



بررسی تجربی فرآیند تولید نویز آیرودینامیکی از یک سیلندر مربعی متصل به دیواره تحت زوایای حمله مختلف

علیرضا موحدی¹، علی اکبر دهقان^{2*}، مجتبی دهقان منشادی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

* یزد، صندوق پستی 741-89195، adehghan@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 خرداد 1396

پذیرش: 05 مرداد 1396

ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:

سیلندر مربعی

نویز آیرودینامیکی

میکروفون

عدد استروهال

ریزش گردابه

چکیده

در مطالعه حاضر، مشخصات آیرودینامیکی جریان حول یک سیلندر مربعی متصل به کف با ارتفاع محدود در زوایای حمله مختلف بررسی شده است. نسبت منطری مدل مورد بررسی برابر 7 بوده و ضخامت لایه مرزی در محل نصب مدل $\delta/D = 4.27$ است. آزمایش‌ها در تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده آکوستیکی انجام گرفتند. هدف اصلی این مطالعه برقراری ارتباط بین میدان‌های جریان و آکوستیک حول سیلندر مذکور است. نویز ناشی از جریان با استفاده از یک میکروفون اندازه‌گیری و با جریان سنج سیم داغ به مشخصات جریان ارتباط داده شده است. مشخصات نویز منتشر شده بر حسب فرکانس و اندازه بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در طیف فشار دوردست برای جریان حول سیلندر مورد بررسی، یک قله در فرکانسی برابر با فرکانس ریزش گردابه (اندازه‌گیری شده با جریان سنج سیم داغ) دیده می‌شود. یعنی عامل مهم در انتشار صدا از چنین هندسه‌هایی پدیده ریزش گردابه است. عدد استروهال به دست آمده برای سرعت سنج سیم داغ و میکروفون برای جریان حول سیلندر با زاویه حمله صفر درجه تقریباً برابر با 0.11 به دست آمد که با مطالعات قبلی سازگاری داشت. ضمناً بیشترین فرکانس ریزش گردابه در سرعت‌های مختلف مربوط به زاویه حمله 15 درجه به دست آمد. همچنین مشخص گردید سطح فشار صوتی با افزایش سرعت جریان سطح نویز آیرودینامیکی منتشر شده از سیلندر افزایش می‌یابد. سطح فشار صوتی کلی در محدوده سرعت بالادست 5-15 m/s در محدوده 84.2-110.95 dB تغییر نمود. زاویه حمله، در مقایسه با سرعت بالادست اثر کمتری بر سطح کلی نویز منتشر شده دارد.

Experimental Investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence

Alireza Movahedi¹, Ali Akbar Dehghan^{1*}, Mojtaba Dehghan Manshadi²

1- School of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Mechanic and Aerospace Department, Malek Ashtar University of Technology, shahin shahr, Iran

* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, adehghan@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 June 2017

Accepted 27 July 2017

Available Online 08 September 2017

Keywords:

Square cylinder

Aeroacoustic Noise

Microphone

Strouhal number

Vortex shedding

ABSTRACT

In the present research aeroacoustic characteristics of flow over a finite height wall mounted square cylinder at different angles of attack is investigated. The aspect ratio of the model and the boundary layer thickness were 7 and $\delta/D = 4.27$, respectively. The experiments were done in an acoustically improved aerodynamic wind tunnel. The purpose of this study is to identify correlation between the fluid and the acoustic fields. The flow-induced noise was measured using single microphone. The measured noise is related to aerodynamic characteristics of the flow using a single hot wire. The flow-induced noise of the cylinder is characterized in terms of frequency and magnitude. A sharp peak was observed in the far-field pressure at the vortex shedding frequency which was measured with hot wire anemometer. So, it could be concluded that vortex shedding is a source of aerodynamic noise generation. The Strouhal number obtained from two devices was almost equal to 0.11 which is in agreement with previous studies. Also, maximum vortex shedding frequency was measured for $\alpha = 15^\circ$. It is observed that sound pressure level is increased with increasing upstream velocity. The overall sound pressure level ranged between 84.2 and 110.95 (dB) for upstream velocities in the range of 5-15 (m/s). The angle of attack has no important effect on overall sound pressure level.

1- مقدمه

نقل، تلاش‌های متعددی برای کاهش نویز آیرودینامیکی در حال انجام است. بسیاری از سازندگان به دنبال تولید وسایلی هستند که باید مقررات مربوط به تولید صدا را رعایت کنند.

صدای آیرودینامیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های تولید صدا توسط وسایط نقلیه مدرن، مثل هواپیماها، اتومبیل‌ها و قطارها است. لذا در صنایع حمل و

Please cite this article using:

A. Movahedi, A. A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, Experimental Investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 327-338, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Movahedi, A. A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, Experimental Investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 327-338, 2017 (in Persian)

مهم‌تری دارند که این منابع از برهم‌کنش نوسانات سرعت و سرعت متوسط جریان پس زمینه ناشی می‌شوند. دورنینو و همکاران [5] صدای آهنگین تولید شده از یک سیلندر مربعی دو بعدی را بررسی نمودند. مهم‌ترین تفاوت بین این مطالعه و مطالعات قبلی مشاهده یک مود بی‌صدا برای زوایای حمله بین 25 و 45 درجه بود. این حالت در زمانی رخ می‌داد که تونل درحالی که سیلندر در زوایای حمله بیش از 25 درجه قرار داشت روشن شود. البته هر گونه اغتشاشی هر چند کوچک در بالادست سیلندر، این حالت بی‌صدا را از بین برده و حالت انتشار صدای آهنگین را فعال نمود. اکتاویانتی و آسای [6] به صورت تجربی، ریزش گردابه و انتشار صدا از دو سیلندر مربعی کنار هم با فواصل مختلف از یکدیگر را بررسی نمودند. مشخص گردید در برخی فواصل خاص، ریزش گردابه متقارن باعث ایجاد همبستگی شدیدی در راستای عرضی شده و انتشار صدای بیشتری در مقایسه با حالت تک سیلندر رخ می‌دهد.

در بسیاری از کاربردهای واقعی هندسه‌های سیلندری شکل با سطوح مقطع متفاوت، مانند ساختمان‌های با ارتفاع کم، دودکش‌ها، برج‌های خنک‌کن و ... سازه‌های سیلندری شکل ارتفاعی محدود داشته و دارای یک انتهای آزاد و یک انتهای چسبیده به کف هستند. جریان حول سیلندرهایی سه بعدی متصل به کف، پیچیدگی‌های زیادی داشته و شامل پدیده‌هایی پیچیده و سه بعدی است. در جریان حول چنین هندسه‌هایی علاوه بر ریزش متناوب گردابه‌های عرضی و ن کارمن، یک جریان رو به پایین از انتهای آزاد سیلندر وجود دارد که باعث ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که جریان و تحلیل آن را بیشتر و بیشتر پیچیده می‌کند [7]. این گردابه‌ها، گردابه‌های نوک نامیده می‌شوند. همچنین یک جفت گردابه نیز نزدیک محل اتصال سیلندر به کف ایجاد می‌شوند که جریان رو به بالا در نزدیکی کف منشا ایجاد آنهاست. به جز این موارد، ساختارهای پیچیده دیگری مثل گردابه‌های نعل اسبی در ناحیه دنباله سیلندر با ارتفاع محدود وجود دارد که بر پیچیدگی جریان حول چنین هندسه‌هایی می‌افزایند. در مقایسه با سیلندرهایی دو بعدی، مطالعات بسیار کمتری روی جریان حول سیلندرهایی متصل به کف شده است. بخش عمده‌ای از مطالعات صورت گرفته روی سیلندرهایی متصل به کف نیز صرفاً به بررسی آیرودینامیکی جریان حول این هندسه‌ها اختصاص داده شده است. به عنوان مثال در مطالعه وانگ و ژو [7] مشخصات کامل و جامعی از فیزیک جریان حول سیلندر مربعی سه بعدی (متصل به کف) ارائه شده است. مک کلین و سامنر [8] نیز جریان حول یک سیلندر مربعی با ارتفاع محدود را بررسی نمودند. در این مطالعه، ضرایب نیرویی و عدد استروهال برای نسبت‌های منطری و زوایای حمله مختلف بررسی شد. مشخص گردید که به دلیل اثر قوی جریان رو به پایین در انتهای آزاد سیلندر، ضریب پسا و عدد استروهال برای سیلندر سه بعدی در مقایسه با سیلندر دوبعدی حساسیت کمتری به تغییر زاویه حمله دارند. فتحی و همکاران [9] ساختار جریان پشت سیلندر مربعی سه بعدی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. جهت استخراج مشخصات فیزیکی ساختار جریان در عدد رینولدز 10000 از یک کاوشگر پنج‌حفره استفاده شد. مشخصات ناحیه دنباله سیلندر مذکور بررسی و ارائه شده و در انتها اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر مربعی سه بعدی بر ساختار ناحیه دنباله و فیزیک جریان بررسی گردید.

تاکنون مطالعات بسیار کم و محدودی در مورد بررسی آبروآکوستیکی جریان حول هندسه‌های سیلندری شکل متصل به کف انجام شده است. در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد. اسکوبار و همکاران [10] جریان حول سیلندر مربعی سه بعدی را به صورت عددی و تجربی برای عدد

به واسطه کاربردهای گسترده مثل مجموعه چرخ هواپیما، پانتوگراف‌ها و اتومبیل‌ها، ساختمان‌های بلند، دودکش‌ها، خطوط لوله و ...، صدای تولیدی توسط اجسام سیلندری شکل که داخل جریان عرضی سیال قرار گرفته‌اند، بخشی مهم از نویز ناشی از جریان را به خود اختصاص می‌دهند.

جریان حول اجسام جریان‌بند در اعداد رینولدز بالا، ناپایدار است. در اغلب موارد، ناپایداری ناحیه دنباله تشکیل شده در پشت اجسام جریان‌بند منجر به ریزش متناوب گردابه از این اجسام است که باعث می‌شود نیرویی نوسانی به جسم وارد شود. پژوهشگران بسیاری مساله جریان حول چنین اجسامی را بررسی نمودند. این بررسی از جنبه‌های مختلفی مثل بررسی آیرودینامیکی جریان، نیروهای وارد بر جسم، کنترل ریزش گردابه از آن و ... صورت گرفته است. امداد و همکاران [1] رویکرد کنترل بهینه برای کنترل فعال دنباله تشکیل شده در پشت سیلندر مربعی دوبعدی را در رژیم جریان آرام مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه تاثیر گذاری روش ارائه شده را برای کنترل ناپایداری‌های تولید شده در پشت سیلندر نشان داد. سوهانکار و همکاران [2] نیز اثر مکش و دمش یکنواخت روی سطوح یک سیلندر مربعی دو بعدی را روی الگوی جریان، ریزش گردابه و انتقال حرارت از سیلندر بررسی نمودند. عدد رینولدز جریان بین 70 تا 150 بود. مشخص گردید حالت بهینه برای بیشترین کاهش نیروی اعمالی به سیلندر حالتی است که روی سطوح بالایی و پایینی سیلندر مکش و روی سطوح جلویی و پشتی سیلندر دمش صورت گیرد.

در انتشار صدای ناشی از جریان حول اجسام جریان‌بند عوامل مختلفی موثر هستند [3]. مطابق آنالوژی آکوستیکی کرل، یکی از مهم‌ترین این عوامل، منابع دوقطبی تولید صدا هستند که به دلیل فشار نوسانی وارد به سطح سیلندر ایجاد می‌شوند. این منابع دو قطبی ناشی از اعمال نیروهای نوسانی به جسم، در واقع عکس العمل به نیروی وارد به جسم از سوی سیال است. در این زمینه نوسانات نیروهای برآ و پسا نقش دارند. عامل مهم دیگر در تولید نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان، تانسور تنش رینولدز یا به عبارت دیگر، مولفه‌های متوسط و نوسانی سرعت و برهم‌کنش آنها با یکدیگر است. در جریان حول سیلندرها، منابع برشی تولید صدا برخاسته از برهم‌کنش بین مولفه نوسانی سرعت و سرعت متوسط در تولید صدا نقشی به مراتب مهم‌تر از منابعی دارند که ناشی از برهم‌کنش بین مولفه‌های نوسانی سرعت با یکدیگرند [4]. لذا مولفه‌های نوسانی سرعت و به عبارت دیگر آشفتگی جریان نیز به عنوان منبعی چهار قطبی از تولید نویز آیرودینامیکی شناخته می‌شود. به دلیل کاربرد زیاد در صنعت ساختمان، صدای منتشر شده از سیلندرهایی با مقطع مستطیلی و مربعی اهمیت زیادی دارد. در کشور ما نیز در مقررات ملی ساختمان، مبحث هجدهم، به عایق بندی صوتی و تنظیم صدا در فضاهای مختلف اشاره شده است. در سال‌های اخیر، تولید و انتشار نویز آیرودینامیکی از سیلندرها، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. اغلب مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بر روی تولید نویز از سیلندرهایی دو بعدی متمرکز شده‌اند. در ادامه به عنوان نمونه، به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌گردد. چئونگ و همکاران [4] تولید صدای ناشی از جریان هوا حول سیلندر دایره‌ای دو بعدی را بررسی نمودند. تاکید عمده در این مطالعه، تعیین جزئی و دقیق مکانیزم‌های تولید صدا بود. از نتایج این مطالعه این بود که از منابع دوقطبی مهم در تولید صدا نوسانات نیروی برآ است که در مقایسه با نوسانات نیروی پسا از اهمیت به مراتب بیشتری برخوردار است. همچنین مشخص شد که از بین بخش‌های مختلف تانسور تنش‌های رینولدز به عنوان یکی دیگر از منابع تولید صدا، منابعی نقش

صورت گرفته در کشور در این ارتباط می تواند به پیش برد علم آبروآکوستیک تجربی در کشور کمک نماید.

2- تجهیزات آزمایشگاهی

در این بخش، تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی می گردند. مهم ترین تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه تونل باد، مدل مورد بررسی، جریان سنج سیم داغ و تجهیزات اندازه گیری آکوستیکی هستند که در ادامه به مشخصات آنها اشاره می شود.

2-1- تونل باد

تونل باد مادون صوت دانشگاه یزد از نوع مدار باز و دمندۀ بوده و اتاق آزمون آن از نوع بسته است. قسمت های اصلی این تونل باد شامل یک فن سانتریفیوژ یک طرفه، دیفیوزر زاویه باز، اتاق آرامش، نازل و اتاق آزمون است. بیشینه سرعت باد در اتاق آزمون، حدوداً برابر با 30 m/s است. فن این تونل باد، از یک سمت هوا را به داخل خود می کشد و از سمت دیگر به یک شفت متصل است. این شفت نیز به یک موتور DC، با توان 23 کیلو وات وصل می شود. بیشینه سرعت چرخش موتور، برابر با 1800 rpm و تعداد پره های فن برابر با 60 عدد است. پره های فن دارای شیب رو به جلو بوده که نویز پهن باند پایین تا متوسطی را ایجاد می نماید. جریان داخل اتاق آزمون تقریباً یکنواخت است و شدت آشفته گی برای تونل خالی بسیار کم و در حدود 0.3% برای سرعت های کمتر از 20 m/s است. سطح مقطع اتاق آزمون 457×457 میلی متر مربع و طول آن 2400 میلی متر است.

دیواره های اتاق های آزمون تونل باد آیرودینامیکی اولیه از چوب و پنجره های تعبیه شده روی آنها از پلکسی گلس ساخته شده است. این تونل باد برای اندازه گیری های آکوستیکی با هدف کاهش نویز پس زمینه آن اصلاح گردیده است. این اصلاحات شامل جایگزینی دیواره های صلب اتاق آزمون اول با یک سری جعبه جاذب آکوستیکی است. جدار داخلی این جعبه ها با پارچه هایی که کاملاً کشیده شده و محکم شده اند پوشانده شده است. این کار باعث می شود جریان چندانی از پارچه ها عبور ننماید ولی صدا و امواج صوتی از آن عبور نماید. این موضوع، باعث کاهش نویز پس زمینه تونل باد تا بیش از 10 dB در برخی محدوده های فرکانس گردید. آزمایش ها در اتاق آزمون دوم تونل باد با دیواره های صلب صورت گرفتند. همان گونه که پیش تر اشاره شد، ویژگی مهم مطالعه حاضر، انجام آزمایش ها در اتاق آزمون بسته تونل باد است که در مقایسه با انجام آزمایش ها در اتاق آزمون بدون پژواک هزینه های به مراتب کمتری دارد.

2-2- مدل مورد بررسی

در این مطالعه، جریان حول یک سیلندر سه بعدی متصل به کف تحت زوایای حمله مختلف از نقطه نظر آیرودینامیکی و آبروآکوستیکی بررسی شده است. پهنای سطح مقطع مدل مورد بررسی $D=15 \text{ mm}$ و ارتفاع آن $H=105 \text{ mm}$ است. ارتفاع مدل در مقایسه با ارتفاع اتاق آزمون بسیار کمتر بوده و لذا می توان جریان و هندسه را کاملاً سه بعدی قلمداد نمود. نسبت منطقی مدل، برابر 7 است که در فاصله تقریبی 1.8 m از خروجی نازل، روی کف اتاق آزمون نصب گردید. سطح مدل بسیار صاف و صیقلی و لبه های آن نیز کاملاً تیز بوده تا نقاط جدایش جریان ثابت گردند. مدل می تواند در محل قرارگیری بچرخد تا زاویه حمله جریان تغییر نماید. "شکل 1" نحوه قرارگیری سیلندر مذکور در اتاق آزمون دوم تونل باد را به صورت شماتیک نمایش می دهد. لازم

رینولدز $Re=10000$ بررسی نمودند. نتایج این مطالعه هم بستگی خوبی بین نتایج به دست آمده از اندازه گیری های آیرودینامیکی و آکوستیکی نشان داد. بکر و همکاران [11] مشخصات آبروآکوستیکی جریان حول چند هندسه مختلف را بررسی نمودند. یکی از اجسام مورد بررسی سیلندر مربعی سه بعدی و دیگری یک پله در مسیر جریان بودند. سایر هندسه ها هم با چسباندن اشکال مختلف به وجه بالادستی یا پایین دستی سیلندر مربعی سه بعدی ساخته شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که جریان حول سیلندر و پله به ترتیب ایجاد طیف آکوستیکی باریک باند و پهن باند می کنند. کینگ و فیزنمایر [12] سیلندرهایی سه بعدی با سطوح مقطع و نسبت منطقی متفاوت را از منظر تولید صدای آیرودینامیکی بررسی نمودند. مشخص گردید که میزان تولید صدا و نیز فرکانسی که یک قله در طیف مربوط به آن رخ می دهد وابستگی قابل توجهی به نسبت منطقی دارد. موراو و دولان [13] نویز ناشی از برهم کنش جریان و سیلندر متصل به کف با سطوح مقطع دایره ای و مربعی و نیز با نسبت های منطقی مختلف را بررسی نمودند. در این مطالعه نیز بر اثر نسبت منطقی سیلندر بر میزان نویز تولیدی در اثر جریان حول سیلندرها تاکید گردید. ضمن این که بررسی های جزئی تری روی مشخصات طیفی سیگنال های فشار در جریان مورد اشاره انجام گردید. مشخص شد که در برخی از حالات در طیف فشار دوردست، دو قله و در برخی دیگر یک قله دیده می شود. لازم به ذکر است در بسیاری از مطالعات قبلی از میکروفون داخل اتاق آزمون بدون پژواک برای اندازه گیری نویز دوردست استفاده شده است. ولی در برخی مطالعات از جمله مطالعه میش [14] از میکروفون برای اندازه گیری فشار دوردست در اتاق آزمون بسته استفاده شده و نتایج نسبتاً مناسبی به دست آمد. موضوع مرجع مذکور بررسی نوسانات فشار سطحی روی ایرفویل ها بود که در بخشی از آن، هم زمان با نوسانات فشار سطحی میدان آکوستیکی نیز بررسی گردید.

ملاحظه می شود که اطلاعات موجود در مورد نویز آیرودینامیکی منتشر شده از یک سیلندر سه بعدی که در معرض جریان قرار دارد، بسیار محدود است. تقریباً تمامی مطالعات صورت گرفته روی آبروآکوستیک جریان حول سیلندرها در تونل های باد با اتاق آزمون باز که در اتاق های بدون پژواک قرار گرفته اند انجام شده است. در حالی که ساخت این تونل ها هزینه زیادی در بر دارد و لذا انجام چنین مطالعاتی با دشواری هایی همراه است. مطابق اطلاعات نویسندگان، هنوز در داخل کشور مطالعه ای در این زمینه صورت نگرفته است. لذا این مطالعه به بررسی تجربی نویز آیرودینامیکی منتشر شده از یک سیلندر سه بعدی با مقطع مربعی اختصاص داده شده است. سیلندر مورد بررسی داخل اتاق آزمون بسته یک تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده از نظر آکوستیکی قرار گرفته است. تمرکز عمده این مطالعه، روی بررسی هم بستگی بین نتایج به دست آمده از نویز دوردست و نتایج حاصل از اندازه گیری های جریان سنج سیم داغ است. از آنجا که تاکنون مطالعه ای روی اثر زاویه حمله جریان بر مشخصات آبروآکوستیکی جریان صورت نگرفته است، مطالعه حاضر می تواند به تکمیل اطلاعات موجود کمک نماید. لازم به ذکر است، آزمایش های صورت گرفته طی مطالعه حاضر بر خلاف بسیاری از مطالعات قبلی، در تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده از نظر آکوستیکی انجام شده اند. استفاده از تونل های باد آیرودینامیکی برای مطالعات آبروآکوستیکی منجر به ساده تر شدن فرآیند داده برداری و صرفه جویی قابل توجهی در هزینه ها می شود. در صورت تایید توانمندی تونل های باد با اتاق آزمون بسته در انجام آزمایش های آبروآکوستیکی می توان ساده سازی قابل توجهی در فرآیند انجام این آزمایش ها انجام داد. لذا مطالعه حاضر به عنوان یکی از اولین مطالعات

استفاده از کاوشگر یک بعدی جمع‌آوری شد تا نوسانات مولفه سرعت در جهت جریان در ناحیه دنباله اندازه‌گیری و ثبت شود. جریان سنج سیم داغ داخل تونل باد به کمک یک لوله پیتو استاتیکی کالیبره شد. یکی از اهداف مهم این مطالعه بررسی ارتباط بین قله‌های مشاهده شده در طیف فرکانسی سیگنال به دست آمده از اندازه‌گیری با جریان سنج سیم داغ و قله‌های متناظر دیده شده در طیف فشار آکوستیکی دوردست است که به کمک میکروفون اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

4-2- تجهیزات اندازه‌گیری آکوستیکی

از نتایج داده برداری با میکروفون برای بررسی نویز منتشر شده ناشی از جریان عبوری حول سیلندر مورد مطالعه استفاده گردید. تمامی اندازه‌گیری‌های آکوستیکی با استفاده از میکروفون‌های کندانسوری یک‌چهارم اینچ G.R.A.S مدل 40BP انجام گرفتند. این میکروفون‌ها از نوع پولاریزاسیون خارجی بوده و بنابراین جهت راه‌اندازی نیازمند یک منبع تغذیه خارجی هستند. میکروفون‌های G.R.A.S روی پیش‌تقویت کننده‌های یک چهارم اینچ مدل 26AC نصب شده و به منبع تغذیه G.R.A.S مدل 12AR که در خارج از اتاق آزمون قرار گرفته است وصل گردیدند. میکروفون‌های مذکور از نوع منفذدار¹ بوده که محدوده دینامیکی برابر با 44-174 dB(A) و حساسیتی معادل 1.6 mV/Pa دارند. این میکروفون‌ها دارای پاسخ فرکانسی همواری روی محدوده فرکانسی بین 100 Hz تا 70 kHz هستند.

از آن جایی که میکروفون‌ها در معرض جریان مستقیم هوا قرار می‌گیرند، برای کاهش اثر نویز القایی آیرودینامیکی، از یک دماغه مخروطی استاندارد روی آنها استفاده شده است. معمولاً اندازه‌گیری‌های آکوستیکی در تونل‌های باد به دلیل نویز القایی آیرودینامیکی اطراف میکروفون دشوار است. وقتی میکروفون در معرض باد با سرعت بالا در یک جهت مشخص قرار می‌گیرد اثر نامطلوب مذکور را می‌توان با قرار دادن یک دماغه مخروطی شکل کاهش داد. دماغه مخروطی یک شکل خط جریانی و سطحی بسیار صیقلی دارد که کم‌ترین نویز القایی آیرودینامیکی را به دست می‌دهد. برای قرار دادن میکروفون داخل تونل باد، از مکانیزمی مطابق "شکل 3" استفاده گردید. میکروفون از طریق یک نگهدارنده به مکانیزم انتقال دهنده وصل می‌شود. این مکانیزم توانایی جابجایی در راستای سه محور مختصات را با دقت 0.01 mm دارا است. سیگنال تقویت شده میکروفون‌ها، با استفاده از پردازشگر سیگنال دو کاناله مدل DT9847-2-2 ذخیره و پردازش گردیدند. نهایتاً سیگنال‌های دیجیتال به یک کامپیوتر وارد شده و با استفاده از نرم افزار ویب‌پونت فریم ورک² مورد بررسی قرار گرفتند. میکروفون‌ها قبل از بهره‌برداری با استفاده از کالیبراتور G.R.A.S مدل 42AB کالیبره شدند.

اندازه‌گیری‌های آکوستیکی در حضور سیلندر و نیز در غیاب آن انجام شدند تا اثر حضور سیلندر بر طیف فشار دوردست مشخص گردد. بخش عمده‌ای از آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه، در سرعت‌های مختلف جریان در محدوده 5-15 m/s صورت گرفتند.

3- نتایج و تحلیل و بررسی

در این بخش، نتایج بررسی‌های صورت گرفته روی نویز آیرودینامیکی منتشر شده ناشی از جریان حول سیلندر مربعی سه‌بعدی ارائه می‌شوند. ابتدا نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آیرودینامیکی صورت گرفته با جریان سنج سیم داغ

به ذکر است که نحوه تعریف زاویه حمله در مطالعه حاضر مشابه مرجع [8] در نظر گرفته شده است.

محل نصب مدل و ضخامت لایه مرزی تاثیر زیادی بر ساختار جریان حول سیلندرهای سه بعدی متصل به کف دارند. لذا قبل از نصب مدل داخل اتاق آزمون، لایه مرزی جریان در محل نصب مدل اندازه‌گیری و بررسی شد. برای سرعت بالادست $U_{\infty} = 12 \text{ m/s}$ ضخامت لایه مرزی، در محل نصب مدل حدود $\delta = 64 \text{ mm}$ اندازه‌گیری شد که معادل $\delta/D = 4.27$ است. پروفیل سرعت بدون بعد در راستای جریان (u/U_{∞}) و نیز مجذور متوسط مربعات نوسانات این مولفه سرعت به شکل بدون بعد شده $(u_{\text{rms}}/U_{\infty})$ در "شکل 2" ارائه شده‌اند.

3-2- جریان سنج سیم داغ

در این مطالعه، برای تحلیل فرکانسی جریان از جریان سنج سیم داغ، ساخت شرکت فرانسجش صبا استفاده شده است. داده‌های جریان سنج سیم داغ با

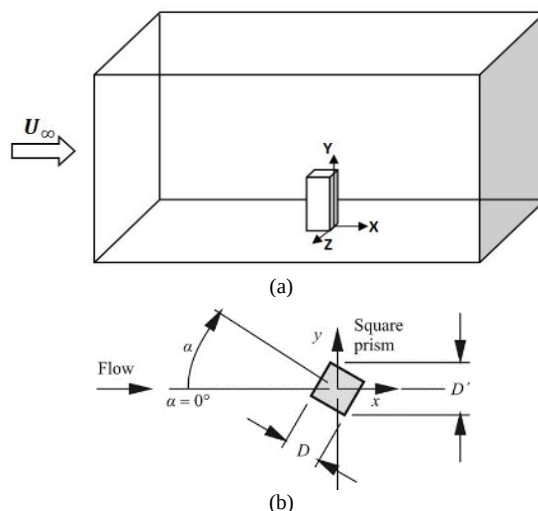


Fig. 1 Schematic drawing of wall mounted square cylinder placed in the test section: (a) coordinate system; (b) definition of angle of attack (top view) [8]

شکل 1 طرح شماتیک از سیلندر مربعی قرار گرفته در اتاق آزمون تونل باد: (الف) سیستم مختصات مورد استفاده؛ (ب) تعریف زاویه حمله (نما از بالا) [8]

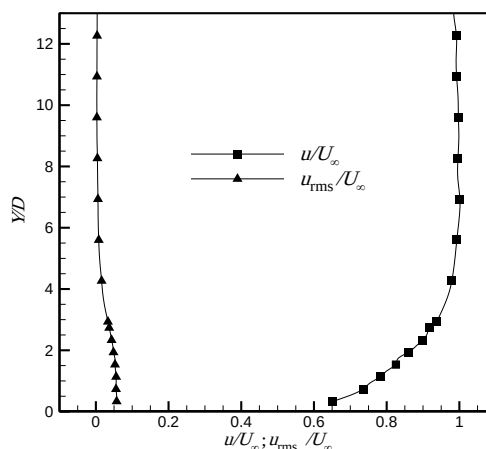


Fig. 2 Boundary layer profiles at the cylinder location at $U_{\infty} = 12 \text{ m/s}$

شکل 2 پروفیل‌های سرعت متوسط و نوسانی بدون بعد در لایه مرزی در محل نصب

مدل در $U_{\infty} = 12 \text{ m/s}$

¹ vented
² vibpoint Framework

ارائه می‌شود. سپس نتایج اندازه‌گیری‌های آکوستیکی صورت گرفته با میکروفون ارائه می‌شود تا ارتباط و همبستگی نتایج مذکور مشخص گردد.

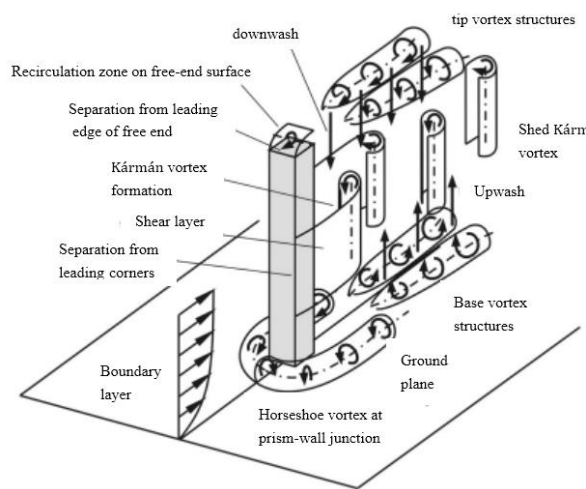
3-1- تحلیل آیرودینامیکی ناحیه دنباله

در این بخش آیرودینامیک جریان حول سیلندر مربعی متصل به کف بررسی می‌گردد. در ابتدای این بخش ساختار جریان حول سیلندر مربعی سه‌بعدی به صورت شماتیک ارائه شده است. در "شکل 4" ساختار جریان حول یک سیلندر مربعی مشابه سیلندر مورد بررسی در مطالعه حاضر نشان داده شده است.

در مطالعات قبلی از جمله مطالعات وانگ و ژو [16]، مک کلین و سامنر [8] و کاوای و همکاران [15] انواع گردابه‌های جدا شده از سیلندر مربعی سه بعدی به خوبی معرفی شدند ("شکل 4"). البته این الگو به جریان پشت سیلندره‌های سه بعدی با نسبت منطقی بیش از یک مقدار بحرانی مربوط می‌گردد که این مقدار بحرانی بسته به شرایط مختلف بین 3 تا 5 است.

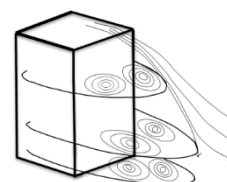


Fig. 3 Photograph showing the microphone mounted in the test section
شکل 3 تصویری از میکروفون نصب شده داخل اتاق آزمون



(الف)

(الف)



(ب)

(ب)

Fig.4 Flow structure around wall-mounted finite-length square cylinder: (a) different vortex structures[8]; (b) Sketch of the mean flow pattern [15]

شکل 4 ساختار جریان حول سیلندر مربعی با ارتفاع محدود: (الف) ساختارهای گردابه‌ای اطراف سیلندر [16]؛ (ب) نمای شماتیک الگوی متوسط جریان [15]

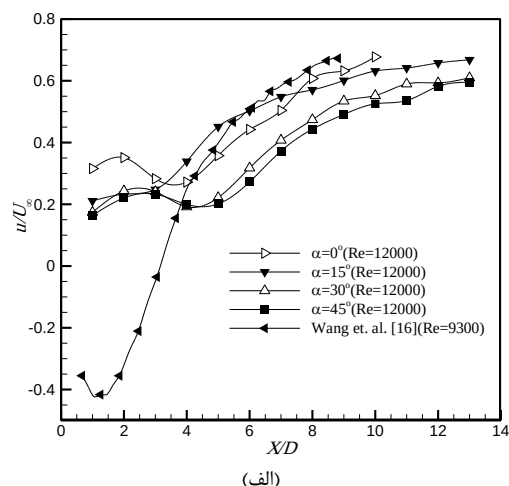
نسبت منطقی سیلندر مورد بررسی در تحقیق حاضر برابر 7 است که از مقدار بحرانی مذکور قطعاً بیشتر است. در این نسبت های منطقی، ریزش گردابه های عرضی کارمن در امتداد سیلندر، به جز در نزدیکی لبه آزاد سیلندر رخ می‌دهد، جایی که گردابه های نوک (در جهت جریان) حضور دارند. همچنین در نزدیکی محل اتصال سیلندر به کف نیز گردابه‌هایی موسوم به گردابه‌های پایه ایجاد می‌شوند.

بررسی آیرودینامیکی ناحیه دنباله برای بررسی آیرودینامیکی مهم است. زیرا ناحیه دنباله به عنوان ناحیه‌ای مهم یکی از منابع اصلی تولید نویز آیرودینامیکی است. از سوی دیگر همبستگی و ارتباط بین مشخصات آیرودینامیکی و آیرودینامیکی جریان وجود دارد و مطالعه آیرودینامیکی جریان مستقل از تفسیر آیرودینامیکی ساختار جریان تقریباً ناممکن است.

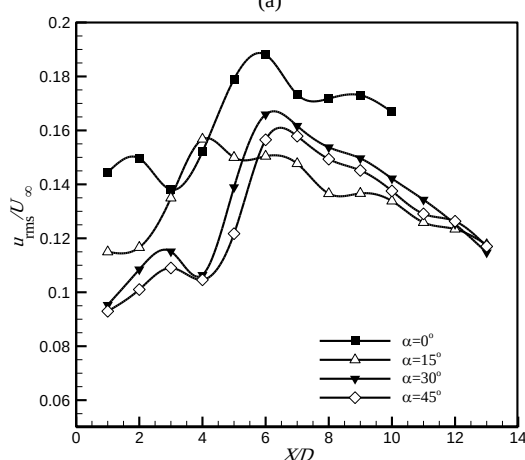
تمرکز اصلی مطالعه حاضر بر بررسی پدیده ریزش گردابه از سیلندر و ارتباط این پدیده با نویز منتشر شده از آن است. فرکانس ریزش گردابه با قله موجود در طیف نوسانات سرعت مشخص می‌شود. در همین راستا، ابتدا اثر محل قرارگیری سنسور جریان‌سنج سیم داغ بر فرکانس ریزش گردابه اندازه‌گیری شده بررسی شد. برای این کار سنسور در نقاط مختلف روی خط $X/D=5$ و $Y/D=3.5$ در راستای عرضی (مقادیر مختلف Z/D) قرار گرفت. در هر نقطه تغییرات مولفه در راستای جریان سرعت با زمان با فرکانس 1000 Hz ثبت شد. سپس روی هر سیگنال تحلیل طیفی صورت گرفت. نتیجه این کار در "شکل 5" نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به جز $Z/D=0$ در سایر نقاط یک قله در عدد استروهال تقریبی 0.11 در طیف دیده می‌شود که همان عدد استروهال مربوط به ریزش گردابه از سیلندر مربعی سه‌بعدی است. پیش‌تر در مطالعاتی مثل مطالعه وانگ و ژو [16] نیز عدد استروهال برای سیلندر مربعی سه‌بعدی در حدود 0.11 به دست آمده بود. کاملاً مشخص است که قله مشاهده شده برای سیگنال مربوط به نقاط $Z/D=\pm 2$ در مقایسه با قله‌های مشاهده شده در سیگنال به دست آمده برای سایر نقاط به مراتب واضح‌تر است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که با توجه به مطالعات قبلی از جمله مطالعه موحدی و همکاران [17] نقاط $Z/D=\pm 2$ داخل ناحیه دنباله و نزدیک لایه‌های برشی جدا شده از سیلندر هستند. ولی نقاط دیگر از لایه‌های برشی فاصله گرفته و به نظر می‌رسد بهترین نقطه برای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه نقطه‌ای در نزدیکی لایه‌های برشی جدا شده از سیلندر است.

به جهت بررسی اندازه ناحیه دنباله، آزمایش‌هایی انجام شد تا تخمین و تقریبی از اندازه ناحیه دنباله که در آیرودینامیک، اصطلاحاً ناحیه فعال آیرودینامیکی نیز نامیده می‌شود به دست آید. در "شکل 6" بازایی مقادیر ثابت و نوسانی مولفه در راستای جریان سرعت بررسی شده است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج مرجع [18] مقایسه شده است. توضیح این نکته لازم است که با توجه به ناتوانی جریان‌سنج سیم داغ در ثبت جریان برگشتی، نتایج مطالعه حاضر در زاویه حمله صفر درجه با نتایج مرجع [18] تا $X/D=4$ اختلاف دارد. ولی برای فواصل بیشتر، اختلاف نتایج کم‌تر می‌شود. روند کلی این گونه است که سرعت متوسط با فاصله گرفتن از سیلندر به مرور بیشتر شده و در حالت حدی به سرعت بالادست میل می‌کند. ولی تا محدوده بررسی‌های تجربی صورت گرفته در این مطالعه سرعت به سرعت جریان بالادست نمی‌رسد و لذا می‌توان نتیجه گرفت که روی محور دنباله در صفحه مذکور تا فواصل نسبتاً زیاد نیز جزء ناحیه فعال آیرودینامیکی به حساب می‌آید.

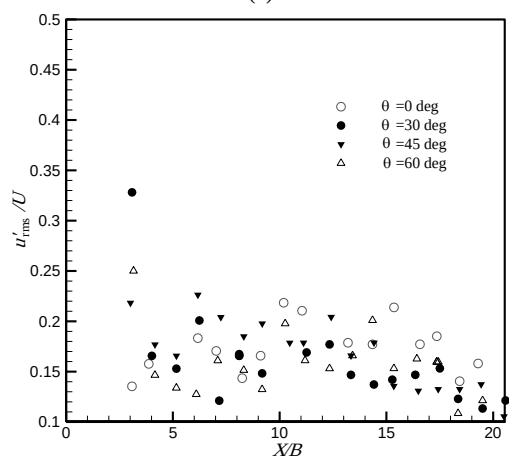
نرخ میل نمودن سرعت متوسط به مقدار سرعت جریان بالادست نیز به



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 6 centerline streamwise velocity measured at midspan of the cylinder: (a) Mean value; (b) rms value; (c) rms value for 2D square cylinder [19]

شکل 6 بازایی سرعت در راستای جریان روی محور مرکزی دنباله: (الف) مقدار

متوسط؛ (ب) مقدار rms؛ (ج) مقدار rms برای دنباله سیلندر مربعی دو بعدی [19]

3-2- تحلیل آبروآکوستیکی ناحیه دنباله

همان گونه که در مطالعات قبلی [20,12] به آن اشاره شده است، نویز آبرودینامیکی منتشر شده از اجسام جریان‌بند ماهیتی آهنگین¹ دارد. دلیل

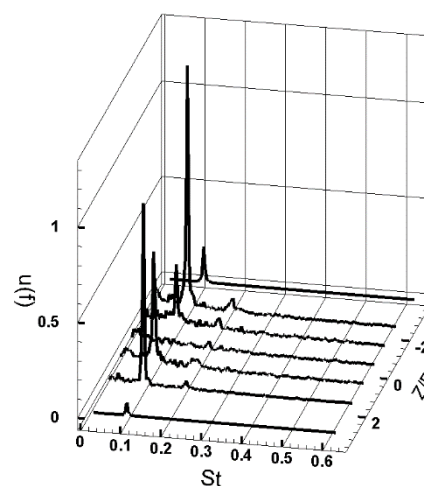


Fig. 5 The spectra of streamwise component of velocity at $U_{\infty} = 12$ (m/s)

شکل 5 طیف مولفه در راستای جریان برای $U_{\infty} = 12$ (m/s)

عدد رینولدز و زاویه حمله بستگی دارد. به نظر می‌رسد با افزایش زاویه حمله، نرخ بازایی سرعت متوسط نیز کندتر می‌شود. لازم به ذکر است که بازایی مولفه متوسط سرعت ارتباط تنگاتنگی با دینامیک ناحیه دنباله دارد. کاهش مومنتوم سیال پس از برخورد با سیلندر باعث وارد شدن نیروهای آبرودینامیکی به آن می‌شود باعث کاهش سرعت در ناحیه دنباله می‌شود. در فواصل نزدیک‌تر به سیلندر (مقادیر کوچک‌تر X/D) پدیده غالب انتقال انرژی جنبشی از مرکز دنباله به خارج از آن است و این موضوع باعث کاهش مقدار متوسط سرعت می‌شود [19]. با فاصله گرفتن از سیلندر سرعت در مرکز دنباله و نیز پهنای این ناحیه افزایش می‌یابد که نشان دهنده کشیده شدن جریان به سمت مرکز دنباله است. در مورد روند تغییرات نوسانات مولفه سرعت در راستای جریان نیز می‌توان گفت که روند تغییرات این پارامتر مشابه سرعت متوسط برای زوایای 30 و 45 درجه یکسان است. روند کلی در این مورد وجود روند نامنظم تا فاصله‌ای مشخص و سپس روند کاهشی تا فواصل دورتر است. بخشی از کاهش نوسانات سرعت به استهلاک ویسکوز انرژی جنبشی این نوسانات بر می‌گردد. چون مطالعه‌ای مشابه برای مقایسه نتایج در این بخش وجود نداشت، از نتایج مرجع [19] مربوط به سیلندر دو بعدی برای مقایسه استفاده شد ("شکل 6.c"). روند کلی نتایج مطالعه حاضر و مرجع [19] تا حدی مشابه است. تفاوت‌های موجود بین نتایج دو مطالعه برای زوایای حمله مختلف دلایل مختلفی دارد. از جمله این دلایل می‌توان به تغییر نقطه جدایش و تغییر قدرت گردابه‌های جدا شده اشاره کرد.

در "شکل 7" پهنای ناحیه دنباله روی خط $X/D=5$ برای زوایای حمله مختلف بررسی شده است. ملاحظه می‌شود که در ارتفاعی برابر با نصف ارتفاع سیلندر سرعت در محدوده عرضی مورد بررسی به سرعت بالادست نمی‌رسد. البته دلیل این موضوع قرار گرفتن ناحیه مورد بررسی در ناحیه دنباله و البته لایه مرزی تشکیل شده روی صفحه است. در "شکل 7" نیز تفاوت توزیع سرعت به دست آمده برای زاویه حمله بحرانی (15 درجه) با سایر زوایای حمله مشهود است. همچنین عدم تقارن در زوایای حمله 15 و 30 درجه نیز به چشم می‌آید. با توجه به شکل‌های 6 و 7 می‌توان گفت ناحیه دنباله یا ناحیه فعال آبرودینامیکی بخش گسترده‌ای از ناحیه پایین دست سیلندر را به خود اختصاص می‌دهد و لذا احتمالاً انتخاب نقطه‌ای در بالادست سیلندر به عنوان نقطه‌ای از ناحیه دور دست آکوستیکی مناسب‌تر است.

¹ tonal

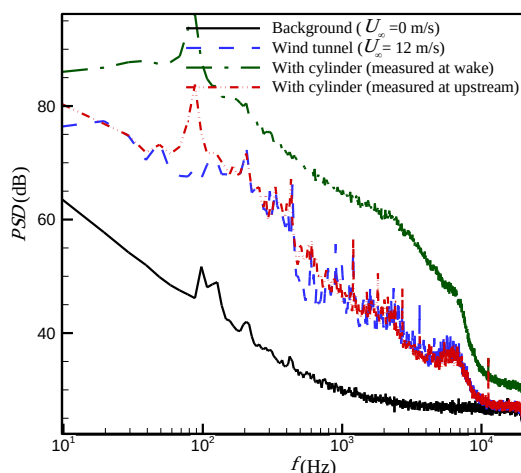


Fig. 8 Power Spectral Density (cylinder noise + tunnel noise) for velocity $U_{\infty}=12\text{ m/s}$

شکل 8 چگالی طیف توانی کل (نویز ناشی از حضور سیلندر+نویز پس زمینه تونل) برای سرعت بالادست 12 m/s

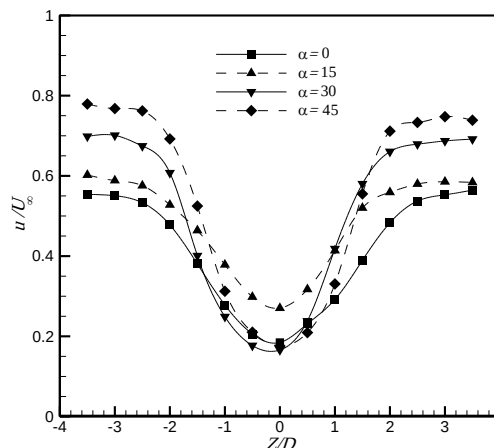


Fig. 7 variation of mean velocity in transverse direction for different angle of attacks measured at $X/D=5$; $Y/D=3.5$ for $U_{\infty}=12\text{ m/s}$

شکل 7 تغییرات مقدار متوسط سرعت در عرض ناحیه دنباله برای زوایای حمله مختلف در $X/D=5$ و $Y/D=3.5$ برای $U_{\infty}=12\text{ m/s}$

همان گونه که پیش‌تر اشاره شد، در این مطالعه، فرکانس ریزش گردابه با جریان‌سنج سیم داغ نیز اندازه‌گیری شد. این کار با هدف کمک به تحلیل قله‌های تیز مشاهده شده در سیگنال به دست آمده از اندازه‌گیری با میکروفون صورت گرفت. نمونه‌ای از طیف سیگنال‌های ثبت شده توسط جریان‌سنج سیم داغ و میکروفون پس از انجام تحلیل طیفی روی آنها در "شکل 9" نشان داده شده‌است.

به عنوان نمونه، در جدول 1 فرکانس ریزش گردابه مربوط به زاویه حمله صفر درجه به دست آمده از جریان‌سنج سیم داغ با فرکانس‌های وقوع قله در طیف فشار دور دست که به پدیده ریزش گردابه نسبت داده شده است مقایسه شده است. برای محاسبه عدد استروهل ارائه شده در این جدول، از سرعت بالادست و پهنای سطح مقطع سیلندر استفاده شده است. در آزمایش‌های مربوط به این بخش، کاوش‌گر سیم داغ در نقطه‌ای به مختصات $X/D=3$ ، $Y/D=3.5$ و $Z/D=2$ قرار گرفت. میکروفون نیز در آزمایش‌های انجام شده با آن، در نقطه $X/D=-3$ ، $Y/D=3.5$ و $Z/D=7$ واقع در بالادست سیلندر (خارج از ناحیه فعال آیرودینامیکی) قرار گرفت. مطابق نتایج ارائه شده، قله‌های مشاهده شده در طیف فشار دور دست، در عدد استروهل تقریبی 0.11 مشاهده شده‌اند. این نتایج با اختلافی کمتر از 5% مشابه نتایج به دست آمده از جریان‌سنج سیم داغ هستند. لذا می‌توان گفت نویز و صدای آیرودینامیکی تولید شده توسط سیلندر ارتباط مستقیمی با پدیده ریزش گردابه دارد که توسط کاوش‌گر سیم داغ واقع در دنباله سیلندر ثبت شده است. به عبارت دیگر، نوسانات مولفه در راستای جریان سرعت که در ناحیه دنباله سیلندر ثبت می‌شوند با نوسانات فشار دور دست که توسط میکروفون ثبت می‌شوند دارای نوعی همبستگی با یکدیگر هستند. مقدار عدد استروهل به دست آمده با نتایج مطالعه اسکوبار و همکاران [10] تطابق خوبی دارد. اساساً عدد استروهل به دست آمده برای سیلندر سه بعدی (با ارتفاع محدود) در مقایسه با عدد استروهل مربوط به سیلندر دو بعدی کم‌تر است [21,5].

دلیل این امر نیز جریان رو به پایین از انتهای آزاد سیلندر سه بعدی است که ریزش گردابه‌های عرضی را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. نکته مشهود دیگر این که با افزایش سرعت بالادست، ریزش گردابه و در نتیجه نویز باریک باند منتشر شده از سیلندر در فرکانس بالاتری رخ می‌دهند. البته همان گونه که از جدول 1 نیز مشخص است، عدد استروهل در محدوده

این امر نیز آن است که منبع اصلی انتشار نویز و صدا از این اجسام ریزش متناوب گردابه از آنهاست. "شکل 8" اثر حضور سیلندر در اتاق آزمون بر طیف فشار اندازه‌گیری شده در دور دست به کمک میکروفون را نشان می‌دهد. در این بخش از مطالعه، برای بررسی اثر قرارگیری سیلندر در اتاق آزمون یک بار در حالتی که تونل خاموش است، سیگنال فشار به منظور ثبت نویزهای محیطی ذخیره گردید. در ادامه، تونل به منظور ایجاد سرعت بالادست 12 m/s روشن گردیده و مجدداً سیگنال فشار در اتاق آزمون خالی ثبت و ذخیره گردید. سپس مدل داخل اتاق آزمون قرار گرفته و فرآیند قبلی هم در حالتی که میکروفون در بالادست مدل ($X/D=-3$ ، $Y/D=3.5$ و $Z/D=7$) و هم در حالتی که میکروفون در پایین دست مدل ($X/D=5$ ، $Y/D=3.5$ و $Z/D=3$) قرار دارد، تکرار گردید. "شکل 8" به خوبی اثر قرارگیری سیلندر در اتاق آزمون را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با قرارگیری مدل در اتاق آزمون یک قله تیز و باریک باند به سیگنال نویز پس‌زمینه تونل اضافه می‌شود که ناشی از نویز منتشر شده از سیلندر است.

این قله برای هر دو حالتی که میکروفون در بالادست مدل (کاملاً خارج از ناحیه فعال آیرودینامیکی) و پایین دست آن قرار دارد مشهود است. نکته جالب توجه این است که در حالتی که میکروفون در بالادست مدل قرار دارد و طبیعتاً نوسانات فشار حس شده توسط آن نمی‌تواند از تغییرات فشار ایجاد شده در ناحیه دنباله باشد، سیگنال فشار ثبت شده توسط میکروفون جز در فرکانس ریزش گردابه، تفاوت چندانی با سیگنال نویز پس‌زمینه ندارد. ولی با قرار گرفتن میکروفون در پایین دست و نزدیک بودن محل قرارگیری آن به ناحیه دنباله سطح کلی نویز بالاتر می‌رود. دلیل این امر نیز اثرگذاری نوسانات فشار جریان در ناحیه دنباله بر روی سیگنال میکروفون است که تا حدی توسط آن حس می‌شود. ولی در این سیگنال نیز قله مربوط به ریزش گردابه کاملاً مشهود است. در ادامه مطالعه، با تطبیق فرکانس به دست آمده از میکروفون با فرکانس ریزش گردابه به دست آمده از جریان‌سنج سیم داغ ارتباط قله مشاهده شده با ریزش گردابه تأیید گردید که به نتایج آن بخش نیز در ادامه اشاره خواهد شد. به عنوان نتیجه‌ای مهم از این بخش می‌توان به این نکته اشاره کرد که تونل باد آیرودینامیکی که اصلاحات آکوستیکی را دارا است؛ بدون آنکه نیاز به استفاده از تجهیزاتی همچون اتاق بدون پژواک باشد.

دست آمده در تمامی نقاط مورد بررسی، قله مربوط به فرکانس ریزش گردابه مشاهده گردید. ولی نکته جالب مربوط به سیگنال به دست آمده در نقطه $Z/D=0$ واقع بر محور ناحیه دنباله است. در این سیگنال دو قله مشاهده می‌شود که فرکانس رخداد یکی دقیقاً دو برابر دیگری است. شاید تفسیر مناسب برای این پدیده این باشد که وقتی میکروفون در مرکز ناحیه دنباله قرار می‌گیرد، عبور گردابه‌های جدا شده از هر دو سمت سیلندر را حس و ثبت می‌کند. در حالی که خارج از این نقطه، گردابه‌های جدا شده از یک سمت سیلندر را حس و ذخیره می‌نماید. ضمناً میزان نویز ثبت شده در تمامی نقاط مورد بررسی از نویز پس زمینه تونل بیشتر است. چرا که میکروفون در ناحیه دنباله سیلندر قرار گرفته و طبیعتاً در مقایسه با حالتی که اتاق آزمون تونل باد خالی است، سطح نویز بالاتری را ثبت می‌نماید.

در ادامه این مطالعه، اثر افزایش سرعت بالادست بر طیف فشار دوردست بررسی گردید. "شکل 11" طیف فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در بالادست سیلندر را برای سیلندر مربعی سه‌بعدی در سرعت‌های بالادست 5-15 m/s نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت بالادست، قله موجود در طیف به فرکانس بالاتر منتقل می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش سرعت بالادست قله مربوط به محتوای آهن‌گین سیگنال را به سمت فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌کند. دلیل این امر این است که با افزایش سرعت بالادست و در نتیجه افزایش مومنتوم جریان، گردابه‌های تشکیل شده با فرکانس بالاتری از سیلندر جدا می‌شوند و لذا قله مربوط به ریزش گردابه به فرکانس‌های بالاتر منتقل می‌شود. همچنین با افزایش سرعت بالادست، سطح نویز ثبت شده توسط میکروفون نیز بالاتر می‌رود. یعنی مطابق انتظار، افزایش سرعت بالادست صدای منتشر شده از سیلندر را افزایش می‌دهد. دلیل این موضوع نیز قوی‌تر شدن منابع نویز آیرودینامیکی با افزایش عدد رینولدز است. از جمله این منابع می‌توان به نوسانات فشار روی سطوح جامد و نیز آشفته‌گی جریان اشاره نمود. ضمناً با افزایش سرعت بالادست قله مشاهده شده در طیف، واضح‌تر شده و دامنه بزرگ‌تری دارد. این موضوع نشان دهنده قوی‌تر شدن پدیده ریزش گردابه است که مرتبط با ایجاد قله در طیف فشار دوردست است.

لازم به ذکر است در مطالعه موراو و دولان [22] نیز برای سیلندر مربعی سه‌بعدی با نسبت منظری کم‌تر از 8.7 نیز تنها یک قله در سیگنال فشار

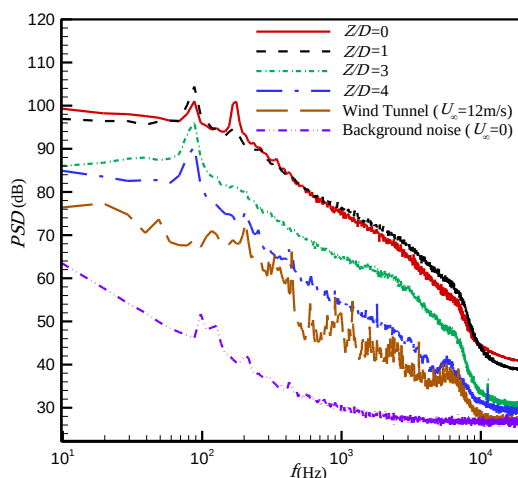
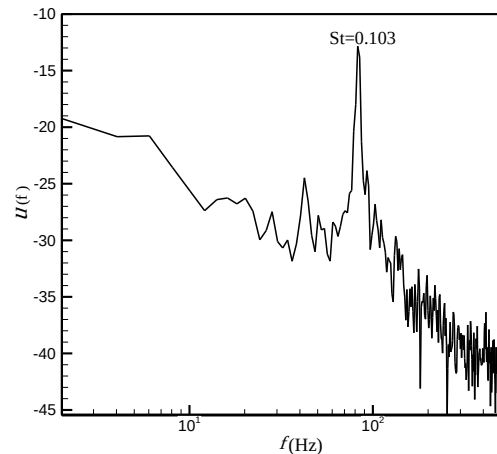
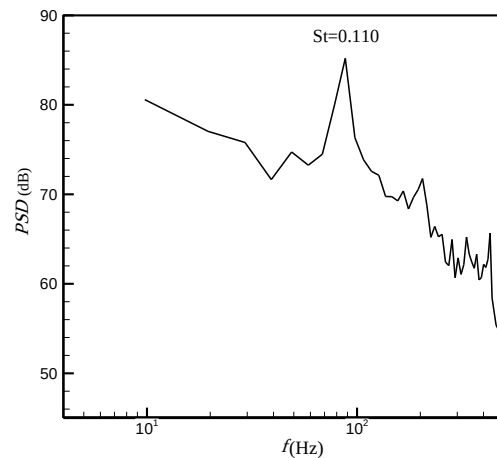


Fig. 10 Spanwise location dependency of pressure spectrum in the wake region ($X/D=5; Y/H=0.5; U_{\infty}=12\text{m/s}$)

شکل 10 وابستگی طیف فشار به مکان عرضی در ناحیه دنباله ($X/D=5; Y/H=0.5; U_{\infty}=12\text{m/s}$)



(الف)



(ب)

Fig. 9 a sample spectra for square cylinder: (a) Fluctuations of streamwise velocity component; (b) Fluctuations of far-field pressure

شکل 9 نمونه‌ای از تحلیل طیفی صورت گرفته برای جریان حول سیلندر مربعی:

(الف) نوسانات مولفه سرعت در جهت جریان؛ (ب) نوسانات فشار دوردست.

جدول 1 فرکانس وقوع قله در سیگنال‌های به دست آمده از جریان سنج سیم داغ و میکروفون در زاویه حمله صفر درجه

Table 1 Observed peak frequencies in the signal of Hotwire and microphone measurements ($\alpha = 0^\circ$)

اندازه گیری با جریان سنج		اندازه گیری با میکروفون		سرعت بالادست (m/s)
سیم داغ				
فرکانس	St	فرکانس	St	
(Hz)		(Hz)		
35.4	0.107	36	0.108	5
68.4	0.103	68.4	0.103	10
87.9	0.110	86	0.108	12
107.4	0.107	102	0.102	15

سرعت بالادست مورد بررسی تقریباً با عدد رینولدز تغییر نمی‌کند. دلیل این موضوع نیز ثابت بودن تقریبی نقاط جدایش جریان از سیلندر است. این موضوع باعث می‌شود پهنای ناحیه دنباله و عدد استروهال تقریباً ثابت بمانند. سوال مهم دیگر در این ارتباط، اثر محل قرارگیری میکروفون بر سیگنال ثبت شده توسط آن بود. برای پاسخ به این سوال، میکروفون در نقاط مختلف در ناحیه دنباله سیلندر قرار گرفت. این نقاط روی خط $X/D=5$ و $Y/D=3.5$ و برای مقادیر مختلف بین $Z/D=0$ (روی محور ناحیه دنباله) تا $Z/D=4$ انتخاب شدند. نتیجه این کار در "شکل 10" نشان داده شده است. تقریباً در طیف به

دوردست ثبت شده بود. قله مذکور در عدد استروهاال تقریبی 0.11 رخ داده است. نمونه‌ای از نتایج این مطالعه نیز برای مقایسه در "شکل 11" ارائه شده است. در مرجع [22] با افزایش نسبت منطری سیلندر مربعی در محدوده 8.7 تا 13.6 دو قله در سیگنال فشار دوردست ثبت شده بود.

یکی از پارامترهای مهم در مطالعات آکوستیکی سطح (تراز) فشار صوتی^۱ است. سطح فشار صوتی کلی^۲ برحسب دسی‌بل (dB) چنین به دست می‌آید:

$$OSPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P'_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

در رابطه (1)، P'_{rms} مجذور متوسط مربعات نوسانات فشار است. ضمناً P_{ref} فشار مرجع بوده و برای هوا برابر با 2×10^{-5} Pa و برای سایر سیالات 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود [23]. جدول 2 مقدار پارامتر سطح فشار صوتی کلی را برای سرعت‌های بالادست مختلف نشان می‌دهد. این پارامتر برای سیگنال‌هایی به دست آمده است که میکروفون برای ثبت آنها در نقطه‌ای در بالادست سیلندر یعنی خارج از ناحیه فعال آیرودینامیکی ($Z/D=7$ و $Y/D=3.5$, $X/D=-3$) قرار گرفته بود. مشخص است که با افزایش سرعت جریان برخوردی به مدل، میزان نویز منتشر شده از آن نیز افزایش می‌یابد.

در بخش نهایی این مطالعه نیز اثر زاویه حمله سیلندر مربعی سه بعدی بر فرکانس ریزش گردابه از آن و طیف فشار دوردست بررسی گردید. برای این کار فرکانس ریزش گردابه هم با جریان سنج سیم داغ و هم با میکروفون اندازه‌گیری شد. نتیجه این کار در "شکل 12" نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برای همه زوایای حمله تیز یک قله در طیف فشار دوردست مشاهده می‌شود که نمایانگر پدیده ریزش گردابه است. طبیعتاً با تغییر زاویه حمله، ریزش گردابه با فرکانسی متفاوت رخ داده و لذا فرکانس رخداد قله در طیف‌ها نیز عوض می‌شود. در مورد هندسه مورد بررسی که در تونل باد با اتاق آزمون بسته مورد بررسی قرار گرفته است می‌توان گفت که تغییر زاویه حمله تاثیر چندانی بر سطح کلی نویز آیرودینامیکی منتشر شده از آن ندارد. می‌توان گفت صرف نظر از تفاوت جزئی موجود در فرکانس‌های پایین، تنها تفاوت واضح در سیگنال‌های مختلف ثبت شده به جابجایی قله مربوط به ریزش گردابه است و محتوای سیگنال‌های ثبت شده برای زوایای حمله مختلف در بازه گسترده‌ای از فرکانس‌ها تقریباً یکسان است. لذا می‌توان گفت سطح کلی صدای منتشر شده از جسم تقریباً با زاویه حمله تغییر نمی‌کند.

در ادامه، نتایج به دست آمده برای عدد استروهاال محاسبه شده با استفاده از پهنای سطح مقطع سیلندر (D) و پهنای تصویر شده (D') ارائه و با نتایج موجود در مرجع [8] مقایسه می‌شوند. در برخی موارد، برای محاسبه کمیت‌هایی مثل ضرایب برآ و پسا و عدد استروهاال از پهنای تصویر شده جسم که با رابطه $D' = D(\cos(\alpha) + \sin(\alpha))$ داده می‌شود استفاده می‌شود. از "شکل 13" مشاهده می‌شود که نتایج در هماهنگی با مطالعات قبلی یک مقدار بیشینه برای عدد استروهاال در زاویه 15 درجه به دست داده‌اند. البته مقدار دقیق زاویه بحرانی بسته به شرایط جریان و ... می‌تواند قدری از 15 درجه بیشتر یا کمتر باشد. مقدار کمینه عدد استروهاال نیز برای زاویه حمله 45 درجه به دست آمد که بیشترین پهنای دنباله را دارد. ولی با استفاده از پهنای تصویر شده عدد استروهاال به دست آمده (St_{DP}) از زاویه 15 درجه تا 45 درجه به یک مقدار ثابت میل می‌کند. لازم به ذکر است که در مقایسه با سیلندر مربعی دو بعدی، سیلندر سه بعدی دارای عدد استروهاال کمتری در همه زوایای حمله است (علائم تو خالی در شکل های 13c,d).

¹ Sound pressure level

² Overall Sound Pressure Level

برای واضح تر شدن روند تغییرات فرکانس ریزش گردابه، در "شکل 14" تغییرات فرکانس ریزش گردابه به شکل بدون بعد نشده با زاویه حمله نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده از میکروفون و جریان‌سنج سیم داغ تا حد زیادی یکسان هستند. مهم‌ترین علت تفاوت نتایج در دقت متفاوت دو تجهیز مورد اشاره است. ولی هر دو تجهیز نهایتاً با کم‌تر از 7٪ اختلاف نتایج یکسانی را به دست داده‌اند. همان گونه که از "شکل 14" مشخص است، برای تمامی سرعت‌های جریان بالادست، با افزایش زاویه حمله از صفر درجه به 15 درجه، فرکانس ریزش گردابه به سمت یک مقدار بیشینه میل می‌کند. سپس با افزایش بیشتر زاویه حمله، فرکانس ریزش گردابه تا مقداری کمتر از مقدار مربوط به زاویه صفر درجه می‌رسد. افزایش فرکانس ریزش گردابه (عدد استروهاال) با زاویه حمله، مربوط به بازنشست جریان روی یکی از وجوه کناری سیلندر می‌باشد. این موضوع باعث کاهش پهنای ناحیه ویک و در نتیجه افزایش فرکانس ریزش گردابه می‌شود.

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. همه اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی پژوهشگران در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت اندازه‌گیری نامیده می‌شود. نتیجه یک اندازه‌گیری، تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه گردد.

به عنوان مثال، عدم قطعیت سرعت لحظه‌ای به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آنها عبارتند از: عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما، فشار محیط و رطوبت، عدم قطعیت جریان‌سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و ...) و کالیبراسیون، عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری کاوش‌گر و غیره. در این تحقیق عدم قطعیت‌هایی که در بالا به آنها اشاره گردید مطابق با روند مطرح شده در مراجع [25,24]، با یکدیگر ترکیب شده تا عدم قطعیت کلی به دست آید. مقدار بیشینه عدم قطعیت سرعت متوسط در حدود 5٪ و سرعت نوسانی در حدود 9٪ به دست آمد. از طرف دیگر محاسبه عدم قطعیت کمیت‌هایی مثل چگالی طیفی نوسانات فشار میکروفون‌ها نیز پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. این عدم قطعیت‌ها عمدتاً ناشی از عدم قطعیت همگرایی آماری بوده و با توجه به روابط مورد اشاره در مرجع [26] عدم قطعیت همگرایی آماری چگالی طیفی نوسانات فشار برابر با حدود 4٪ به دست آمد.

4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مطالعه حاضر، مشخصات آبروآکوستیکی جریان حول یک سیلندر مربعی متصل به کف با ارتفاع محدود بررسی گردید. آزمایش‌ها در یک تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده آکوستیکی انجام گرفتند. نتایج کار نشان داد تونل باد مذکور می‌تواند برای برخی مطالعات آبروآکوستیکی مناسب باشد. همچنین مشخص شد در طیف فشار دوردست برای جریان حول سیلندر مورد بررسی، یک قله در فرکانسی برابر با فرکانس ریزش گردابه (اندازه‌گیری شده با جریان‌سنج سیم داغ) به چشم می‌خورد. این بدان معناست که عامل مهم در انتشار صدا از چنین هندسه‌هایی پدیده ریزش گردابه است. فرکانس

جدول 2 مقدار سطح فشار صوتی کلی (OSPL) برای سرعت‌های بالادست مختلف
Table 2 OSPL value for different upstream flow velocities

OSPL (dB)	U_{∞} (m/s)
84.20	5
99.93	10
104.64	12
110.95	15

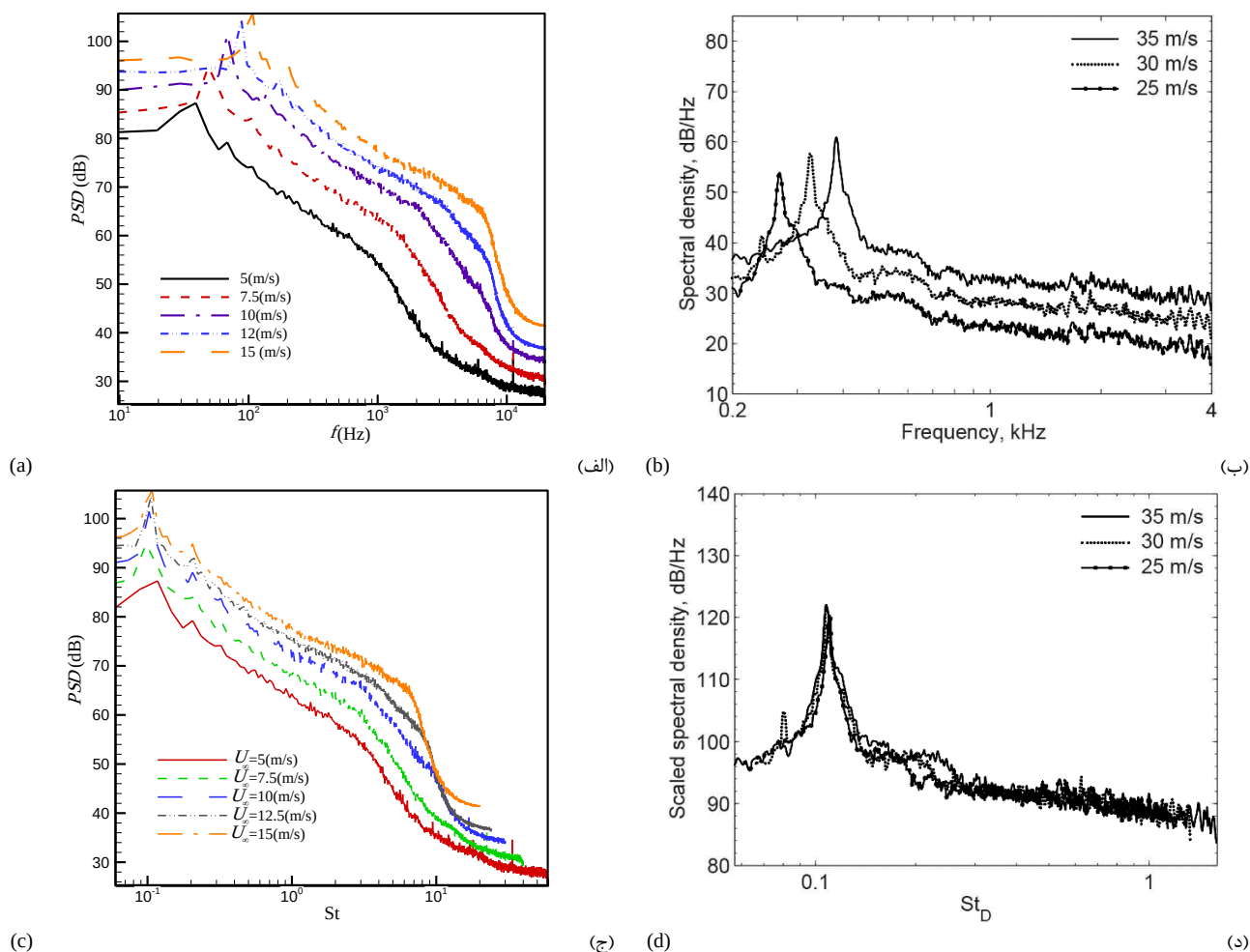


Fig. 11 Far-field acoustic spectra for the square cylinder at different velocities: (a,c) present study; (b,d) results from ref [22].

شکل 11 طیف فشار دور دست برای سیلندر مربعی به ازای سرعت های بالادست مختلف: (الف و ج) نتایج مطالعه حاضر؛ (ب و د) نتایج مرجع [22]

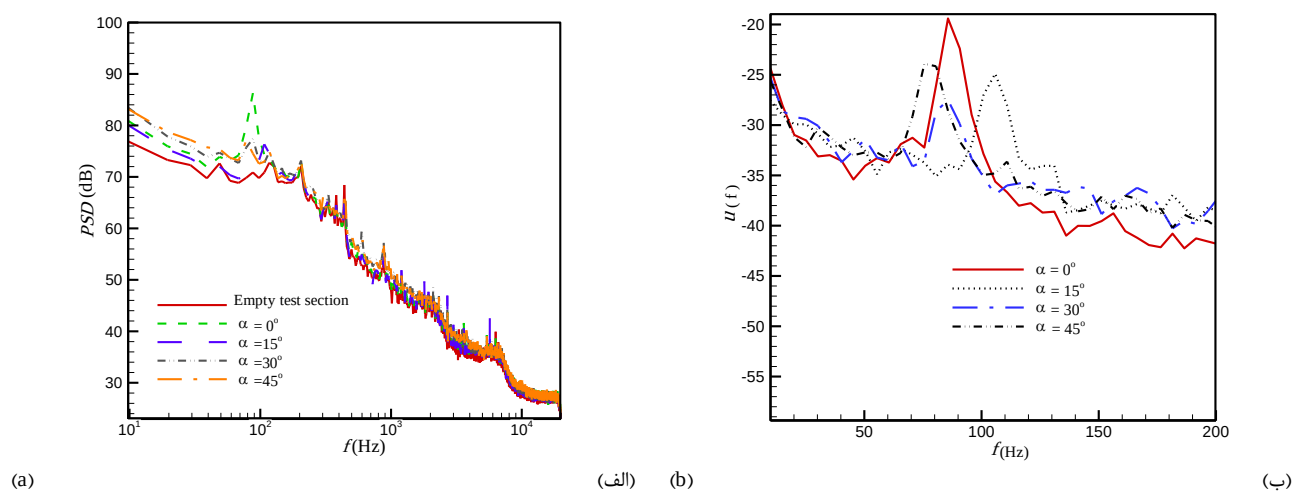


Fig. 12 (a) pressure and (b) streamwise velocity spectra for different angle of attacks ($X/D=5; Y/H=0.5; U_{\infty}=12\text{m/s}$)

شکل 12 (الف) طیف فشار دور دست (ب) طیف سرعت برای زوایای حمله مختلف ($X/D=5; Y/H=0.5; U_{\infty}=12\text{m/s}$)

ریزش گردابه در سرعت های مختلف مربوط به زاویه حمله 15 درجه به دست آمد. لذا می توان گفت یکی از مکانیزم های مهم انتشار صدا از سیلندر سه بعدی پدیده ریزش گردابه از آن است. همچنین مشخص گردید سطح فشار صوتی با افزایش سرعت جریان سطح نویز آیرودینامیکی منتشر شده

به دست آمده برای پدیده ریزش گردابه از میکروفون و جریان سنج سیم داغ تقریباً یکسان بود. عدد استروهال به دست آمده برای هر دو تجهیز برای جریان حول سیلندر با زاویه حمله صفر درجه تقریباً برابر با 0.11 به دست آمد که با مطالعات قبلی سازگاری داشت. ضمناً بیشترین فرکانس

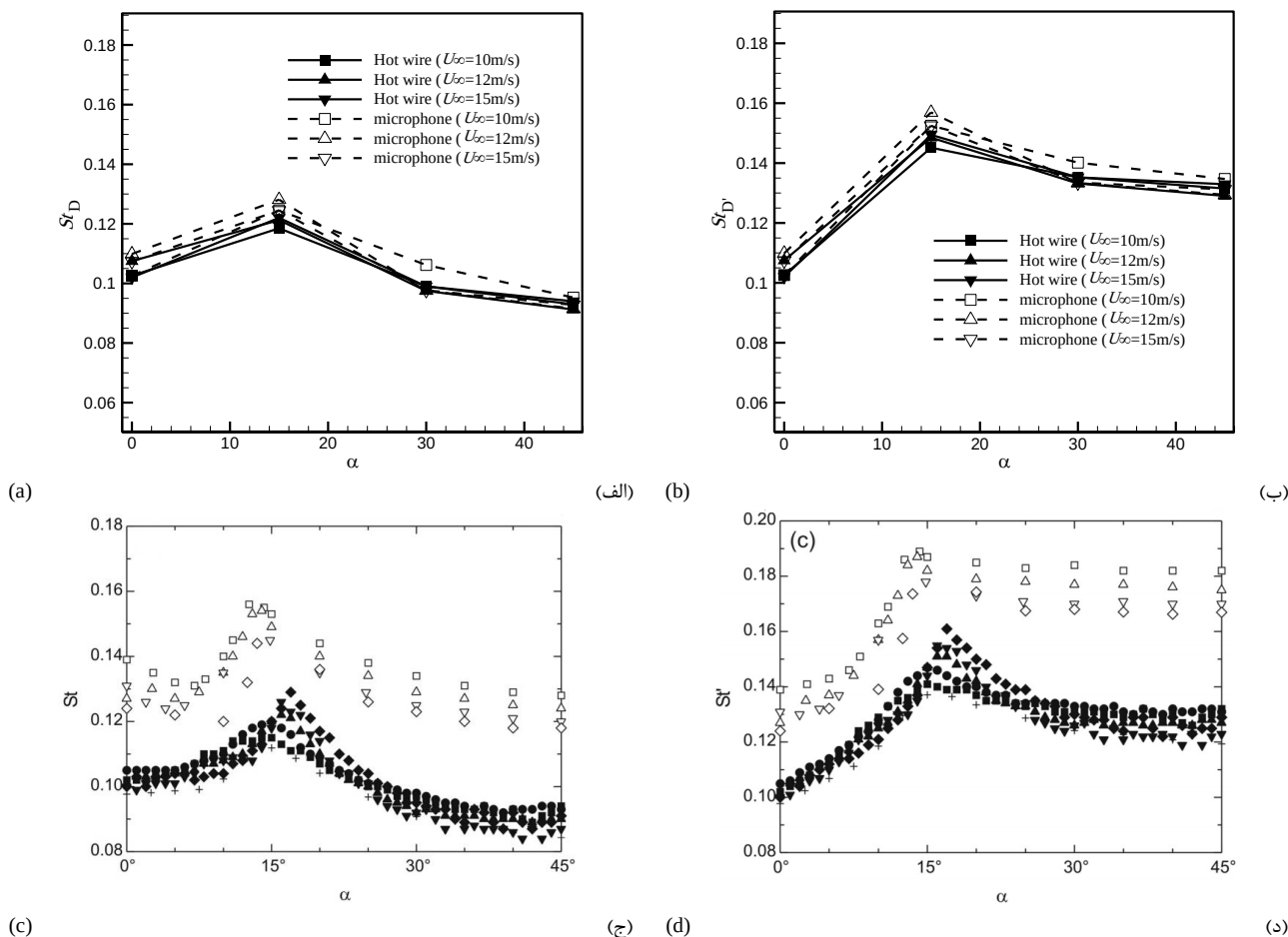


Fig. 13 Strouhal number for 3D square cylinder as a function of incidence angle: (a) based on side length; (b) based on projected width; (c) based on side length [8]; (d) based on projected width [8]

شکل 13 عدد استروهل برای سیلندر مربعی سه بعدی: (الف) محاسبه شده بر اساس پهنای سیلندر؛ (ب) بر اساس پهنای تصویر شده؛ (ج) بر اساس پهنای سیلندر [8]؛ (د) بر اساس پهنای تصویر شده [8]

5- فهرست علائم

طول ضلع سطح مقطع سیلندر (m)	D
پهنای تصویر شده سیلندر (m)	D'
فرکانس ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$)	f
ارتفاع مدل (m)	H
سطح فشار صوتی کلی (dB)	OSPL
چگالی طیفی توانی (dB)	PSD
عدد رینولدز	Re
عدد استروهل	St
سرعت (ms^{-1})	u
مولفه طولی مکان (در راستای جریان) (m)	X
مولفه ارتفاعی مکان (در راستای ارتفاع مدل) (m)	Y
مولفه عرضی مکان (در راستای عمود بر جریان) (m)	Z

علائم یونانی

زاویه حمله	α
ضخامت لایه مرزی (m)	δ

زیرنویسها

بالادست	∞
مجدور متوسط مربعات	rms

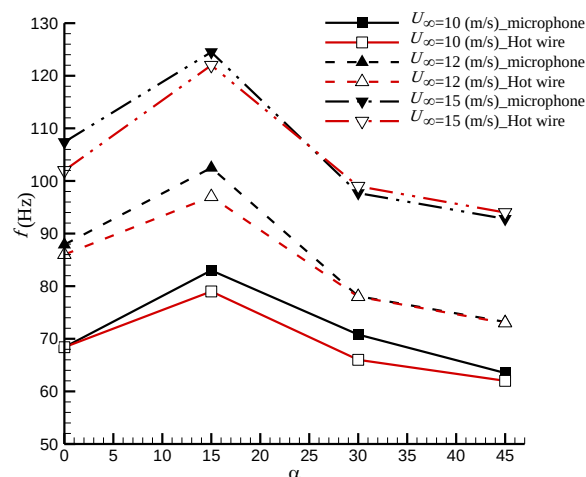


Fig. 14 Variation of vortex shedding frequency with angle of attack

شکل 14 تغییرات فرکانس ریزش گردابه با زاویه حمله

از سیلندر افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، زاویه حمله در مقایسه با سرعت بالادست اثر کمتری بر سطح کلی نویز منتشر شده دارد. زاویه حمله بیشتر بر فرکانس قله مشاهده شده و اندازه دامنه طیف فشار و سرعت در این قله اثرگذار است.

6- مراجع

- flows around cylinders of different cross-section, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 328, No. 3, pp. 318-337, 2009.
- [13] D. J. Moreau, C. J. Doolan, The flow-induced sound of a wall-mounted finite length cylinder with circular and square cross-section, *AIAA Paper*, Berlin, Germany, May 27-29, 2013.
- [14] P. F. Mish, *An Experimental Investigation of Unsteady Surface Pressure on Single and Multiple Airfoils*, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [15] H. Wang, Y. Zhou, The finite-length square cylinder near wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 638, No. 1, pp. 453-490, 2009.
- [16] H. Kawai, Y. Okuda, M. Ohashi, Three dimensional structures of flow behind a square prism, *Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Taipei, Taiwan, November 8-12, 2009.
- [17] A. Movahedi, A. Sohankar, M. D. Manshadi, Experimental investigation of turbulent flow around 3D square cylinder with wall effect, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 65-77, 2013. (in Persian فارسی)
- [18] H. F. Wang, Y. Zhou, C. K. Chan, W. O. Wong, K. S. Lam, Flow structure around a finite-length square prism, *15 th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Sydney, Australia, December 13-17, 2004.
- [19] S. Dutta, K. Muralidhar, P. Panigrahi, Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties, *Experiments in fluids*, Vol. 34, No. 1, pp. 16-23, 2003.
- [20] R. Porteous, D. J. Moreau, C. J. Doolan, A review of flow-induced noise from finite wall-mounted cylinders, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 51, , No. 1, pp. 240-254, 2014.
- [21] H. Fujita, W. Sha, H. Furutani, H. Suzuki, Experimental investigations and prediction of aerodynamic sound generated from square cylinders, *4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Toulouse, France, pp. 942-947, 1998.
- [22] D. Moreau, C. J. Doolan, The flow-induced sound of a wall-mounted finite length cylinder with circular and square cross-section, *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Berlin, Germany, May 27-29, 2013.
- [23] S. W. Rienstra, A. Hirschberg, *An Introduction to Acoustics*, Eindhoven University of Technology, Accessed on 30 June 2013; <https://www.win.tue.nl/sjoerdr/papers/boek.pdf>.
- [24] F. Jorgenson, *How to measure turbulence with hot wire anemometers - a practical guide*, Dantec Dynamics, 2004.
- [25] S. Yavuzkurt, A guide to uncertainty analysis of hot-wire data, ASME, Transactions, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.
- [26] J. Bendat, A. Piersol, *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, Fourth Edition, pp. 261-265, John Wiley & Sons, 2010.
- [1] H. Emdad, A. Mostofizadeh, S. A. Mousavinia, Optimal control of vortex shedding around square cylinder via reduced order model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 49-62, 2012.
- [2] A. Sohankar, M. Khodadadi, E. Rangraz, Control of fluid flow and heat transfer around a square cylinder by uniform suction and blowing at low Reynolds numbers, *Computers & Fluids*, Vol. 109, No. 1, pp. 155-167, 2015.
- [3] M. Mohamadrezai, A. A. Dehghan, A. Movahedi, Comparison of different methods of numerical simulation of flow and sound around a square cylinder at various incidence angles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 147-158, 2017. (in Persian فارسی)
- [4] C. Cheong, P. Joseph, Y. Park, S. Lee, Computation of aeolian tone from a circular cylinder using source models, *Applied Acoustics*, Vol. 69, No. 2, pp. 110-126, 2008.
- [5] J. Dorneanu, A. Mueller, P. Rambaud, E. Weide, A. Hirschberg, Tonal and silent wake modes of a square rod at incidence, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 102, No. 3, pp. 419-422, 2016.
- [6] R. Octavianty, M. Asai, Experiments on sound radiation in flow past two side-by-side square cylinders, *Proceedings of the 5th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2015)*, Stockholm, Sweden, June16-18, 2016.
- [7] H. F. Wang, Y. Zhou, The finite-length square cylinder near wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 638, No. 1, pp. 453-490, 2009.
- [8] J. McClean, D. Sumner, An experimental investigation of aspect ratio and incidence angle effects for the flow around surface-mounted finite-height square prisms, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136, No. 8, pp. 081206, 2014.
- [9] S. Fathi, A. A. Dehghan, A. Movahedi, Experimental investigation of flow around 3D square cylinder using five-hole probe and neural network, *AmirKabir Journal of Science & Research Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-160, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] M. Escobar, I. Ali, C. Hahn, M. Kaltenbacher, S. Becker, Numerical and experimental investigation on flow induced noise from a square cylinder, *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA, Manchester, United Kingdom, May 10-12, 2004.
- [11] S. Becker, M. Kaltenbacher, I. Ali, M. Escobar, C. Hahn, Sound generation by flow around simple geometries: Simulation and experiment, *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*, Massachusetts, Amherst, May 8-10, 2006.
- [12] W. King, E. Pfizenmaier, An experimental study of sound generated by