به صورت گسترده ای در منابع برای تخمین نویز آیروداکستیک استفاده شده است.

در مقاله حاضر، برای کاهش نویز آکوستیک حاصل از جریان هوای پرسرعت حول یک استوانه، از روش کنترل فعال ساده استفاده شده است. بدین منظور برای کاهش نویز، شیارهایی موازی محور روی سطح استوانه ایجاد و مکش جریان به داخل از آنجا انجام شده است. استوانه مورد نظر می تواند نماینده اجزای ارابه فرود یک هواپیما تلقی شود. سرعت جریان مورد استفاده در تحقیق حاضر برابر با ۲۵۰ km/h در نظر گرفته شده که در محدوده سرعت نشست و برخاست هواپیماهای مسافری است [24].

برای شبیه سازی جریان از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. هدف مطالعه بررسی اثر عرض و فاصله شیارها و سرعت مکش بر نویز آکوستیک تولید شده است. برای این کار ابتدا جریان با روش عددی و استفاده از نرم افزار FLUENT شبیه سازی شده و سپس نویز آکوستیکی به روش فاکس ویلیام هاوکینگز محاسبه شده است. در ادامه روش مورد استفاده در این تحقیق تشریح شده است.

۲- روش حل و معادلات حاکم

در تحقیق حاضر، برای تخمین نویز آکوستیک از روش قیاس آکوستیک استفاده شده است. در این روش، محاسبات مربوط به دینامیک سیالات محاسباتی و میدان آکوستیک به صورت کاملاً مجزا، انجام و میدان جریان نزدیک جسم به عنوان یک منبع استفاده می شود. بدین منظور، در گام اول معادلات سه بُعدی و ناپایای ناویر- استوکس با روش شبیه سازی گردابه های بزرگ حل می شود. سپس سطح صدا در یک نقطه ناظر از روی فشارهای نوسانی با استفاده از معادله فاکس ویلیام هاوکینگز استخراج می شود. در مطالعه حاضر، شبیه سازی جریان به وسیله نرم افزار ANSYS FLUENT 16 انجام شده است. معادلاتی که در روش شبیه سازی گردابه های بزرگ مورد استفاده قرار می گیرد، از فیلتر کردن معادلات ناپایای ناویر- استوکس حاصل می شود. در فرآیند فیلتر سازی، گردابه هایی که کوچک تر از عرض فیلتر مورد نظر هستند، نادیده گرفته می شوند. بنابراین معادلات حاکم بر گردابه های بزرگ به دست می آید. فیلتر مورد نظر به صورت رابطه ۱ است:

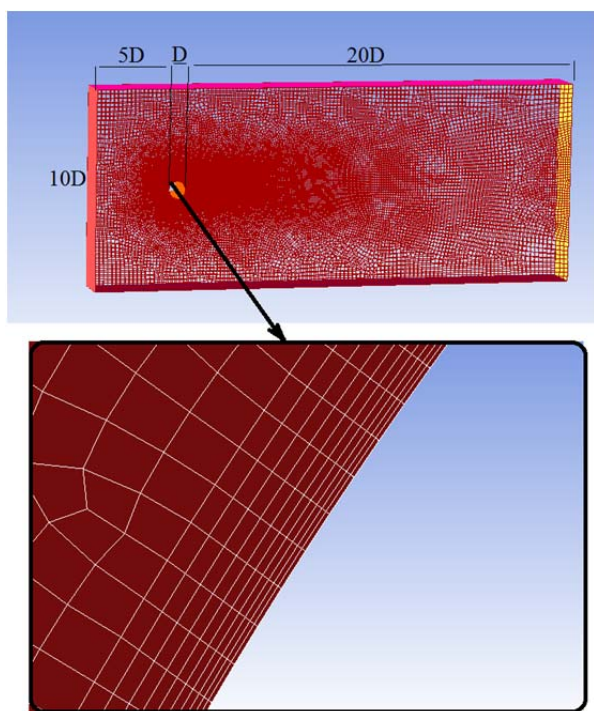
$$\bar{\varphi}(x) = \int_{\Omega} \varphi(x') G(x, x') dx' \quad (1)$$

که در آن Ω دامنه جریان، φ متغیر وابسته به زمان، G تابع فیلتر که ابعاد گردابه های حل شده را تعیین می کند، x' متغیر مکانی و x مختصات مکانی فیلتر است. در نرم افزار ANSYS FLUENT روش گسسته سازی حجم محدود خود به صورت صریح، فرآیند فیلتر سازی را به صورت رابطه ۲ انجام می دهد:

$$\bar{\varphi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \varphi(x') dx' \quad x' \in v \quad (2)$$

نویرگ^[26] با توجه به مطالعات تجربی، عمق مناسب برای یک استوانه در جریان با رینولدز ۹۰ هزار را برابر با ۳/۱۶ قطر (۳/۱۶D) پیشنهاد داد. علاوه بر این، مطالعات دیگری^[27, 28] نشان داده است که عمق ۲ برابر قطر در محدوده رینولدز ۱۰^۵×۱/۴ همخوانی مناسبی با نتایج تجربی به دست می‌دهد. با توجه به موارد فوق می‌توان گفت که عمق ۲/۵ برابر قطر برای شرایط جریان مطالعه فعلی، مقدار مناسبی است.

شرایط مرزی در ورودی میدان، ورودی سرعت و در خروجی، خروجی فشار با فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است. مرزهای بالایی و پایینی نیز متقارن هستند. فشار کاری مقدار ۱۰۳۲۵ پاسکال (Pa) و ثابت در نظر گرفته شده است. ابعاد میدان محاسباتی سه‌بعدی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شبکه‌بندی میدان، از حدود ۵۵ هزار سلول دو‌بعدی چهارضلعی بی‌سازمان که اتلافات عددی کمتری نسبت به شبکه مثلثی دارد، در صفحه عمود بر محور سیلندر استفاده شده است. از این میان، ۳۷۰ سلول روی سطح دیواره استوانه در آن مقطع قرار گرفته است. در بعد سوم از شبکه‌بندی کوپر استفاده شده که در واقع تکرار همان شبکه دو‌بعدی در بعد سوم (راستای محور سیلندر) به تعداد ۵۰ لایه است. بدین ترتیب در مجموع ۲ میلیون و ۷۵۰ هزار سلول ایجاد شده است. مشخصات شبکه لایه مرزی که در شکل ۳ نمایش داده شده، به این صورت است که فاصله اولین سلول از دیواره ۰/۰۰۰۵ متر، نرخ رشد ۱/۲، تعداد کل لایه‌ها ۱۰ و ارتفاع کل آن نیز ۰/۰۰۳ متر است.



شکل ۳) میدان حل عددی و شبکه لایه مرزی

۴- تحلیل استوانه ساده و اعتبارسنجی

در این بخش برای اعتبارسنجی روش، میدان آکوستیک ناشی از جریان حول استوانه مورد نظر بدون کنترل جریان محاسبه شده است. در بخش مرور مقالات ذکر شد که عامل مهم در انتشار صدا از چنین هندسه‌هایی، پدیده ریزش گردابه است. بنابراین قبل از مقایسه نتایج آکوستیک بهتر است که پدیده‌های به‌وجودآمده در مساله مرور شود.

انعکاس یا پراکندگی به علت وجود هر سطح یا مانع خارجی غیر از منبع را تخمین بزنند^[21]. معادلات فاکس ویلیام‌هاو کینگز را می‌توان با دستکاری معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به دست آورد (جزئیات بیشتر این روش در یک منبع^[22] وجود دارد). معادله فاکس ویلیام‌هاو کینگز، یک معادله موج غیرهمگن به‌صورت رابطه ۱۳ است:

$$\frac{1}{c_{\infty}^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_{\infty} v_n + \rho(u_n - v_n)\delta(f)] \} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [\rho_{ij} n_j + \rho u_i(u_n - v_n)\delta(f)] \} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i} \{ T_{ij} H(f) \} \quad (13)$$

که در آن $p' = p - p_{\infty}$ ، u_i مولفه سرعت در جهت x_i و همچنین v_n و u_n مولفه‌های سرعت عمود بر صفحه ($f=0$) هستند. تابع دلتای دیراک و $H(f)$ تابع هیو بساید است. در این روش، یک سطح ریاضی به‌نام S تعریف می‌شود که در آن $f < 0$ ، روی آن $f=0$ و بیرون آن $f > 0$ است. n_i بردار نرمال بر صفحه و به سمت بیرون، c_{∞} سرعت صوت جریان آزاد و T_{ij} تانسور تنش لایت‌هیل بوده که به‌صورت رابطه ۱۴ است:

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - C_{\infty}^2 (\rho - \rho_{\infty}) \delta_{ij} \quad (14)$$

که در آن:

$$P_{ij} = P \delta_{ij} - \mu \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (15)$$

در معادله ۱۳ که یک معادله موج غیرهمگن است، مقادیر سمت راست معادله منابع تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی صدا بوده و معلوم (از شبیه‌سازی جریان به دست می‌آید) هستند. منابع صوت تک‌قطبی نشانگر نویز ایجادشده در اثر نوسان جرم به‌واسطه حرکت سطوح هستند. منابع دوقطبی در اثر نیروهای نوسانی وارد بر سطح جسم و منابع چهارقطبی نویز تولیدشده به‌واسطه نوسان تنش‌ها در نواحی دور از جسم هستند.

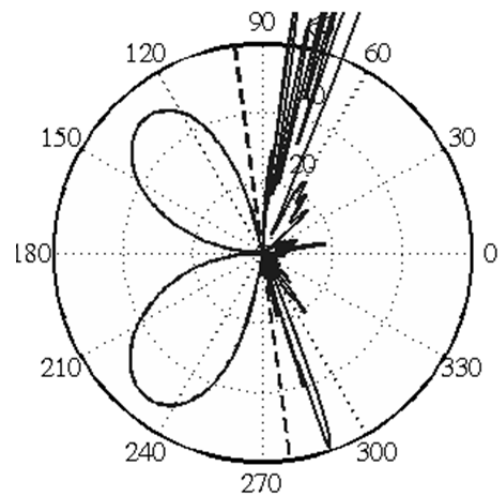
۳- مدل، میدان حل، شبکه حل عددی و شرایط مرزی

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و کنترل نویز آیرودینامیک انتشاریافته حاصل از عبور جریان پرسرعت از روی یک استوانه است. قطر استوانه ۰/۱۹m، سرعت جریان آزاد ۶۹/۵m/sec (معادل ۲۵۰km/h) و رینولدز جریان آزاد بر مبنای قطر استوانه ۹۰ هزار است.

میدان محاسباتی در شکل ۳ نشان داده شده که این میدان شامل یک مکعب مستطیل حول استوانه است. فاصله استوانه تا بالادست، ۵ برابر قطر و فاصله استوانه تا پایین‌دست، ۲۰ برابر قطر استوانه است. مرزهای بالا و پایین در فاصله ۵ برابر قطر از محور استوانه قرار دارند. از آنجایی که ابعاد عمق میدان در جهت z ، نتایج آکوستیک و شبیه‌سازی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین این پارامتر باید به‌دقت انتخاب شود. براساس مطالعات کیم و همکاران، مرزهای کناری ایجادشده در سه‌بعد در جهت z ، حالت تناوبی دارند و محور استوانه در این جهت باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا بتواند بیشترین طول آشفستگی را در فرکانس‌هایی در نظر بگیرد که می‌توانند نتایج را تحت تأثیر قرار دهند^[25]. از طرفی، این اندازه باید به‌نحوی بهینه انتخاب شود، چرا که هر چقدر عمق دامنه بزرگ‌تر باشد، هزینه محاسباتی به‌طور قابل توجهی بیشتر می‌شود.

۴-۱- مقایسه زاویه جدایش جریان

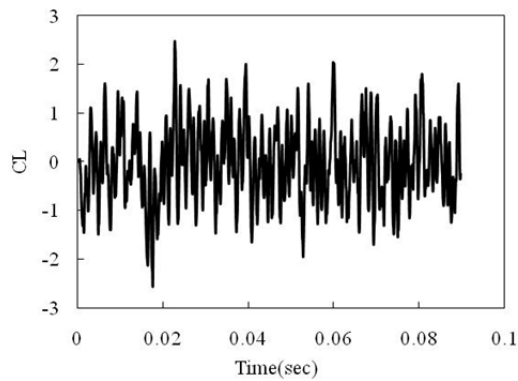
نمودار تنش برشی حاصله روی دیواره استوانه برحسب زاویه به صورت دیاگرام قطبی در شکل ۴ نشان داده شده است. تنش برشی با گرادیان سرعت در راستای عمود بر دیواره متناسب است. ملاحظه می شود که تنش از مقدار صفر در نقطه سکون (زاویه ۱۸۰ درجه دیاگرام) آغاز می شود و با افزایش سرعت در ناحیه بیرون لایه مرزی و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره تا حوالی زاویه ۱۳۵ درجه، این افزایش ادامه می یابد. سپس تنش برشی به دلیل انحنای شکل و منبسط شدن جریان رو به کاهش می نهد و مطابق با رابطه برنولی فشار زیاد می شود. کاهش سرعت منجر به کاهش گرادیان سرعت در مرز و کاهش تنش برشی می شود. تقابل بین گرادیان فشار مثبت و مومنوم، جریان را در زاویه ۹۷ درجه جدا می کند و از آن پس به دلیل رفتار نوسانی و گرداب گونه جریان، تنش برشی رفتار تنش برشی نامنظم می شود. از طرفی ملاحظه می شود که به دلیل متفاوت بودن فرکانس جدایش گردابه ها در زوایای منفی و مثبت، تنش برشی نیز در زوایای مثبت و منفی متفاوت است. زاویه جدایش جریان از استوانه در همین عدد رینولدز در منبعی [29] برابر ۱۰۰ درجه ذکر شده است که با مقدار حاصل در تحقیق حاضر همخوانی خوبی دارد.



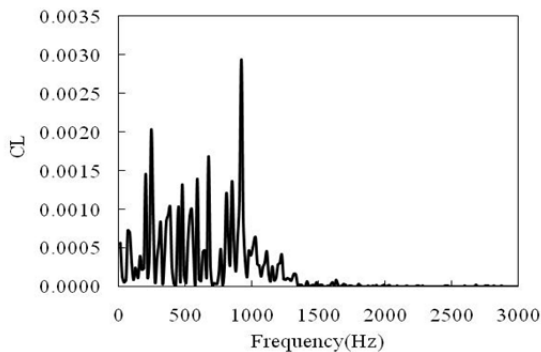
شکل ۴: تنش برشی روی دیواره استوانه

۴-۲- مقایسه پارامترهای نوسانی جریان

تحقیقات قبلی نشان داده که فرآیند جدایش گردابه ها از پشت استوانه، یک فرآیند پرپیودیک (نوسانی) با یک دامنه غالب متناظر با فرکانس جدایش است [23]. فرکانس جدایش گردابه ها را می توان با بررسی تغییرات ضریب برآ بهتر بررسی نمود. تغییرات ضریب برآ با زمان در نمودار ۱ و تحلیل فرکانسی تغییرات چگالی طیفی آن در نمودار ۲ نشان داده شده است. در ابتدا و با شروع شبیه سازی، جریان به صورت متقارن از روی جسم عبور می کند و ضریب برآ صفر است. با جدا شدن گردابه ها از زوایای منفی و مثبت، نیروی برآ در جهت خلاف بر جسم وارد می شود و بدین ترتیب با توجه به صفر بودن زاویه حمله، انتظار می رود که ضریب برآ حول مقدار صفر نوسان کند. در نهایت، به دلیل طبیعت جدایش نواسانی گردابه ها، تغییرات ضریب برآ به صورت شبه پایا در می آید. از تحلیل فرکانسی ضریب برآ ملاحظه می شود که گردابه های با قدرت زیاد عمدتاً در فرکانس ۸۱۰ هرتز و عدد استروهال ۰/۲ از روی بدنه جدا می شوند.

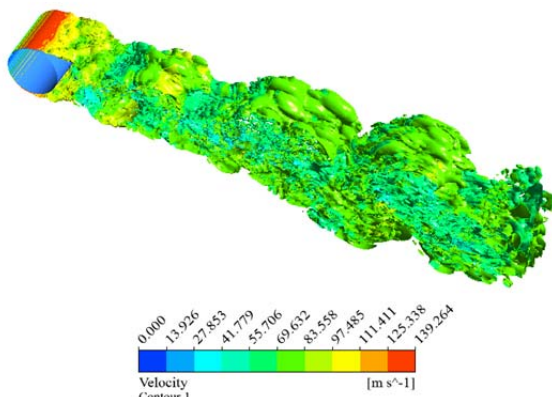


نمودار ۱: تغییرات ضریب برآ با زمان



نمودار ۲: تغییرات چگالی طیفی ضریب برآ نسبت به فرکانس

مقدار جذر مجموع مربعات مقادیر ضریب برآ در زمان های مختلف برای همین مساله در پژوهشی [26] برابر با ۰/۴۵ تا ۰/۶ ذکر شده که این مقدار در تحلیل های حاضر برابر ۰/۵۷ شده است. کانتور سه بُعدی سرعت روی استوانه در شکل ۵ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که جریان دو بُعدی قبل از استوانه، بعد از عبور از استوانه کاملاً سه بُعدی می شود. همچنین نامنظم بودن نوسانات ضریب برآ (نامنظم و نه کاملاً سینوسی) می تواند به علت سه بُعدی شکسته شدن گردابه ها باشد [23].



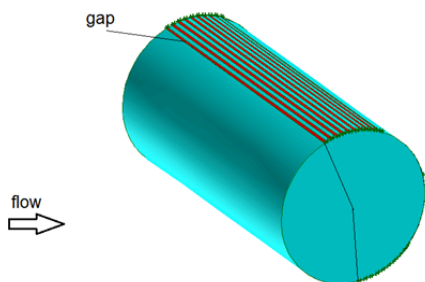
شکل ۵: کانتورهای سرعت در دنباله جریان پشت استوانه

به طور کلی مشخصاتی نظیر عدد استروهال، ضرایب برآ و پسا در جریان حول یک استوانه، تنها تابعی از رینولدز نیست و به پارامترهایی نظیر نسبت منطری استوانه D/L ، نسبت انسداد D/H در تونل باد، زبری استوانه، میزان اغتشاش در جریان آزاد در تونل باد، عدد ماخ و غیره بستگی دارد. به همین خاطر در داده های مربوط به مشخصات مورد نظر گزارش شده در منابع و مقالات در

۵- کنترل فعال نویز

همان گونه که پیشتر گفته شد، در تحقیق حاضر به‌منظور کنترل نویز ایجادشده در اثر عبور جریان از روی استوانه، شیارهایی روی استوانه ایجاد شده است. وظیفه این شیارها این است که از محل آنها جریان به داخل مکیده شود و جدایش جریان و ایجاد گردابه‌ها به تاخیر بیافتد. با توجه به این که جدایش جریان در زاویه حدوداً ۹۷ درجه اتفاق می‌افتد، اولین شیار از زاویه ۱۰۰ درجه (یعنی ۳ درجه قبل از شروع جدایش) شروع شده است. همچنین شیارها به‌صورت متقارن در پایین و بالای استوانه قرار دارند.

موقعیت شیارها در شکل ۶ نشان داده شده است. در کلیه موارد، برای دستیابی به یک جریان با نوسانات تکرارشونده، ابتدا جریان به‌مدت $6 \cdot D/U_0$ شبیه‌سازی شده است. در این مدت‌زمان، جریان تقریباً سه بار طول میدان را طی کرده است. سپس همین مدت‌زمان نیز برای جمع‌آوری اطلاعات به‌منظور محاسبات آکوستیک اختصاص داده شده است. گام زمانی در همه شبیه‌سازی‌ها $0.182 \cdot D/U_0$ در نظر گرفته شده است، به‌گونه‌ای که عدد کورانت در محدوده یک قرار بگیرد. بدین ترتیب و با توجه به این گام زمانی، حداکثر فرکانسی که برای محاسبات آکوستیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت، ۱۰۰ کیلوهرتز است. در ادامه، اثر پارامترهای مختلف نظیر عرض شیار، فاصله شیار و سرعت مکش جریان روی میزان نویز آکوستیک ایجادشده در موقعیت دو حسگر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

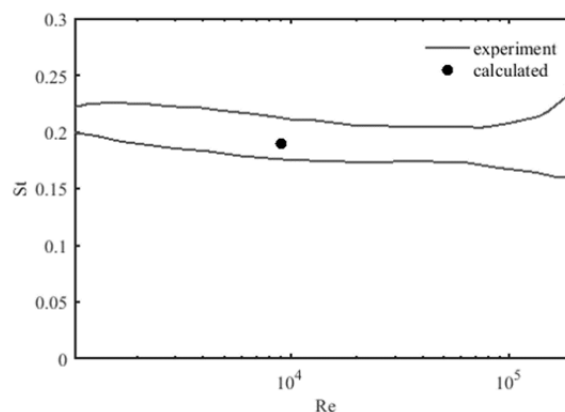


شکل ۶) شیارهای ایجادشده برای مکش جریان

۱-۵- اثر تعداد شیارها روی نویز آکوستیک و عملکرد آیرودینامیک

در این بخش، اثر تعداد شیارها روی نویز آکوستیک و عملکرد آیرودینامیک استوانه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. عرض هر شیار ۲ درجه و شیارها با زاویه ۳ درجه از هم قرار داده شده‌اند. سرعت مکش جریان از شیارها ۵ متر بر ثانیه است. RMS ضریب برآ و سطح کلی صدا به‌ازای تعداد مختلف شیارها در نمودار ۴ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با اضافه‌شدن سوراخ‌های ابتدایی، دامنه نوسانات ضریب برآ زیاد می‌شود. این بدین معنی است که گردابه‌های بزرگ‌تری از روی بدنه جدا می‌شوند و فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها مطابق با نمودار ۵ تا افزوده‌شدن شیارها تا زاویه ۷۵ درجه کاهش پیدا می‌کند. سپس با افزایش تعداد شیارها، مرتباً دامنه گردابه‌های جداشده از روی بدنه کاهش می‌یابد، هم‌زمان تعداد بیشتری گردابه بر واحد زمان از روی بدنه جدا و فرکانس جدایش غالب زیاد می‌شود. در نهایت، فرآیند مکش به‌خوبی عمل می‌کند و با تعداد ۱۹ شیار تقریباً گردابه‌ها از روی بدنه حذف می‌شوند و دامنه نوسانات به صفر میل می‌کند. در این حالت گردابه‌های با قدرت بسیار کم و فرکانس بسیار پایین از روی بدنه جدا می‌شوند.

ارتباط با جریان حول استوانه پراکندگی زیادی وجود دارد [22]. در نمودار ۳، عدد استروهال فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها در این تحقیق با نتایج تجربی آرایه‌شده توسط کانتول و کولر [30] مقایسه شده است. عدد رینولدز اجرای اخذشده در تحقیق حاضر برابر با ۹۰۰۰۰ بوده و عدد استروهال فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها برابر با ۰/۲ است. منحنی‌های بالا و پایین نشان‌داده‌شده در این نمودار به‌دلیل تغییرپذیری داده‌های جمع‌شده در آزمایش است. ملاحظه می‌شود که عدد استروهال محاسبه‌شده همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



نمودار ۳) تغییرات عدد استروهال با رینولدز

۴-۳- مقایسه سطح صدا

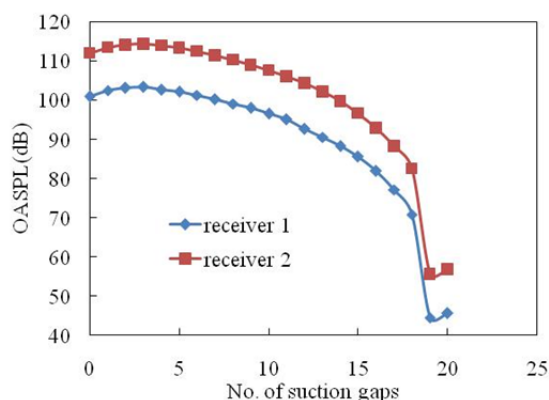
برای اعتبارسنجی سطح صدای کل از نتایج تجربی یک پژوهش به‌عنوان مرجع [31] استفاده شده است. در این پژوهش، دو میکروفون در زیر استوانه در فاصله ۳/۵ برابر قطر و ۲/۸ برابر قطر قرار داده شده و سطح صدای جریان اندازه‌گیری شده است. نتایج آکوستیک در این پژوهش برای طول استوانه ۲۵/۳ برابر قطر آرایه شده است. از آنجایی که شبیه‌سازی استوانه با طول زیاد، هزینه محاسباتی قابل توجهی ایجاد می‌کند، بنابراین، در این مطالعه شبیه‌سازی برای عمق ۲/۵ برابر قطر استوانه (با در نظر گرفتن ملاحظات که قبلاً ذکر شد) صورت گرفته است. از آنجایی که طول استوانه در کل صدای تولیدشده بسیار موثر است، بنابراین باید برای مقایسه نتایج، تصحیح صورت گیرد. در این تحقیق از روش تصحیح آرایه‌شده توسط یک پژوهش [32] استفاده شده است. این روش اختلاف سطح فشار صوت (ΔSPL_{corr}) بین دو هندسه یکسان با طول‌های مختلف را آرایه می‌دهد. بنابراین اگر L_1 طول عمق واقعی استوانه در آزمایشات تجربی و L_2 طول عمق شبیه‌سازی آن باشد، از رابطه زیر برای تصحیح نتایج آکوستیک استفاده می‌شود:

$$\Delta SPL_{corr} = 20 \log \frac{L_1}{L_2} \quad (23)$$

نتایج مقایسه سطح کل صدای تصحیح‌شده این مطالعه و پژوهش مرجع [31] در جدول ۱ آمده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج در هر دو گیرنده صوتی از همخوانی مناسبی با نتایج تجربی برخوردار هستند.

جدول ۱) تاثیر طول معادل منبع بر سطح صدای کل (OASPL)

سطح صدای کل	نتایج تجربی [31]	نتایج حاضر
گیرنده یک ($y=35D$)	۱۱۷dB	۱۱۲dB
گیرنده دو ($y=128D$)	۱۰۰dB	۱۰۱dB



نمودار ۶) تغییر سطح صدای کل شنیده شده در میکروفون‌های یک و دو

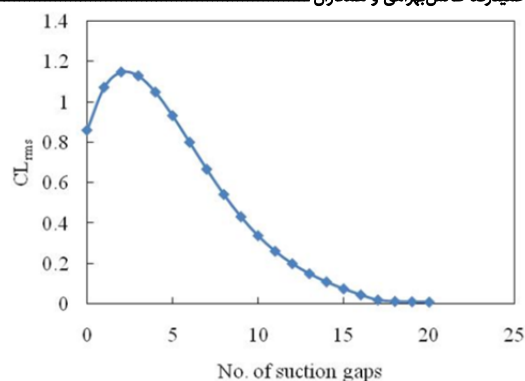
ملاحظه می‌شود که همزمان با افزایش دامنه و کاهش فرکانس در تعداد سوراخ‌های کم، سطح کل صدا در هر دو نقطه افزایش می‌یابد. ولی در ادامه با کاهش قدرت گردابه‌ها و کاهش اندازه نیروهای نوسانی وارده از جسم به سیال (کاهش دامنه نیروی برآ)، سطح کلی صدا در هر دو حسگر کاهش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که با حذف گردابه‌ها (در تعداد شیارهای ۱۹ و ۲۰) سطح صدای حس شده به‌طور ناگهانی با افت مواجه می‌شود. البته این موضوع نقش گردابه‌ها در شکل‌گیری نویز آیرودینامیک را پررنگ‌تر جلوه می‌دهد.

سطح کل صدای حس شده در هر دو حسگر، روندهای یکسانی را نشان می‌دهند و ملاحظه می‌شود که حسگر شماره ۲ به دلیل این که در فاصله دورتری قرار دارد، صدای کمتری را حس می‌کند. به‌طور کلی ملاحظه می‌شود که با قراردادن ۱۹ شیار روی سطح می‌توان سطح صدا را در هر دو حسگر به ۶۰ دسی‌بل کاهش داد. سطح صدای تولید شده پس از کنترل جریان، بسیار پایین و مناسب است. برای روشن‌تر شدن بحث می‌توان گفت که سطح کل صدای تولید شده توسط یک جت جنگنده که در فاصله ۳۰۰ متری از سطح زمین حرکت می‌کند، موسیقی راک یا صدای دیسکو در محدوده ۱۲۰-۱۱۰ دسی‌بل است. در حالی که صدای جاروبرقی یا مجرای یک تهویه مطبوع در فاصله ۶ متری بین ۷۰-۶۰ دسی‌بل، صدای یک ترافیک آرام در فاصله ۶۰-۵۰ متری و سطح صدا در یک منطقه مسکونی آرام در روز ۵۰-۴۰ دسی‌بل است [33]. همچنین زمان مجاز برای قرارگیری گوش انسان در معرض صدای ۱۱۰ دسی‌بل کمتر از ۴ دقیقه و زمان مجاز برای قرارگیری در سطح صدای ۸۵ دسی‌بل حدود ۸ ساعت و برای ۷۰ دسی‌بل حدود ۱۶ ساعت است [33].

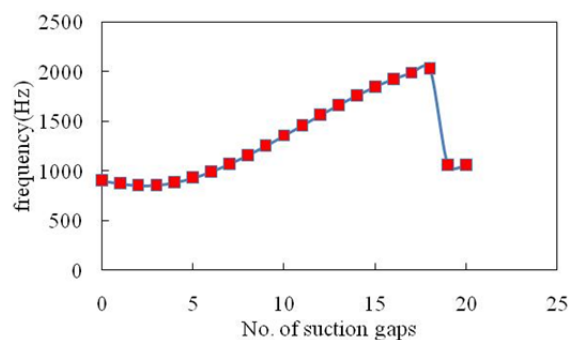
۲-۵- اثر سرعت مکش بر نویز آکوستیک و عملکرد آیرودینامیک

یکی از پارامترهای مهم در کنترل نویز به‌وسیله مکش، سرعت مکش است. علاوه بر این، مکش جریان مستلزم صرف انرژی است، بنابراین سرعت بهینه می‌تواند مصرف انرژی را هم بهینه نماید. در این بخش در موقعیت ثابت شیارها (موقعیت بررسی شده در بخش قبل)، اثر سرعت روی پارامترهای مختلف بررسی می‌شود. در نمودار ۷ ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت مکش، به‌تدریج از قدرت گردابه‌ها کاسته و دامنه نوسانات ضریب برآ به‌صورت یکنواخت کم می‌شود. با توجه به نمودار می‌توان گفت که در سرعت ۴ متر بر ثانیه، تقریباً گردابه‌ها به‌صورت کامل حذف شده‌اند و دامنه نوسانات ضریب برآ به مقدار ناچیزی رسیده است.

در بخش‌های قبل دیده شد که فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها در حالت اولیه ۸۱۰ هرتز بوده است. در نمودار ۸ ملاحظه می‌شود که در سرعت‌های بسیار کم، فرکانس جدایش گردابه‌ها نسبت به حالتی

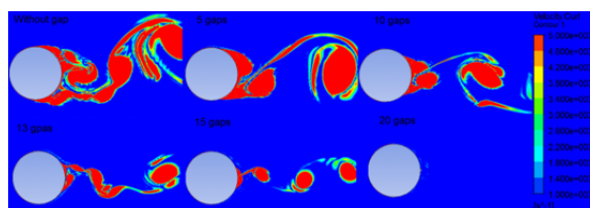


نمودار ۷) تغییرات جذر مجموع مربعات ضریب برآ با افزایش تعداد شیارها



نمودار ۸) تغییرات فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها با افزایش تعداد شیارها

در نمودار ۵ ملاحظه می‌شود که فرکانس جدایش گردابه‌ها با ۱۹ یا ۲۰ شیار حدود ۱۰۰۰ هرتز است. این موضوع با مراجعه به کانتور نشان داده شده در شکل ۷ بهتر قابل تفسیر است. در این شکل دیده می‌شود که در یک زمان مشخص در حالتی که شیار روی سطح وجود ندارد، یک گردابه بسیار بزرگ در حال جدا شدن از روی استوانه است. در حالتی که ۵ و ۱۰ شیار روی سطح وجود دارد، ملاحظه می‌شود که یک گردابه جدا شده در حال دور شدن از جسم و گردابه دیگری در حال جدا شدن است. در کانتورهای مربوط به ۱۳ و ۱۵ شیار تقریباً سه گردابه در شکل حضور دارند، ولی ملاحظه می‌شود که قدرت و دامنه گردابه‌ها نسبت به تعداد شیارهای کمتر بسیار کوچک‌تر شده است. در نهایت، در کانتور مربوط به ۲۰ شیار دیده می‌شود که گردابه‌ای در ابعاد گردابه‌های قبلی در شکل وجود ندارد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، نویز آیرودینامیک در جریان‌های با ماخ پایین در اثر نیروهای نوسانی وارد بر سیال توسط جسم ایجاد می‌شود [20] و مهم‌ترین عامل این نیروها نیز جدایش و حرکت مغشوش‌گونه گردابه‌های اطراف جسم است. بنابراین انتظار می‌رود که حرکت گردابه‌ها و نیز تغییرات نیروهای آیرودینامیک که در بخش قبل بررسی شد، ارتباط نزدیکی با میزان نویزهای آیرودینامیک حس شده از روی جسم باشد. تغییرات سطح کل صدای حس شده توسط میکروفون‌های شماره یک و دو در نمودار ۶ نشان داده شده است.



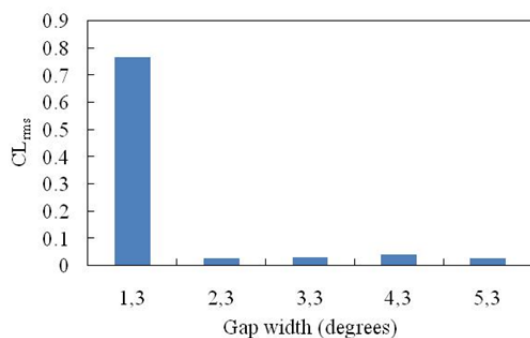
شکل ۹) تغییر کانتورهای سرعت با تغییر تعداد شیارها

شیارهای یک‌درجه بسیار قابل توجه است. با مراجعه به نمودار ۱۰، ملاحظه می‌شود که اگر چه در حالت ۱,۳ (عرض شیار یک‌درجه و در فاصله ۳ درجه از هم) تا حدی جدایش به تاخیر افتاده و دامنه نوسانات ضریب برآ نسبت به حالتی که در آن شیار وجود نداشته، تقریباً ۱۰٪ کاهش یافته، اما نتوانسته است به‌صورت کامل گردابه‌ها را حذف کند.

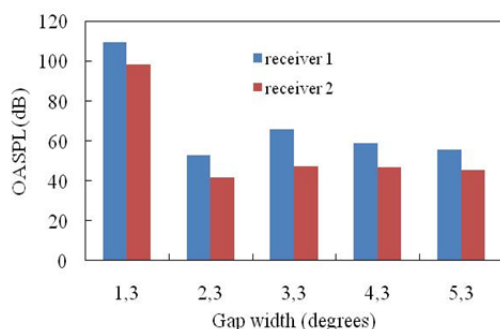
این موضوع در سطح صدای حس شده نیز به‌خوبی مشهود است. در نمودار ۱۱ ملاحظه می‌شود که در حالت ۱,۳ نسبت به حالت بدون شیار، سطح صدا تقریباً فقط ۳ دسی‌بل کاهش یافته است. همچنین ملاحظه می‌شود که وضعیت ۲,۳ نسبت به بقیه حالت‌ها وضعیت بهتری به‌لحاظ آکوستیک داشته و افزایش عرض شیارها تاثیر قابل توجهی روی سطح صدا نداشته است. کانتور چرخش سرعت در وضعیت ۱,۳ و ۴,۳ در شکل ۸ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در وضعیت ۱,۳ تعبیه شیار نتوانسته است، به‌طور موثری جلوی تشکیل گردابه‌ها را بگیرد و یک گردابه بسیار بزرگ در عقب استوانه قرار دارد، در حالی که در وضعیت ۴,۳ گردابه‌ها به‌طور تقریباً کامل از روی سطح حذف شده‌اند.

۴-۵- مقایسه حالت اولیه و حالت کنترل‌شده

مقایسه ضرایب برآ و پسا برای حالت اولیه و حالت نهایی (وضعیت شیارها ۲,۳ و سرعت مکش ۴ متر بر ثانیه) به‌ترتیب در نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در حالت اولیه به‌دلیل عدم وجود کنترل، گردابه‌های بسیار بزرگ از بدنه جدا می‌شوند که این موضوع باعث نوسانات بسیار بزرگی در ضرایب برآ و پسا می‌شود. در حالت کنترل‌شده، نوسانات قابل ملاحظه‌ای در برآ و پسا دیده نمی‌شود که همین موضوع اثر خود را در نویز آکوستیک نشان داده، به‌نحوی که در حالت نهایی، سطح کل صدا در گیرنده‌های شماره یک و دو به‌ترتیب ۵۳ و ۴۱ دسی‌بل است. این موضوع نشان می‌دهد که قدرت صدا با این فرآیند کنترل نسبت به حالت اولیه تقریباً ۳ برابر کاهش یافته است.



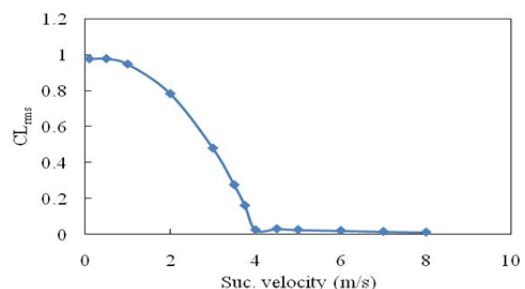
نمودار ۱۰) تغییر دامنه نوسانات ضریب برآ با افزایش عرض شیار



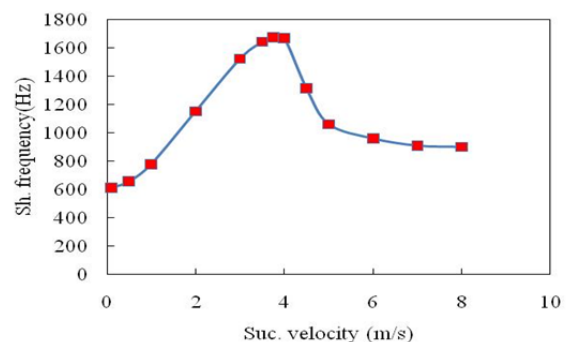
نمودار ۱۱) تغییر سطح صدای کل با افزایش عرض شیار

که شیار روی سطح وجود ندارد، کمتر شده است. به‌تدریج با افزایش سرعت مکش، تعداد گردابه‌هایی که از سطح جدا می‌شوند، بیشتر می‌شود و فرکانس جدایش افزایش می‌یابد. بعد از حذف تقریبی گردابه‌ها بعد از سرعت ۴ متر بر ثانیه، فرکانس جدایش به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در محدوده ۱۰۰۰ هرتز قرار می‌گیرد.

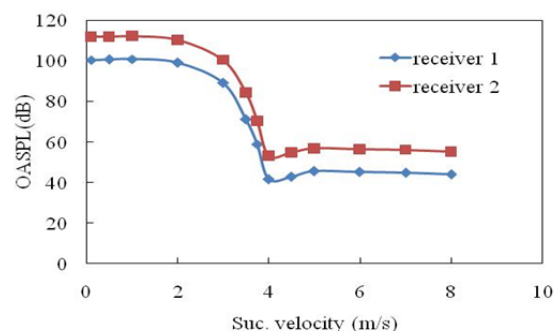
با کاهش دامنه نوسانات نیروهای وارد بر سیال (ضریب برآ)، همان گونه که انتظار می‌رفت و با افزایش سرعت مکش مطابق با نمودار ۹، سطح کل صدای حس شده در محل دو میکروفن نیز کاهش می‌یابد و در نهایت، بعد از سرعت ۴ متر بر ثانیه تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان گفت که بهترین سرعت مکش برای ایجاد کمترین سطح صدای کل در موقعیت دو حسگر، سرعت ۴ متر بر ثانیه است.



نمودار ۱۲) تغییرات جذر مجموع مربعات ضریب برآ با افزایش سرعت مکش



نمودار ۱۳) تغییرات فرکانس غالب جدایش گردابه‌ها با افزایش سرعت مکش



نمودار ۱۴) تغییر سطح صدای کل با افزایش سرعت مکش

۵-۳- اثر عرض شیارها بر نویز آکوستیک

عرض شیارها می‌تواند به یکنواخت‌تر کردن جریان روی سطح کمک کند و نویز آکوستیک را کاهش دهد. در این قسمت، اثر عرض شیارها روی نویز آیرودینامیک مورد بررسی قرار گرفته و در این وضعیت، سرعت مکش جریان ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که نوسانات ضریب برآ در استوانه‌ای با

سیالات محاسباتی شبیه‌سازی شده و سپس نوسانات فشار به‌عنوان ترم منبع در معادلات موج فاکس ویلیام‌هاو کینگز استفاده شده و نویز در مکان‌های مورد نظر از پیش تعیین شده محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش کنترل فعال (بدون بازخورد) ارایه شده در این مقاله، یک روش موثر و در عین حال ساده برای کنترل نویز است. به‌طور دسته‌بندی شده می‌توان گفت که تعداد شیارها تاثیر بسزایی روی میزان کنترل نویز دارد و در حالتی که از زاویه جدایش تا نقطه سکون دوم استوانه با شیار وجود داشته باشد (۱۹ شیار با عرض ۲ درجه با فواصل ۳ درجه از هم)، سطح صدا در هر دو حسگر به اندازه ۶۰ دسی‌بل کاهش می‌یابد. از سرعت‌های مختلفی که برای مکش مورد بررسی قرار گرفت، سرعت مکش ۴ متر بر ثانیه با توجه به وضعیت شیارها (با عرض ۲ درجه و با فاصله ۳ درجه) سرعت مناسبی است.

با توجه به وضعیت فعلی، عرض سوراخ ۲ درجه و با فاصله ۳ درجه، مقادیر مناسبی برای وضعیت شیارها است. عرض‌های بسیار کم، تاثیر قابل توجهی بر کنترل نویز آکوستیک ندارند. به‌عنوان مثال در حالت ۱،۳ نسبت به حالت بدون شیار، سطح صدا تقریباً فقط ۳ دسی‌بل کاهش یافته است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از مدیریت گروه آیرودینامیک مجتمع هوافضای دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران بابت ایجاد تسهیلات در انجام پروژه تشکر می‌نمایند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

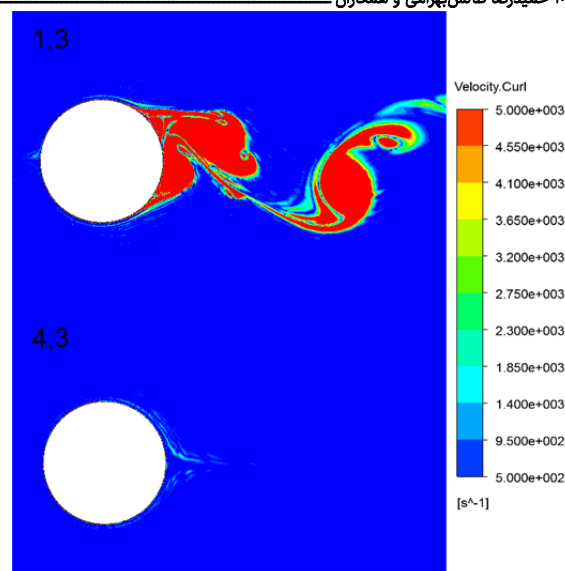
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: حمیدرضا طالش بهرامی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ حمید پرهیزکار (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس (۴۰٪)؛ سجاد قاسملوی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)

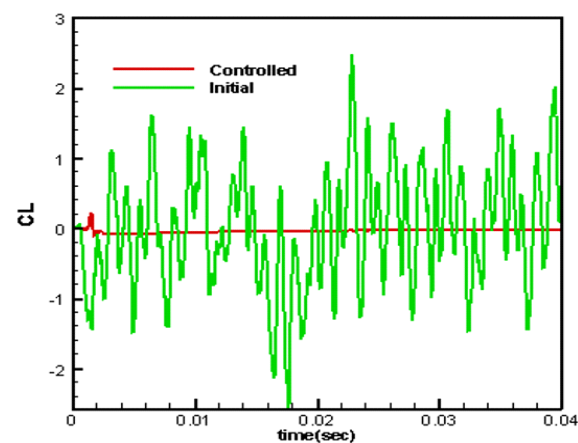
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

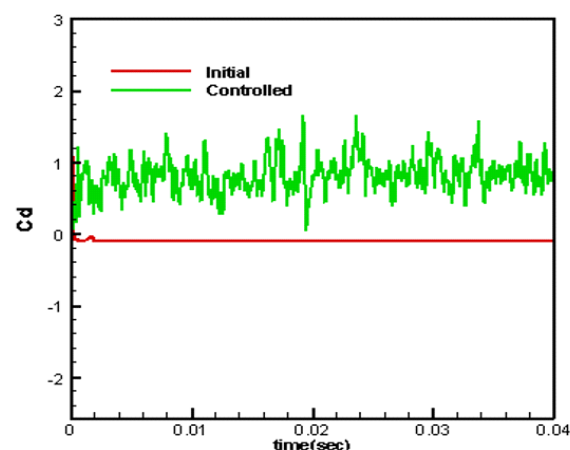
- 1- Di G, Zheng Y. Effects of high-speed railway noise on the synaptic ultrastructure and phosphorylated-CaMKII expression in the central nervous system of SD rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2013;35(1):93-99.
- 2- European Commission. Flightpath 2050 Europe's vision for aviation. Report of the high level group on aviation research [Internet]. Brussels: European Commission; 2011 [cited 2019 Feb 09]. Available from: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/doc/flightpath2050.pdf>
- 3- Souliez FJ, Long LN, Morris PJ, Sharma A. Landing gear aerodynamic noise prediction using unstructured grids. *International Journal of Aeroacoustics*. 2002;1(2):115-135.
- 4- Heller HH, Dobrzynski WM. Sound radiation from aircraft Wheel-WelV Landing-Gear configurations. *Journal of Aircraft*. 1977;14(8):768-774.
- 5- Dobrzynski WM, Schöning B, Chow LC, Wood Ch, Smith M, Seror Ch. Design and testing of low noise



شکل ۸) کانتور چرخش سرعت در حالت شیار با عرض‌های ۱ و ۴ درجه



نمودار ۱۲) تغییرات ضریب برآ در حالت اولیه و کنترل شده



نمودار ۱۳) تغییرات ضریب پسا در حالت اولیه و کنترل شده

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش برای کنترل نویز آکوستیک حاصل از استوانه ارایه شد. برای این کار شیارهایی روی استوانه ایجاد شده و جریان از آن شیارها به درون استوانه مکش شده است. بدین منظور از حل عددی جریان و روش قیاس آکوستیک استفاده شده است. بدین معنی که در ابتدا جریان با استفاده از روش‌های دینامیک

- simulation of flow and sound fields around a square cylinder at various incidence angles. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(5):147-158. [Persian]
- 20- Curle N. The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. The Royal Society. 1955;231(1187):505-514.
- 21- Thomas FO, Kozlov A, Corke TC. Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction. *AIAA Journal*. 2008;46(8):1921-1931.
- 22- Sueki T, Ikeda M, Takaishi T, Kurita T, Yamada H. Reduction of aerodynamic noise from high-speed pantograph using porous materials. *Journal of Environment and Engineering*. 2010;5(3):469-484.
- 23- Cox JS, Brentner KS, Rumsey CL. Computation of vortex shedding and radiated sound for a circular cylinder: Subcritical to transcritical reynolds numbers. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. 1998;12(4):233-253.
- 24- Yai T, Fujisaki K, Itoh R, Kariyazaki K, Kume H, Pan H, et al. Intercity Transport Policy and Planning System: International Comparison Between the EU, USA, China and Japan. *Intercity Transport and Climate Change*. 2015 Nov:31-88.
- 25- Kim SE, Srinivasa Mohan L. Prediction of unsteady loading on a circular cylinder in high Reynolds number flows using large eddy simulation. *ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 12-17 June, 2005, Halkidiki, Greece. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2005.
- 26- Norberg C. Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements. *Journal of Fluids and Structures*. 2003;17(1):57-96.
- 27- Breuer M. A challenging test case for large eddy simulation: High Reynolds number circular cylinder flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000;21(5):648-654.
- 28- Najafian A, Parhizkar H, Ghasemlooy S, Tarabi A. Numerical Calculation of the Sound Produced by the Wind Flow Around the Cylinder and Correction of the Sound Amplitude by Increasing the Length. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(3):440-450. [Persian]
- 29- 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*. 1968;34(4):625-639.
- 30- Cantwell B, Coles D. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 1983;136:321-374.
- 31- Revell JD, Prydz RA, Hays AP. Experimental study of airframe noise vs. drag relationship for circular cylinders. *AIAA Journal*. 1978;16(9):889-897.
- 32- Zdravkovich MM, Bearman PW. Flow Around Circular Cylinders—Volume 1: Fundamentals. *Journal of Fluids Engineering*. 1998;120(1):216-216.
- 33- Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB, Sanders JV. Fundamentals of acoustics. 4th Edition. Hoboken: Wiley; 1999.
- landing gears. *International Journal of Aeroacoustics*. 2006;5(3):233-262.
- 6- Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales (ONERA). Simulation of the noise of landing gear through CFD [Internet]. Paris: French National Aerospace Research Centre; 2011 [cited 2019 Feb 09]. Available from: <https://www.onera.fr/en/news/simulation-of-the-noise-of-landing-gear-through-cfd>
- 7- Guo Y, Yamamoto KJ, Stoker RW. Experimental study on aircraft landing gear noise. *Journal of Aircraft*. 2006;43(2):306-317.
- 8- Exa Corporation. Reduce train community sound pollution [Internet]. Burlington: Exa Corporation; 2014 [cited 2019 February 09]. Available from: <http://exa.com/en/industry/train/aeroacoustics/pass-by-community-noise>
- 9- Talotte C. Aerodynamic noise: A critical survey. *Journal of Sound and Vibration*. 2000;231(3):549-562.
- 10- Kitagawa T, Nagakura K. Aerodynamic noise generated by Shinkansen cars. *Journal of Sound and Vibration*. 2000;231(3):913-924.
- 11- Karimi M, Croaker P, Kessissoglou N, Peake N. Aeroacoustic analysis of a cylinder in low Mach number flow using a periodic CFD-BEM technique. 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 30 May-1 June, 2016, Lyon, France. Reston: AIAA; 2016.
- 12- Zhang CC, Wang WQ, Shi L, Wang J, Ren LQ. Experimental and numerical study on aerodynamic noise reduction of cylindrical rod with bionic wavy surface. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;461:690-701.
- 13- Li L, Liu P. Two-dimensional circular cylinder ANDNACA0012 benchmark problems of aero-acoustics computation. The 21st International Congress on Sound and Vibration, 13-17 July, 2014, Beijing, China. Beijing: International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV); 2014.
- 14- Siozos-Rousoulis L, Lacor Ch, Ghorbaniasl G. A flow control technique for noise reduction of a rod-airfoil configuration. *Journal of Fluids and Structures*. 2017;69:293-307.
- 15- Liow YSK, Tan BT, Thompson MC, Hourigan K. Sound generated in laminar flow past a two-dimensional rectangular cylinder. *Journal of Sound and Vibration*. 2006;295(1-2):407-427.
- 16- Powell A. Theory of vortex sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1964;36(1):177-195.
- 17- Shi L, Zhang Ch, Wang J, Ren L. Numerical simulation of the effect of bionic serrated structures on the aerodynamic noise of a circular cylinder. *Journal of Bionic Engineering*. 2012;9(1):91-98.
- 18- Movahedi A, Dehghan AA, Dehghan Mashhadi M. Experimental investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(9):327-338. [Persian]
- 19- Mohamadrezaei M, Dehghan AA, Movahedi A. Comparison of different methods of numerical