



بررسی تجربی اثر آشفتگی جریان ورودی بر میدان فشار ناپایا و نویز جریان پیرامون استوانه دایره‌ای

رضا مریمی، علی اکبردهقان*، عباس افشاری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۲۷

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۰۶

کلمات کلیدی:

نوسانات فشار سطح
شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته
نویز باریک باند
فرکانس ریزش گردابه

خلاصه: میدان فشار ناپایا روی سطح استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای، به عنوان منشأ اصلی نویز ثبت شده در دوردست، دارای رفتار فیزیکی پیچیده‌ای بوده که تاکنون مطالعات مختصری روی آن و مخصوصاً در جریان آزاد آشفته انجام گرفته است. بنابراین در مطالعه حاضر نوسانات فشار ناپایا روی سطح استوانه‌ای با قطر خارجی ۲۲ mm تحت شرایط جریان آزاد آرام و آشفته به طور تجربی بررسی شده است. تغییر شرایط آشفتگی جریان آزاد با استفاده از شبکه‌هایی با مش‌های مربعی مختلف انجام شده است. به منظور فهم دقیق رفتار نویز جریان پیرامون مدل، پارامترهایی نظیر طیف فشار سطح، تابع همدوسی، همبستگی خودکار و متقابل، طول مشخصه ساختارهای گردابه‌ای در دهانه مدل و همچنین سرعت جابه‌جایی این ساختارها در راستای جریان با استفاده از نوسانات فشار سطح محاسبه شده است. نتایج نشان دادند که تغییر ماهیت جریان آزاد از آرام به آشفته سبب افزایش سطح انرژی نویز باریک باند و پهن باند می‌شود. علاوه بر این فرکانس نویز باریک باند در جریان آزاد آشفته ($f^* = 88\text{Hz}$) در مقایسه با مقدار متناظر در جریان آزاد آرام ($f^* = 98\text{Hz}$) به سمت فرکانس‌های پایین جابجا می‌گردد. دیگر نتایج نشان دادند که اندازه گردابه‌ها و سرعت جابه‌جایی این ساختارها در جریان آزاد آرام بزرگ‌تر از جریان آزاد آشفته است.

۱- مقدمه

در طی چند دهه گذشته مطالعه جریان پیرامون اجسام جریان بند^۱ موضوع بسیاری از تحقیقات در حوزه آیرودینامیک و همچنین آیروآکوستیک بوده است. این جریان پیرامون بسیاری از سازه‌ها نظیر روتور توربین‌های بادی، کابل‌ها، برج‌ها، پل‌ها، دودکش‌ها، برج‌های تقطیر، ساختمان‌های مرتفع و همچنین ارابه‌های فرود هواپیما مشاهده می‌شود. بنابراین فهم فیزیک چنین جریانی می‌تواند در طراحی بهینه سازه‌های مورد نظر از اهمیت قابل توجهی برخوردار باشد. یکی از پدیده‌های پیچیده که در جریان پیرامون اجسام جریان بند ایجاد می‌شود، ریزش گردابه است. گردابه‌ها پدیده‌های نامطلوبی هستند که سبب ارتعاش سازه‌ها، ایجاد صدای آیرودینامیکی، افزایش نیروی پسا و همچنین تنش در سازه‌ها می‌شوند.

صدای آیرودینامیکی تولید شده از یک جسم جریان بند که در معرض جریان قرار گرفته، موضع بسیار جالبی است که در حوزه

1 Bluff body

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: adehghan@yazd.ac.ir

تحقیقات مهندسی باد بسیار مورد توجه محققین بوده است. گرچه مکانیزم‌های اصلی این صدا بر طبق تئوری‌های کلاسیک به خوبی شناخته شده، ولی هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری برای بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف روی مشخصات نویز در این حوزه احساس می‌شود. دلیل اصلی این است که نمونه‌های واقعی سازه‌های اشاره شده در بالا مجموعه بزرگی از قطعات جریان بند هستند که از اندازه، شکل و هم ترازهای متفاوتی برخوردارند و هر کدام با توجه به شرایط جریان می‌توانند رفتار متفاوتی از خود به نمایش بگذارند و ساختار نویز منتشر شده را بسیار پیچیده سازند. با توجه به این که تعداد قطعات با ساختار هندسی استوانه‌ای شکل و خصوصاً استوانه‌های با مقطع دایره‌ای در بین اجزاء تشکیل دهنده سازه‌های مورد نظر بیشتر است، می‌توان به جای مطالعه نمونه‌های واقعی از این سازه‌ها، مطالعه خود را معطوف به مدل‌های استوانه‌ای کرد. چنین کاری ضمن رفع پیچیدگی‌های موجود در مطالعه نمونه‌های واقعی و همچنین کاهش هزینه و زمان، می‌تواند در فهم هر چه بهتر مکانیزم‌های تولید صدای



آیرویدینامیکی مؤثر باشد.

صدای آیرویدینامیکی ایجاد شده از جریان پیرامون یک استوانه با مقطع دایره‌ای ترکیبی از صدای باریک باند^۱ متناظر با فرکانس ریزش گردابه و همچنین صدای پهن باند^۲ است. اولین اندازه‌گیری‌ها در این حوزه توسط استروهل [۱] گزارش شد. او عنوان کرد که فرکانس صدای باریک باند به طور تقریبی برحسب عدد استروهل قابل پیش‌بینی است. نتیجه‌گیری کلی استروهل توسط ریلی [۲] در سال ۱۸۷۹ تأیید شد. مشاهده ریزش گردابه در ناحیه دنباله یک استوانه توسط برنارد [۳] و بررسی پایداری چنین ریزشی به طور تئوری توسط ون کارمن [۴] سبب شد تا محققینی نظیر ون کروگر و لاوس [۵]، بون [۶] و ریلی [۷] صدای باریک باند منتشر شده از استوانه در جریان هوا را ناشی از ریزش گردابه بدانند. فرضیه ریلی توسط رالف [۸] در تحقیق دیگری مورد بررسی قرار گرفت و عنوان شد که عدد استروهل وابسته به عدد رینولدز است. ریچاردسون [۹] نیز یکی دیگر از اولین محققین در این حوزه بود. او عنوان کرد که حداقل عدد رینولدز برای ریزش پرپودیک گردابه‌ها ۳۳ است.

مطالعات انجام شده در زمینه انتشار صدای آیرویدینامیکی از استوانه‌های دایره‌ای بیشتر معطوف به جریان آزاد آرام بوده است. این در حالی است که در بسیاری از کاربردها استوانه‌های دایره‌ای در معرض جریان آزاد آشفته قرار دارند. بنابراین به طور بسیار محدود بعضی از محققین نظیر دیویس و پن [۱۰] صدای منتشر شده از یک استوانه در جت آشفته را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها نشان دادند که صدای دوردست تابعی از فاصله بین خروجی جت و موقعیت قرارگیری استوانه است. هوتچسون و بروکس [۱۱] صدای منتشر شده از استوانه‌ها را در جریان آزاد آرام و آشفته مقایسه نمودند. نتایج طیف صوت در این تحقیق نشان دادند که ماهیت طیف بیشتر به صورت پهن باند است و بیشینه قابل توجهی در این طیف وجود ندارد. علاوه بر این با افزایش سطح آشفتگی، پهن باند بودن طیف نیز افزایش می‌یابد.

شدت صدای باریک باند از یک استوانه وابسته به بزرگی نوسانات نیروی برآ یا نوسانات فشار سطحی روی سطح استوانه و طول همبستگی^۳ پیشنهاد شده توسط فیلیپس [۱۲] است. در این

1 Aeolian tone
2 Broadband tone
3 Correlation length

راستا بلک [۱۳] عنوان می‌کند که چگالی نوسانات در میدان جریان منبع اصلی صدای آیرویدینامیکی است. با فرض اعداد ماخ کوچک، چگالی نوسانات با نوسانات فشار جایگزین می‌شود. بنابراین نوسانات فشار در میدان جریان مهمترین کمیت فیزیکی برای شناسایی منابع صوت آیرویدینامیکی است. بر طبق آنالوژی آکوستیکی کرل [۱۴] صدای دوردست منتشر شده از یک جسم می‌تواند متناسب با انتگرال سطحی نوسانات فشار روی جسم باشد. بنابراین اندازه‌گیری نوسانات فشار سطح برای فهم مکانیزم تولید صدای آیرویدینامیکی حائز اهمیت است. در واقع می‌توان به جای اندازه‌گیری میدان صدای ناشی از جریان در دوردست، که نیازمند تجهیزات مدرن آکوستیکی به ویژه تونل‌های باد آیروآکوستیکی است، به مطالعه رفتار منبع نویز یعنی نوسانات فشار سطح در یک تونل باد آیرویدینامیکی با نویز نسبتاً پایین پرداخت [۱۵]. در نهایت با داشتن نوسانات فشار سطح، نویز دوردست با استفاده از مدل‌هایی همچون مدل فاکس ویلیام و هال [۱۶] قابل تخمین است.

بررسی نوسانات فشار ناپایا روی سطح استوانه‌های دایره‌ای در سال‌های اخیر ابزار بسیاری از محققین بوده است. البته بیشتر تحقیقات در این حوزه مشابه نویز دوردست مربوط به جریان آزاد آرام بوده و مطالعات کمتری در جریان آزاد آشفته صورت پذیرفته است. در این راستا فوجیتا و سوزوکی [۱۷] اثر نوسانات فشار سطحی در اعداد رینولدز بزرگ ($2 \times 10^6 - 5 \times 10^5$) را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با تغییر عدد رینولدز از 3×10^5 تا $7/5 \times 10^5$ ، عدد استروهل صدای باریک باند دارای افزایش ناگهانی از $0/2$ تا $0/45$ است و این عدد برای اعداد رینولدز بزرگتر دوباره به مقدار $0/2$ می‌رسد. کاسالینو و ژاکوب [۱۸] با بررسی نوسانات فشار سطحی در جریان آرام نشان دادند که بیشینه استروهل و هارمونیک دوم تحت تأثیر نیروی برآی ناپایا و اولین هارمونیک تحت تأثیر نیروی پسای ناپایا است. مریمی و همکاران [۱۹] در یک مطالعه جامع به ارزیابی میدان فشار ناپایا پیرامون مدل دایره‌ای در جریان آزاد آرام پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ساختارهای گردابه‌ای بزرگ از طول عمر و همچنین سطح انرژی بیشتری در مقایسه با ساختارهای گردابه‌ای کوچک برخوردار می‌باشند. مطالعات در این حوزه با دیگر تحقیقات تجربی انجام شده توسط فوجیتا [۲۰]، لکرسکیو و دولان [۲۱]، آکرمن و همکاران [۲۲] و اوگاما و همکاران [۲۳] و تحقیقات

آزمون $46 \text{ cm} \times 46 \text{ cm}$ و طول آن 240 cm می باشد. ماکزیمم سرعت تونل 25 m/s است و در این سرعت شدت اغتشاشات جریان آزاد کمتر از 3% است. فن تونل از نوع گریز از مرکز است و تیغه‌های آن دارای شیبی رو به جلو بوده که نویز فرکانس پهن باند پایین تا متوسطی را ایجاد می‌کنند. با این وجود به علت آلوده شدن سیگنال‌های فشار سطحی با نویز زمینه تونل، با جایگزین کردن دیواره‌های داخلی تونل با مواد متخلخل مناسب، نویز زمینه تونل تا 15 dB کاهش یافته است. همچنین به منظور کاهش اثرات نامطلوب نویز زمینه تونل، تمامی آزمایشات در دهانه خروجی تونل گرفته است. آزمایشات اولیه نشان داده که به دلیل فاصله بیشتر از فن تونل و همچنین عدم وجود دیواره‌های بالا و پایین، نویز زمینه تونل در این بخش کمتر است.

۲-۲- مدل

در مطالعه پیش رو به منظور بررسی اثر آشفتگی جریان بالادست بر نوسانات فشار ناپایای سطح از یک مدل استوانه‌ای با قطر خارجی $D = 22 \text{ mm}$ و طول $L = 500 \text{ mm}$ از جنس استیل با سطح کاملاً صیقلی استفاده شده است. مدل مورد نظر از سه بخش ساخته شده است که شامل بخش میانی و دو بخش در طرفین می‌باشد. علت این امر سهولت در نصب میکروفون‌ها داخل بخش میانی مدل است. نسبت انسداد تونل برای مدل استوانه‌ای برای تمامی آزمایش‌ها کمتر از 5% بوده و بنابراین اثرات دیواره‌های تونل روی مقادیر اندازه‌گیری شده ناچیز است [۲۷]. نمایی از محل قرار گیری مدل در دهانه خروجی تونل در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- نحوه نصب میکروفون‌ها داخل مدل

اندازه‌گیری مستقیم نوسانات فشار داخل جریان پیرامون مدل امکان پذیر نیست. دلیل این امر تغییر میدان جریان به واسطه حضور سنسورهای فشار در جریان است. بنابراین اندازه‌گیری نوسانات فشار تنها روی سطح واقع در زیر لایه مرزی امکان پذیر است. برای تعیین میدان فشار ناپایای سطح، روش‌های تجربی مختلفی از جمله نصب مستقیم سنسور فشار روی سطح، نصب غشاء روی سطح و استفاده از لیزر، استفاده از رنگ حساس به فشار و غیره وجود دارد. متداول‌ترین راه اندازه‌گیری نوسانات فشار سطحی، استفاده از

عددی انجام شده توسط دولان [۲۴]، علی و همکاران [۲۵]، ارسلی و همکاران [۲۶] ادامه یافت.

همانطور که قبلاً ذکر شد، تعداد بسیار کمی از تحقیقات به بررسی صدای آیرودینامیکی منتشر شده از استوانه‌های دایره‌ای در جریان آزاد آشفته پرداخته‌اند. در تمامی این مطالعات روش مرسوم برای شناسایی منابع صدای آیرودینامیکی، اندازه‌گیری نویز دوردست بوده و تقریباً در هیچ مطالعه‌ای در این حوزه از اندازه‌گیری نوسانات فشار سطحی استفاده نشده است. به منظور رفع این نیاز در مطالعه حاضر نوسانات فشار ناپایای روی سطح استوانه‌ای دایره‌ای در جریان آزاد آشفته مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای حاصله از اندازه‌گیری نوسانات فشار سطحی، شامل چگالی طیف فشار سطح^۱، تابع همدوسی^۲ عرضی، طول مشخصه در راستای دهانه مدل^۳ و همچنین سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای^۴ مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با موارد اندازه‌گیری شده در جریان آزاد آرام مقایسه شده است. لازم به ذکر است که ایجاد مکانیزم اندازه‌گیری نوسانات فشار ناپایای روی سطح استوانه که شامل طراحی و ساخت منبع تغذیه، طراحی و ساخت کالیبراتور میکروفون‌ها، حذف نویزهای الکترونیکی، تطابق دادن میکروفون‌ها با سیستم تحلیل و پردازش سیگنال موجود، نوشتن کدهای کالیبراسیون و داده‌برداری و آنالیز داده‌ها است، با همکاری گروه آیرودینامیک دانشگاه بریستول انگلیس انجام گرفته است. معرفی تجهیزات و نحوه انجام آزمایشات در بخش ۲ و نتایج به دست آمده در بخش ۳ ارائه شده است.

۲- تجهیزات آزمایش

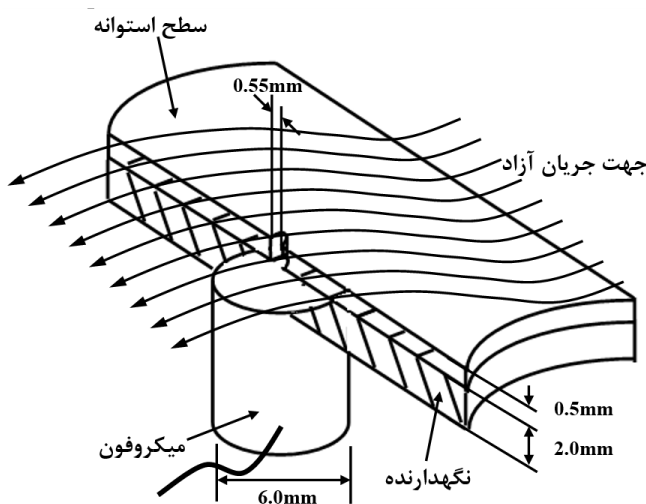
در مطالعه حاضر کلیه آزمایش‌ها در تونل باد مادون صوت دانشگاه یزد انجام شده است. در این بخش، مشخصات تونل باد، مدل، نحوه نصب و آرایش میکروفون‌ها، کالیبراسیون میکروفون‌ها، آرایش سوراخ‌های سنجش فشار استاتیکی شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته، مراحل انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها ارائه شده است.

۲-۱- تونل باد

تونل باد دانشگاه یزد از نوع مدار باز است که ابعاد سطح مقطع

- 1 Power spectral density
- 2 Coherence function
- 3 Spanwise length scale
- 4 Eddy convection velocity

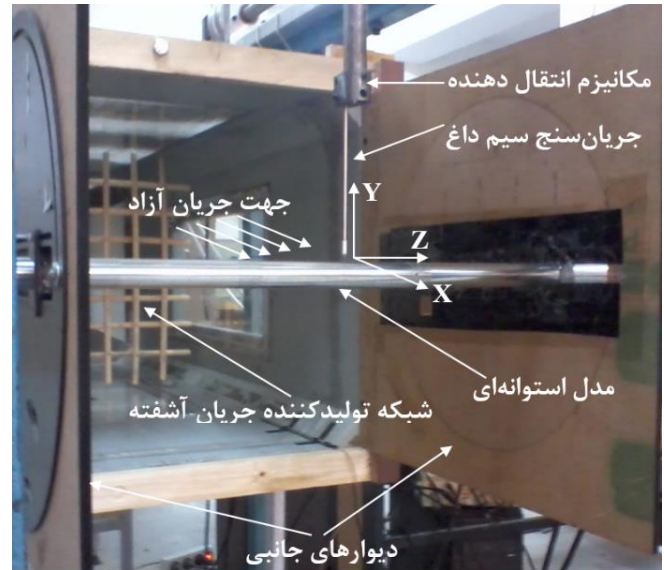
اندازه‌گیری نوسانات فشار ناپایای سطح از میکروفون‌های کوچک $Pa - WM - 61A$ استفاده شده است. در مرجع [۱۹ و ۲۸] کارایی عالی میکروفون‌های انتخاب شده برای اندازه‌گیری نوسانات فشار ناپایای سطح به اثبات رسیده است. این میکروفون‌ها از پاسخ فرکانسی بسیار خوبی برخوردارند و علی‌رغم ابعاد کوچک خود استقامت بسیار زیادی در برابر ضربات احتمالی دارند. به منظور کاهش اثرات تضعیف در فرکانس‌های بالا که ناشی از اندازه ناحیه حسگر میکروفون است، به جای نصب مستقیم میکروفون‌ها روی سطح مدل، آن‌ها در زیر یک نقاب با سوراخ ریز^۳ به قطر 0.55 mm نصب شده‌اند. طرحواره‌ای از این روش نصب در شکل ۲ نشان داده شده است. توجه به این نکته ضروری است که گرچه اثرات تضعیف در فرکانس‌های بالا با نصب میکروفون‌ها در زیر نقاب سوراخ‌دار و یا استفاده از لوله انتقال کاهش می‌یابد، اما در عین حال ممکن است این کار منجر به رخ دادن پدیده نامطلوب تشدید^۴ در محدوده فرکانسی مورد مطالعه شود.



شکل ۲: نمایی از میکروفون مورد استفاده و نحوه نصب میکروفون‌ها به صورت عمودی زیر نقاب

Fig. 2. Pressure transducer used in this experiment and its schematic installation under pin-hole mask.

به طور کلی قطر سوراخ، طول آن و حجم فضای مابین ناحیه حسگر میکروفون و نقاب، پارامترهای تعیین‌کننده فرکانس تشدید هستند. بنابراین برای اطمینان از عدم وقوع تشدید در محدوده فرکانسی مورد نظر، باید پارامترهای فوق به دقت انتخاب گردند. طراحی و انتخاب پارامترهای مذکور با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [۱۵] انجام گرفته است. پاسخ فرکانسی (دامنه و فاز) مربوط



شکل ۱. نصب مدل استوانه‌ای در جت خروجی تونل باد به همراه دستگاه مختصات، نمایش شبکه مربعی

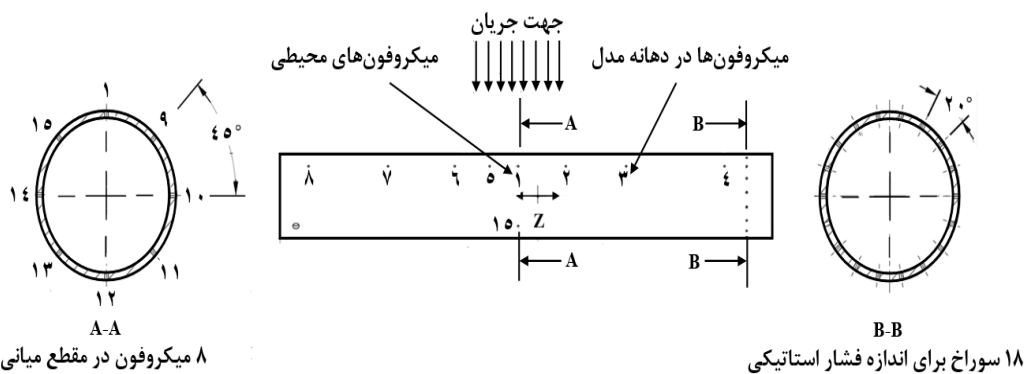
Fig. 1. Cylindrical model installed in wind tunnel jet with coordinate system and bi-plane grid.

سنسورهایی است که به صورت همسطح با مدل نصب شده‌اند. البته این کار با مشکلات زیادی همراه است. به عنوان نمونه، سنسورهای فشار دارای سایز محدودی بوده و در فرکانس‌های بالا با اثر تضعیف^۱ مواجه می‌شوند. از دیگر مشکلات موجود، تأثیر نوسانات ناشی از سایر منابع همچون نويز زمينه تونل باد و حتی ارتعاشات خارجی خود سنسور روی نوسانات فشار ناشی از جریان آشفته است. در واقع هنگام اندازه‌گیری نوسانات فشار سطح یک مدل در تونل باد، آنچه یک سنسور اندازه‌گیری فشار ناپایا ثبت می‌کند، نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال روی مدل به اضافه نوسانات فشار ایجاد شده توسط خود تونل باد است. با این وجود، در اغلب موارد به دلیل بالا بودن سطح نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال روی سطح مدل نسبت به نويز زمينه تونل باد، امکان اندازه‌گیری نوسانات فشار سطح حتی در تونل‌های باد آیرودینامیکی نیز وجود دارد. علاوه بر موارد فوق، هزینه بالای سنسورهای فشار ناپایای دارای دقت بالا و محدوده فرکانسی وسیع (مانند سنسور فشار کولایت^۲) استفاده از این روش را محدود می‌کند. این در حالی است که فشارسنج‌های تفاضلی دارای فرکانس داده برداری پایینی بوده و معمولاً برای اندازه‌گیری نوسانات ناپایای فشار سطح مناسب نیستند.

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، در مطالعه حاضر برای

3 Pin-hole mask
4 Resonant frequency

1 Attenuation effects
2 Kulite



شکل ۳: آرایش میکروفون‌ها در دهانه طول مدل و در راستای محیطی در مقطع میانی مدل به همراه توزیع سوراخ‌ها فشار استاتیکی
 Fig. 3. Pressure transducer array along spanwise and peripheral directions at middle section with static pressure taps.

طرف دیگر این فاصله نباید به اندازه‌ای کوچک باشد که تخمین طول مشخصه ساختارهای گردابه‌ای در راستای دهانه مدل (l_z) را با خطا همراه سازد. در مراجع [۲۸ و ۲۹]، مناسب‌ترین فاصله برای چینش میکروفون‌ها در راستای دهانه مدل $5D-7D$ مشخص شده است. بنابراین با توجه به این معیار و همچنین محدودیت فضا در داخل مدل جهت دسترسی به بخش میانی آن و نصب میکروفون در این قسمت، حداکثر فاصله میکروفون‌ها در راستای دهانه مدل $6D$ در نظر گرفته شد.

۲-۵- آرایش سوراخ‌های فشار استاتیکی

در این تحقیق قبل از هر گونه مطالعه آکوستیکی روی مدل مورد نظر، برخی از پارامترهای آیرودینامیکی نظیر فشار استاتیکی پیرامون مدل و همچنین تغییرات سرعت در ناحیه دنباله مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به دست آمده با داده‌های موجود در این حوزه مقایسه شده است. دلیل انجام چنین کاری اطمینان از نوع جریان برقرار شده روی مدل، صحت عملکرد مدل در تونل و همچنین صحت عملکرد دستگاه‌های اندازه‌گیری است. در همین راستا برای اندازه‌گیری فشار استاتیکی روی مدل استوانه‌ای ۱۸ سوراخ با قطر 0.6 mm و با فواصل

به نصب میکروفون زیر نقاب سوراخ دار در مرجع [۱۹] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج این مرجع، انتخاب مناسب پارامترهای مذکور منجر به عدم وقوع پدیده تشدید تا فرکانس kHz ۲۰ شده است.

۲-۴- آرایش میکروفون‌ها روی مدل

آرایش میکروفون‌ها در قسمت میانی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین موقعیت آن‌ها در این قسمت از مدل در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به شکل، در مجموع ۱۵ میکروفون استفاده شده که ۸ میکروفون در راستای دهانه مدل و ۷ میکروفون با فواصل زاویه‌ای 45° نسبت به یکدیگر در وسط بخش میانی مدل در جهت محیطی قرار گرفته‌اند.

همانطور که در شکل ۳ مشهود است، میکروفون شماره ۱ بین آرایش میکروفون‌ها در راستای دهانه مدل و آرایش آن‌ها در مقطع میانی مشترک است. به منظور انتخاب فاصله کلی میکروفون‌های نصب شده در جهت دهانه مدل، دقت زیادی صورت گرفته است. این فاصله از طرفی باید تا حد امکان کوچک باشد تا تحت تأثیر لایه مرزی ایجاد شده روی دیواره‌های جانبی تونل قرار نگیرد. و از

جدول ۱: موقعیت سوراخ‌های فشار روی سطح مدل

Table 1. Position of pressure pinholes on the surface of model.

θ (deg)	z/D	شماره میکروفون (M)	θ (deg)	z/D	شماره میکروفون (M)
۴۵	۰	۹	۹۰	۰/۰۰	۱
۰	۰	۱۰	۹۰	۰/۶۸۲	۲
-۴۵	۰	۱۱	۹۰	۱/۵۴۵	۳
-۹۰	۰	۱۲	۹۰	۲/۹۵۵	۴
-۱۳۵	۰	۱۳	۹۰	-۰/۴۱	۵
۱۸۰	۰	۱۴	۹۰	-۰/۹۱	۶
۱۳۵	۰	۱۵	۹۰	-۱/۸۶۴	۷
---	---	---	۹۰	-۳/۰۰	۸

دینامیکی با استفاده از لوله پیتوت و فرآیند تست موج مربعی کالیبره شده و همه نتایج با توجه به فرکانس قطع ۱۵ kHz از فیلتر پایین گذر عبور داده شده است. کلیه داده‌ها با فرکانس داده برداری ۰ kHz در مدت ۱۰ s ذخیره شده است. برای جابه‌جایی پراب از یک مکانیزم انتقال‌دهنده با دقت ۰/۰۱ mm در سه جهت X، Y و Z استفاده شده است. نمایی از مکانیزم انتقال‌دهنده، جریان سنج سیم داغ در دهانه خروجی تونل باد به همراه دستگاه مختصات استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۷- شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته

در این تحقیق به منظور ایجاد جریان آشفته در بالادست مدل از سه شبکه با مش‌های مربعی در اندازه‌های متفاوت استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. استفاده از این شبکه‌ها به خاطر ویژگی‌هایی نظیر سهولت در فرآیند ساخت، هزینه کم و مهمتر از همه ایجاد جریان آشفته همگن و ایزوتروپیک در پایین‌دست شبکه است [۳۱]. کورسین [۳۲] عنوان می‌کند که برای اطمینان از ایجاد جریان آشفته همگن در پایین‌دست شبکه باید $H \gg M$ باشد که M اندازه مش و H ارتفاع مقطع تونل است. از طرفی دیگر در مرجع [۳۳] گزارش شد که شرط لازم برای برقراری جریان آشفته همگن و ایزوتروپیک $M/H < 0/1$ است. با توجه به چنین معیاری اندازه مش‌ها در تحقیق حاضر ۴۰، ۵۶/۴ و ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

مقطع میله‌های تشکیل‌دهنده شبکه‌ها می‌تواند مربعی یا دایره‌ای باشد که در تحقیق پیش رو شبکه‌ها از میله‌های دایره‌ای ساخته شده‌اند. دلیل این امر این است که شبکه‌های با میله‌های دایره‌ای ساختارهای گردابه‌ای منظم‌تری را در مقایسه با شبکه‌های ساخته شده از میله‌های مربعی ایجاد می‌کنند [۳۴]. طبق مرجع [۳۵] قطر میله‌های دایره‌ای (d) باید به گونه‌ای انتخاب شود که نسبت $M/d \approx 5$ را رعایت کند. بنابراین در مطالعه حاضر میله‌هایی با قطرهای ۹، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر برای ساخت شبکه‌ها استفاده شده است. یکی دیگر از معیارهای اصلی که در تأمین جریان آشفته همگن و ایزوتروپیک در پایین‌دست شبکه مؤثر است، نسبت انسداد شبکه^۱ است که به صورت $\sigma = d/M(2-d/M)$ تعریف می‌شود و باید

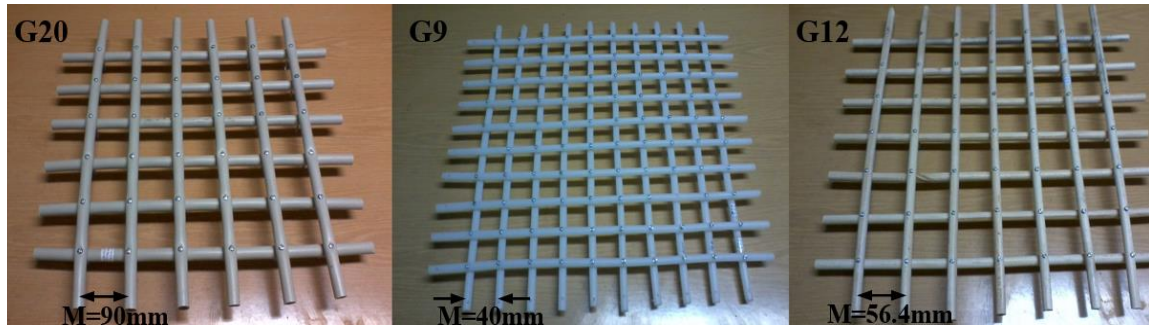
زاویه‌ای ۲۰ درجه‌ای در مقطعی از قسمت میانی مدل که نسبت به مقطع وسط آن ۷۲ mm فاصله دارد، تعبیه شده است (شکل ۳ مقطع B-B).

۲-۶- کالیبراسیون میکروفون‌ها

قبل از انجام آزمایشات باید طی فرآیند کالیبراسیون ضریب حساسیت میکروفون‌ها اندازه‌گیری شود. در حالت ایده‌آل بهتر است فرآیند کالیبراسیون در یک اتاق بدون پژواک انجام گیرد. با این حال در مطالعات مختلف از موج صفحه‌ای ایجاد شده در لوله برای این منظور استفاده شده است [۱۹ و ۳۰]. در مطالعه حاضر برای ایجاد نویز سفید صفحه‌ای در محدوده فرکانس ۲۰۰۰-۱۰۰ هرتز و به دست آوردن تابع انتقال از یک کالیبراتور با طراحی خاص استفاده شده است. کالیبراتور شامل یک اسپیکر کیفیت بالا است که از طریق یک مخروط به لوله‌ای استیل با طول ۱۱۰ mm و قطر ۱۰ mm متصل شده است. در مطالعه حاضر از یک میکروفون کندانسوری بسیار دقیق یک چهارم اینچ مدل G.R.A.S ۴۰ BP به عنوان میکروفون مرجع استفاده شده است. میکروفون‌های یاد شده با استفاده از یک منبع تغذیه ۱۶ کاناله که خاص این نوع میکروفون می‌باشد (در طی مطالعه پیش رو طراحی و ساخته شده است) راه اندازی شده و داده برداری با استفاده از یک سیستم پردازش سیگنال ۱۶ کاناله مدل NI PCI-۶۰۲۳E انجام گرفته است. فرکانس داده برداری برابر با ۴۰ kHz بوده و در مجموع تعداد ۸۰۰ هزار داده در مدت زمان ۲۰ ثانیه ذخیره شده است. پروسه کامل فرآیند کالیبراسیون و نحوه به دست آوردن تابع انتقال در مرجع [۱۵] ارائه شده است.

برای بررسی توزیع فشار استاتیکی پیرامون مدل مورد نظر از دستگاه مبدل فشار ۱۶ کاناله استفاده شده است. این دستگاه مجهز به سنسورهای فشار Honey well با بازه فشاری بین ۱۲۵۰ Pa تا ۱۲۵۰ Pa است. خروجی این سنسورها صفر تا ۵ ولت بوده که متناسب با فشار خروجی به صورت خطی تغییر می‌کند. جهت اندازه‌گیری تغییرات سرعت در ناحیه دنباله و مشخص کردن ابعاد این ناحیه از جریان‌سنج سیم داغ یک بعدی با مدار دما ثابت (ساخت شرکت فرانسجش صبا) استفاده شده است. سنسور این جریان‌سنج، سیمی از جنس تنگستن به ضخامت ۵ μm و طول ۱/۲۵ mm است. قبل از استفاده از جریان‌سنج، پراب آن به صورت دقیق از نظر استاتیکی و

1 Grid solidity ratio



شکل ۴: شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته با مش‌های مربعی
Fig. 4. Bi-plane turbulence-generating grids.

پارامترهای آیروداستیکی است. در حقیقت سعی می‌شود با تغییر شبکه‌ها در شدت آشفتگی ثابت ($Tu = 3/2\%$)، مدل یک بار در محلی در پایین دست شبکه قرار گیرد که طول مشخصه در آن نقطه $A_x = 0.72D$ بوده و بار دیگر در محلی قرار گیرد که طول مشخصه برابر $A_x = 0.91D$ با قطر مدل باشد. علاوه بر این با تغییر شبکه‌ها سعی شده تا در طول مشخصه اغتشاشی ثابت $A_x = 1/D$ مدل یک بار در محلی متناظر با شدت آشفتگی $3/2\%$ و بار دیگر در محلی با شدت آشفتگی 5% قرار گیرد. برای مشخص کردن مکان‌های ذکر شده در بالا، با حرکت نقطه به نقطه (۳۶ نقطه) جریان سنج سیم داغ در پایین دست هر شبکه و در غیاب مدل، توزیع شدت آشفتگی و همچنین طول مشخصه جریان اندازه‌گیری شده است.

طول مشخصه از دو روش به دست آمده و نتایج این پارامتر با یکدیگر مقایسه شده است. روش اول انطباق داده‌ها طیف سرعت بر طیف ون کارمن است. طیف ون کارمن طیفی تئوری است که با فرض جریان آشفته ایزوتروپیک به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸].

$$\frac{\phi_{uu}^{VK}(f)U_\infty}{u'^2 A_x} = 4 \left(1 + \left(\frac{8\pi f A_x}{3U_\infty} \right)^2 \right)^{-5/6} \quad (1)$$

در اینجا $\phi_{uu}^{VK}(f)$ طیف تئوری ون کارمن است. شکل ۵ مقایسه‌ای از طیف سرعت اندازه‌گیری شده در موقعیت $x/D = 4/5$ در پایین دست شبکه G9 را با طیف ون کارمن $\phi_{uu}^{VK}(f)$ نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است با در نظر گرفتن $A_x = 15/2 \text{ mm}$ دو طیف منطبق بر یکدیگرند به طوری که کاهش هر دو طیف با شیب $5/3$ - از فرکانس یکسانی شروع می‌شود که این نشان از وجود جریان آشفته ایزوتروپیک است.

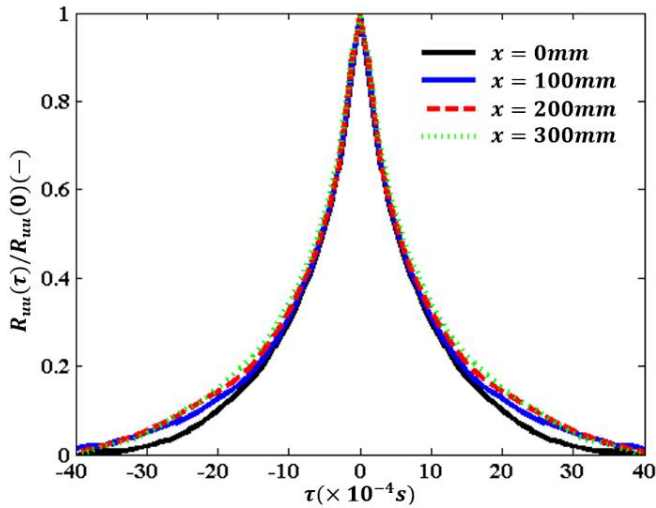
محدود به بازه $0.3 \leq \sigma \leq 0.4$ باشد [۳۶]. این معیار با انتخاب دقیق M و d در طراحی شبکه‌ها مد نظر قرار گرفته است. مشخصات کامل شبکه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات فیزیکی شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته
Table 2. Geometrical properties of turbulence grid

شبکه	σ	M/d	$M(\text{mm})$	$d(\text{mm})$
G9	0.40	4.44	40	9
G12	0.38	4.70	56.4	12
G20	0.39	4.50	90	20

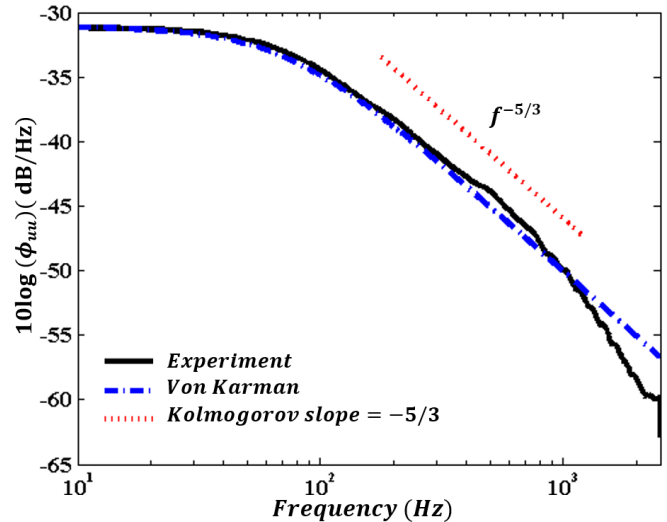
میدان جریان پایین دست شبکه‌های تولید کننده جریان آشفته به سه ناحیه تقسیم بندی می‌شود [۳۷]. اولین ناحیه که دقیقاً مجاور شبکه قرار می‌گیرد، ناحیه در حال توسعه است. در این ناحیه دنباله‌های هر یک از میله‌های شبکه با یکدیگر تلفیق شده و جریان غیر همگن و غیر ایزوتروپیک است. بنابراین در این ناحیه تولید انرژی جنبشی خواهیم داشت. دومین ناحیه که پس از ناحیه اول قرار گرفته جایی است که جریان تقریباً همگن، ایزوتروپیک و ایزوتروپیک موضعی است. البته در این ناحیه انتقال انرژی از یک طول موج به طول موج دیگر وجود دارد. سومین ناحیه که در فاصله دورتری نسبت به شبکه قرار گرفته جایی است که اثرات ویسکوزیته سیال روی ساختارهای گردابه‌ای با محتوای انرژی بیشتر غالب است. ناحیه دوم محدوده مجاز برای داده برداری و قرار دادن مدل استوانه‌ای در تحقیق حاضر است که بر طبق مراجع [۱۱ و ۳۲] محدوده این ناحیه در پایین دست شبکه $20 \leq x/M \leq 80$ است.

همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، یکی از اهداف اصلی در تحقیق پیش‌رو بررسی اثر تغییر شرایط آشفتگی جریان نظیر شدت آشفتگی (Tu) و همچنین طول مشخصه اغتشاشی (A_x) روی



شکل ۶: همبستگی خودکار در پایین دست ناحیه دنباله در امتداد خط مرکزی و در سرعت ۱۰ m/s

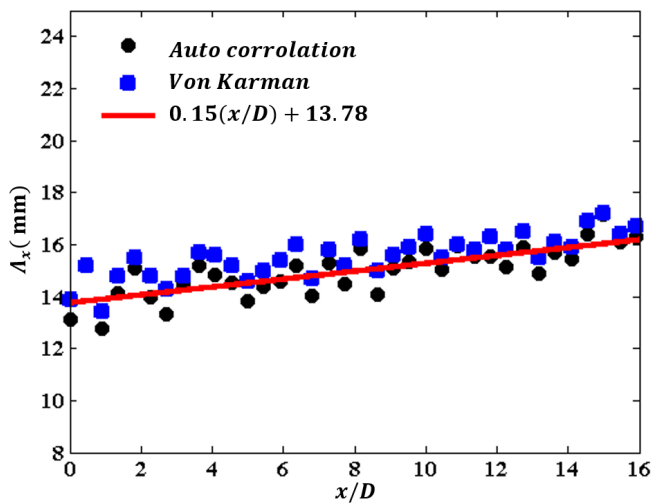
Fig. 6. Instantaneous auto correlation function in the wake downstream at the center-line and at 10m/s.



شکل ۵: مقایسه طیف سرعت اندازه‌گیری شده در جهت جریان با مدل ون کارمن در سرعت ۱۰ m/s

Fig. 5. Comparison of the measured streamwise velocity spectrum against Von Karman model at 10m/s.

مقایسه‌ای بین نتایج طول مشخصه به دست آمده از دو روش همبستگی خودکار و طیف تئوری ون کارمن برای شبکه ۹G در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: مقایسه طول مشخصه محاسبه شده با استفاده از روش‌های همبستگی خودکار و طیف ون کارمن در سرعت ۱۰ m/s

Fig. 7. Comparison of calculated turbulence length scale using auto correlation and Von Karman spectrum methods at 10m/s.

بر طبق این شکل، اختلاف ناچیزی (حداکثر ۳٪) بین دو روش وجود دارد که نشان از صحت عملکرد روش‌ها در تعیین طول مشخصه است. بنابراین در تحقیق پیش‌رو امکان استفاده از هر دو روش در تخمین طول مشخصه وجود دارد. همانطور که مشهود است با افزایش

روش دوم انتگرال‌گیری از همبستگی خودکار^۱ بر مبنای فرضیه تیلور است [۳۵]. همبستگی خودکار (R_{uu}) ارتباط بین مؤلفه نوسانی سرعت در جهت جریان در یک موقعیت مشخص و در دو زمان متفاوت t و $t + \tau$ را مشخص می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$R_{uu}(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{u'^2} \quad (2)$$

در اینجا τ تأخیر زمانی است.

شکل ۶ تغییرات همبستگی خودکار را در امتداد جریان و در نقاط مختلف در پایین دست شبکه ۹G نشان می‌دهد. بر طبق شکل در $\tau = 0$ مقدار همبستگی خودکار یک است که نشان از همبستگی کامل سیگنال‌های سرعت دارد. این در حالی است که با افزایش τ مقدار همبستگی خودکار کاهش می‌یابد و برای $\tau \geq 40 \times 10^{-4}$ s مقدار آن صفر می‌شود. نکته قابل توجه در این شکل این است که با افزایش فاصله از شبکه سطح زیر منحنی افزایش می‌یابد که نشان از بزرگتر شدن ساختارهای گردابه‌ای با حرکت به سمت پایین دست شبکه است.

در نهایت طول مشخصه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۵].

$$\Lambda_x = U_\infty \int_0^\infty R_{uu}(\tau) dt \quad (3)$$

1 Auto correlation

و متقابل^۲ بین سیگنال‌های فشار دو میکروفون i و j ($p_i(t)$) و ($p_j(t)$) به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$P_i(f, T) = \int_0^T p_i(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

که E امید ریاضی یک متغیر تصادفی گسسته است. همچنین $p_i(f, T)$ تبدیل فوریه $p_i(t)$ بوده و با توجه به رابطه (۷) قابل محاسبه است. بعلاوه $p_i^*(f, T)$ مزدوج مختلط $p_i(f, T)$ است. چنانچه پهنای باند فرکانسی برابر با ۱ Hz در نظر گرفته شود، چگالی طیفی خودکار ($\phi_{p_i p_i}(f)$) معادل چگالی طیف توان^۳ بوده و تنها دارای اندازه است.

در بیشتر مواقع از مجذور تابع چگالی طیفی متقابل نرمال شده $(\gamma_{i,j}^2)$ به نام تابع هم‌دوسی استفاده می‌گردد. این تابع اطلاعات زیادی در رابطه با ساختار فشار لایه مرزی آشسته فراهم می‌نماید. تابع هم‌دوسی با استفاده از چگالی طیفی متقابل بین دو سیگنال فشار و چگالی طیفی خودکار مربوط به هر کدام از سیگنال‌ها با توجه به رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\gamma_{i,j}^2(f) = \frac{|\phi_{p_i p_i}(f)|^2}{\phi_{p_i p_i}(f) \phi_{p_j p_j}(f)} \quad (8)$$

تابع هم‌دوسی تنها دارای اندازه بوده و مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌نماید (صفر نمایانگر حالتی است که سیگنال‌ها کاملاً مستقل از یکدیگر بوده و یک برای حالتی است که دو متغیر کاملاً وابسته به یکدیگرند). [۴۰].

برای محاسبه سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای از همبستگی متقابل^۴ ($R_{p_i p_j}$) بین سیگنال فشار دو نقطه در راستای جریان استفاده می‌شود و این پارامتر با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد [۴۰].

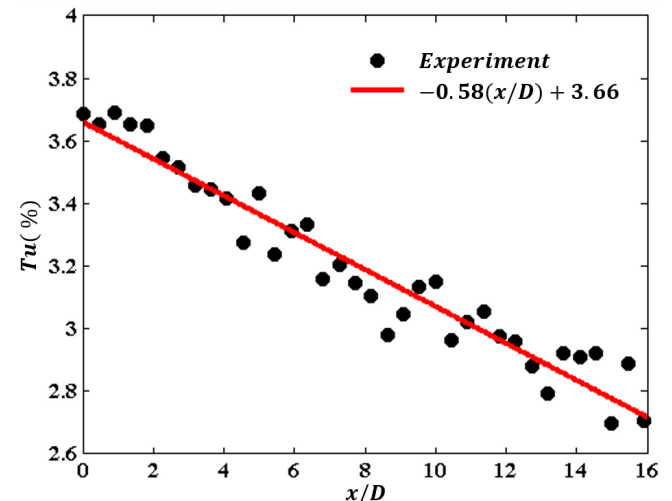
$$R_{p_i p_j}(\tau) = \frac{P_i^*(x_i, t) P_j(x_j, t + \tau)}{\sqrt{P_i^*(x_i)} \sqrt{P_j(x_j)}} \quad (9)$$

ماکزیمم مقدار همبستگی متقابل در یک تأخیر زمانی اتفاق می‌افتد که متناظر با زمان مورد نیاز برای جابه‌جایی ساختارهای

فاصله از شبکه طول مشخصه افزایش می‌یابد که نشان از بزرگتر شدن ساختارهای گردابه‌ای در پایین‌دست شبکه است و این روند منطبق بر نتایج مرجع [۳۵] است.

برای محاسبه شدت آشفتگی در پایین‌دست شبکه با استفاده از نوسانات سرعت اندازه‌گیری شده از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$Tu = \sqrt{u'^2} / U_\infty \quad (4)$$



شکل ۸: تغییرات شدت آشفتگی در امتداد خط مرکزی در ناحیه دنباله برای شبکه ۹G در سرعت ۱۰ m/s

Table 8. Variations of turbulence intensity along center-line in the wake downstream of grid G9 at 10m/s.

شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییرات شدت آشفتگی با افزایش فاصله از شبکه در پایین‌دست آن به صورت کاهشی است و این نتیجه عکس روند تغییرات طول مشخصه است.

قبل از بیان نتایج لازم است نحوه تحلیل داده‌ها و محاسبه پارامترهای اصلی مورد نیاز مشخص شود. به طور کلی پارامترهای مورد نظر شامل چگالی طیف فشار سطح، تابع هم‌دوسی، همبستگی متقابل، طول مشخصه نوسانات فشار در راستای دهانه مدل و سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای در راستای جریان است.

$$\phi_{p_i p_i}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [P_i^*(f, T) P_i(f, T)] \quad (5)$$

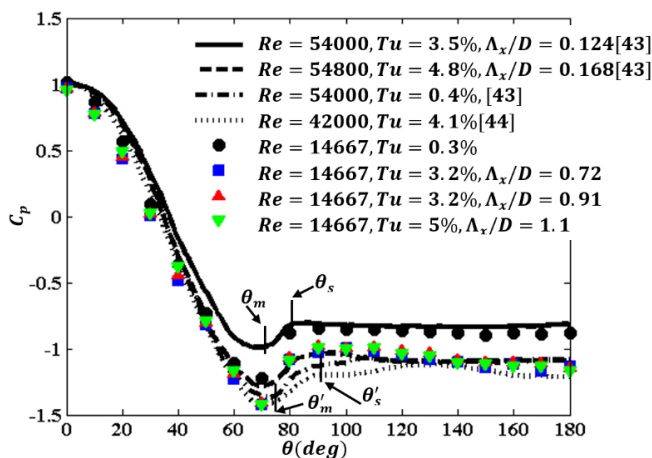
$$\phi_{p_i p_j}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [P_i^*(f, T) P_j(f, T)] \quad (6)$$

با توجه به روابط بندها و پیرسول [۳۹]، چگالی طیفی خودکار^۱

2 Cross-spectral density
3 Power spectral density
4 Cross correlation

1 Auto-spectral density

پیرامونی (θ) ضریب فشار در جریان آزاد آشفته کوچکتر (منفی تر) از مقدار متناظر در جریان آزاد آرام می شود و در نهایت این اختلاف در مجاورت نقطه متناظر با کمترین ضریب فشار (θ'_m) به حداکثر مقدار ممکن می رسد. علاوه بر این، شیب کاهش ضریب فشار در جریان آزاد آشفته در مقایسه با جریان آزاد آرام بزرگتر است. از نقطه سکون تا θ'_m افزایش طول مشخصه در شدت آشفتگی ۳/۲٪ منجر به افزایش ضریب فشار می شود. چنین نتیجه ای با افزایش شدت آشفتگی نیز مشاهده می شود. بنابراین افزایش شدت آشفتگی و همچنین طول مشخصه سبب کاهش شیب ضریب فشار می شود. در حالت کلی نفوذ آشفتگی در لایه مرزی سبب ایجاد گردایان فشار موافق قوی تری در مقایسه با جریان آزاد آرام خواهد شد. این نتیجه در کاهش هر چه بیشتر کمترین ضریب فشار (C'_{pm}) و جابه جایی موقعیت این ضریب (θ'_m) به زوایای بزرگتر مؤثر است. در جریان آزاد آرام کمترین ضریب فشار (C_{pm}) در زاویه $\theta_m = 70^\circ$ در نیمه بالایی مدل اتفاق می افتد. این در حالی است که در جریان آزاد آشفته این ضریب با توجه به مقادیر شدت آشفتگی و طول مشخصه در $\theta'_m \geq 70^\circ$ و حداکثر در $\theta'_m = 75^\circ$ رخ می دهد. این زوایا به طور قابل توجهی منطبق بر مقادیر گزارش شده در مراجع [۴۳ و ۴۴] می باشند که صحت اندازه گیری های انجام شده در مطالعه پیش رو را نشان می دهد. طبق شکل ۹ اختلاف بین توزیع فشار در جریان آزاد آرام و آشفته در ناحیه متناظر با گردایان فشار معکوس (ناحیه ای که از نقطه کمترین فشار θ'_m شروع شده و تا نقطه متناظر با شروع ناحیه پایه θ'_s ادامه می یابد) قابل توجه است. در حقیقت در تمام این محدوده ضریب



شکل ۹. توزیع ضریب فشار متوسط در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s
 Fig. 9. Mean pressure coefficient distribution in turbulent and smooth incident flow and at 10m/s.

گردابه ای از یک میکروفون به میکروفون دیگر است. با در نظر گرفتن این تأخیر زمانی و فاصله بین دو میکروفون در جهت جریان (ε) که مقداری مشخص است سرعت جابه جایی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$U_c = \varepsilon / \tau \quad (10)$$

به منظور محاسبه طول مشخصه در راستای دهانه مدل، از داده های مربوط به نوسانات فشار در نقاط واقع در راستای دهانه استفاده می گردد. با محاسبه توابع همدوسی $\gamma_{i,j}^2(f, \eta_z)$ بین تمامی نقاط واقع در راستای دهانه مدل، طول مشخصه در راستای دهانه با استفاده از رابطه (۱۱) به دست خواهد آمد. [۴۱].

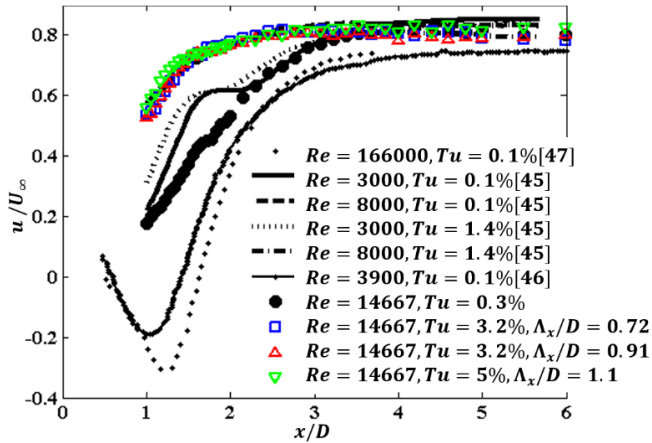
$$l_z(f) = \sum_{k=1}^{M-1} (\gamma_k(f) + \gamma_{k+1}(f)) (\eta_{z,k+1} - \eta_{z,k}) / 2 \quad (11)$$

لازم به ذکر است که برای نوشتن تمامی کدها از نرم افزار متلب نسخه R2014a استفاده شده است. همچنین تکرارپذیری تمامی آزمایش ها بررسی شده است.

۳- نتایج

در این بخش ابتدا پارامترهای آیرودینامیکی شامل توزیع فشار استاتیکی روی مدل و سرعت در ناحیه دنباله به ازای شرایط جریان آزاد آرام و آشفته بررسی شده است. تحت این شرایط، نتایج طیف فشار سطح با نویر زمینه تونل مقایسه شده و محدوده فرکانسی که داده ها دارای اعتبار هستند، مشخص شده است. علاوه بر این نتایج تابع همدوسی، طول مشخصه و همچنین سرعت جابه جایی ساختارهای گردابه ای در جریان آزاد آرام و آشفته با یکدیگر مقایسه شده اند.

در شکل ۹ توزیع فشار استاتیکی پیرامون مدل برای جریان آزاد آرام و آشفته با مشخصه های اغتشاشی مختلف نشان داده شده است. علاوه بر این نتایج تجربی با نتایج سده و شارون [۴۳] و نوربرگ [۴۴] مقایسه شده و تطابق قابل قبولی بین نتایج مشاهده شده است. طبق شکل در ناحیه متناظر با گردایان فشار موافق (ناحیه ای که از نقطه سکون شروع شده و تا نقطه کمترین فشار θ'_m ادامه می یابد) و مخصوصاً در مجاورت نقطه سکون، اختلاف ضرایب فشار در دو جریان آزاد آرام و آشفته کم است. این در حالی است که با افزایش زاویه



شکل ۱۰: توزیع سرعت متوسط در جهت جریان در جریان آزاد آشفته و آرام در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 10. Mean streamwise velocity distribution in turbulent and smooth incident flow at 10m/s.

که مشهود است در پایین دست مدل و مخصوصاً در مجاورت آن سرعت متوسط در جریان آزاد آشفته با هر مشخصه‌ای در مقایسه با جریان آزاد آرام بیشتر است و این اختلاف با افزایش فاصله از مدل کاهش می‌یابد. در حالت کلی این اختلاف به خاطر تولید انرژی جنبشی در مجاورت مدل است که با افزایش سطح آشفتگی جریان، سطح انرژی جنبشی و در نهایت سرعت در راستای جریان افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج در جریان آزاد آشفته با مشخصه‌های مختلف نشان می‌دهد که از مجاورت مدل تا $x/D = 2$ ، با افزایش طول مشخصه و همچنین شدت آشفتگی، سرعت افزایش می‌یابد. این در حالی است که سرعت برای $x/D > 2$ با افزایش طول مشخصه در شدت آشفتگی ثابت کاهش می‌یابد و به طور عکس با افزایش شدت آشفتگی در طول مشخصه ثابت افزایش می‌یابد.

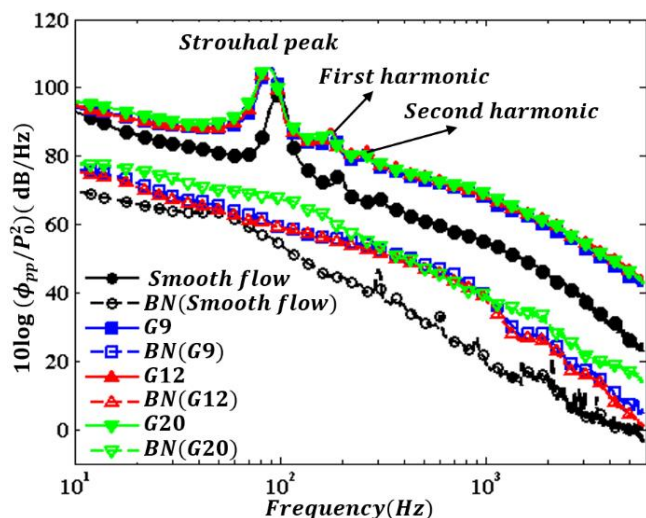
در حالت کلی موقعیت در پایین دست مدل که متناظر با مقدار ماکزیمم مجذور میانگین مربعات سرعت (u_{rms}) است، نقطه شکل‌گیری گردابه خواهد بود و فاصله از مدل تا این نقطه طول شکل‌گیری گردابه (در جریان آزاد آرام L_r و در جریان آزاد آشفته L'_r) است [۴۵]. به منظور تعیین نقطه شکل‌گیری گردابه و ابعاد ناحیه دنباله نزدیک، تغییرات u_{rms} روی خط مرکزی ناحیه دنباله در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

طبق مرجع [۴۵] طول شکل‌گیری گردابه با افزایش عدد رینولدز و همچنین شدت آشفتگی کاهش می‌یابد که این در شکل ۱۱ مشهود است. با تعیین نقطه شکل‌گیری گردابه، محدوده ناحیه دنباله نزدیک به سادگی قابل تشخیص است و از مجاورت مدل تا $D/5$ پس از

فشار در جریان آزاد آشفته کمتر از جریان آزاد آرام است که این نتیجه‌ای از کوچکتر بودن فشار در موقعیت θ'_m است. در این ناحیه تغییر طول مشخصه در شدت آشفتگی ثابت سبب افزایش ضریب فشار می‌شود. این در حالی است که ضریب فشار با افزایش شدت آشفتگی در طول مشخصه ثابت کاهش می‌یابد که عکس روند ذکر شده در محدوده متناظر با گرادیان فشار موافق است. در حالت کلی محدوده گرادیان فشار معکوس در جریان آزاد آشفته $\theta'_{sm} = \theta'_s - \theta'_m$ با توجه به مشخصه‌های اغتشاشی جریان (شدت آشفتگی، طول مشخصه و همچنین تغییرات عدد رینولدز) از 15° تا حداکثر 50° خواهد بود [۴۲]. این در حالی است که در جریان آزاد آرام محدوده این ناحیه $\theta'_{sm} = \theta'_s - \theta'_m$ در تمامی اعداد رینولدز 10° است [۴۲]. در شکل ۹ و θ'_{sm} به ترتیب 10° و 15° است که نشان از صحت اندازه‌گیری‌ها است. توجه به این نکته ضروری است که عریض‌تر شدن ناحیه متناظر با گرادیان فشار معکوس در جریان آزاد آشفته منجر به محدودتر شدن ناحیه پایه خواهد شد که این مشابه شرایط برقرار شده در جریان آزاد آرام متناظر با اعداد رینولدز بسیار بزرگ است. در مطالعه حاضر ناحیه پایه که تقریباً از فشار ثابتی برخوردار است، در جریان آزاد آرام و آشفته به ترتیب در $\theta'_s = 80^\circ$ و $\theta'_s = 90^\circ$ شروع می‌شود. این زوایا بسیار نزدیک به مقادیر گزارش شده در مراجع [۴۴] [۴۳] و می‌باشند. در ناحیه پایه کلیه تغییرات ضریب فشار با تغییر شدت آشفتگی و طول مشخصه مشابه ناحیه متناظر با گرادیان فشار معکوس است.

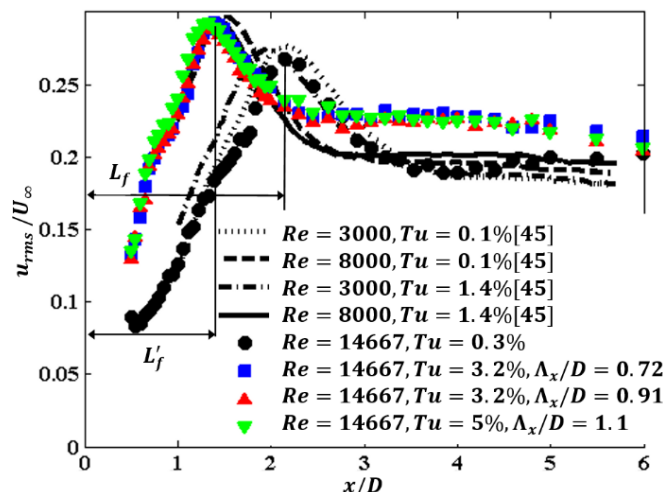
به منظور فهم هر چه بهتر ساختار جریان در دنباله مدل در دو جریان آزاد آرام و آشفته، پروفیل سرعت متوسط در راستای جریان که از طریق جریان سنج سیم داغ روی خط مرکزی ($y/D = 0$) و در مقطع وسط مدل ($z/D = 0$) اندازه‌گیری شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ نتایج سرعت متوسط در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته تطابق قابل قبولی با نتایج مراجع [۴۷-۴۵] دارند که این نشان از صحت روند اندازه‌گیری‌های تجربی دارد.

البته همانطور که مشهود است داده‌های ارائه شده در شکل ۱۰ در برگیرنده مقادیر منفی سرعت متوسط در محدوده دنباله نزدیک نیست. دلیل این کار این است که در مطالعه حاضر اندازه‌گیری سرعت در ناحیه دنباله با استفاده از جریان سنج یک بعدی صورت پذیرفته است و این وسیله قادر به ثبت سرعت‌های منفی نمی‌باشد. همانطور



شکل ۱۲: طیف فشار سطح و نویز زمینه تونل باد (BN) در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 12. Surface pressure spectra and wind tunnel background noise in turbulence and smooth incident flow and at 10m/s.



شکل ۱۱: توزیع توزیع مجذور میانگین مربعات در جریان‌های آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 11. RMS velocity distribution in turbulent and smooth incident flow and at 10m/s.

ناشی از خود تونل باد و نوسانات فشار هیدرودینامیکی سیال)، چنانچه اندازه نوسانات فشار یک منبع بیش از ۱۰ dB بزرگ‌تر از منبع دیگر باشد، حضور منبع کوچک‌تر تأثیر بسیار ناچیزی روی کل نوسانات فشار اندازه‌گیری شده دارد. در این حالت آنچه سنسور فشار ثبت می‌کند برابر با مقدار نوسانات فشار منبع بزرگتر است. بنابراین نتایج تنها در محدوده‌ای از فرکانس‌ها قابل اطمینان‌اند که طیف فشار سطح حداقل ۱۰ dB بیشتر از نویز زمینه تونل باد باشد.

در شکل ۱۲ نویز زمینه تونل باد با استفاده از یک میکروفون کندانسوری یک چهارم اینچ مدل ۴۰ G.R.A.S BP و در غیاب مدلی در تونل اندازه‌گیری شده است. میکروفون مرجع در فاصله عمودی ۲۵۰ mm از مرکز سطح مقطع آزمون در جت خروجی تونل نصب شده است. با توجه به شکل در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته، اختلاف بین نویز زمینه تونل باد و طیف فشار سطح برای فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ Hz بیشتر از ۱۰ dB است. بنابراین نتایج طیف فشار سطح در تمام محدوده فرکانسی مورد قبول است. با توجه به شکل ۱۲، طیف فشار سطح در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته شامل نویزهای باریک باند و پهن باند است. در هر دو جریان بزرگترین بیشینه طیف فشار سطح مربوط به قوی‌ترین نویز باریک باند است که اصطلاحاً بیشینه استروهاال گفته می‌شود. فرکانس متناظر با این بیشینه که به فرکانس ریزش گردابه معروف است، طبق تعریف عدد استروهاال قابل پیش بینی است. همانطور که در شکل مشهود است، بیشینه‌های دوم

نقطه شکل‌گیری گردابه است [۴۵]. طبق شکل ۱۱ در جریان آزاد آشفته در مقایسه با جریان آزاد آرام طول شکل‌گیری گردابه و در نهایت محدوده دنباله نزدیک کاهش می‌یابد که این دلیلی بر افزایش سطح انرژی جنبشی در جریان آزاد آشفته است. در حقیقت در این شرایط محدوده پایین دست مدل که برهم‌کنش بین جریان جدا شده با مدل قابل توجه است، کاهش می‌یابد.

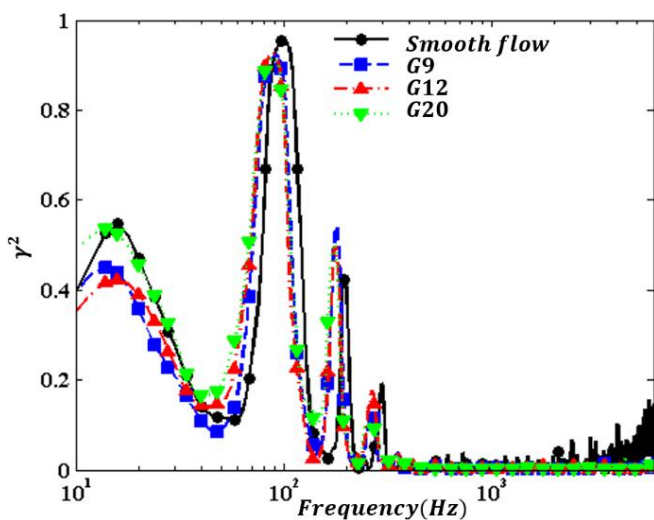
نتایج طیف فشار سطح در حوزه فرکانس و در سرعت ۱۰ m/s برای هر دو جریان آزاد آرام و آشفته در شکل ۱۲ ارائه شده است. این نتایج با استفاده از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط میکروفون شماره ۱۵ (واقع در موقعیت $z/D = 0$ و $\theta = 135^\circ$ نسبت به جریان بالادست) به دست آمده‌اند. با توجه به انجام آزمایشات در تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده دانشگاه یزد، قبل از ارائه نتایج طیف فشار سطح باید با بررسی نسبت سیگنال به نویز محدوده فرکانسی قابل اعتماد در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته مشخص گردد. در حالت کلی آنچه میکروفون ثبت می‌کند، عبارتست از مجموع نوسانات فشار روی سطح مدل (القا شده بواسطه نوسانات سرعت در لایه مرزی ایجاد شده روی سطح و همچنین نوسانات فشار در ناحیه دنباله) و نویز زمینه تونل باد (نویز ناشی از جریان در تونل باد بدون حضور مدل. از طرف دیگر با توجه به استفاده از مقیاس دسی‌بل، در صورت وجود دو منبع تولید کننده نوسانات فشار (برای مثال نوسانات فشار

1 Signal to noise ratio

به منظور بررسی دو بعدی بودن جریان، نتایج چگالی طیف فشار سطح میکروفون‌های تعبیه شده در راستای دهانه مدل (میکروفون شماره ۱ تا ۸) در سرعت ۱۰ m/s با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۱۳ به منظور رعایت اختصار نتایج جریان آزاد آرام با نتایج جریان آزاد آشفته ایجاد شده به وسیله شبکه ۹G مقایسه شده است. در هر دو حالت اختلاف نتایج در تمامی محدوده فرکانسی کمتر از ۳ dB بوده و بنابراین هر دو جریان در دهانه مدل به طور مناسب دو بعدی هستند.

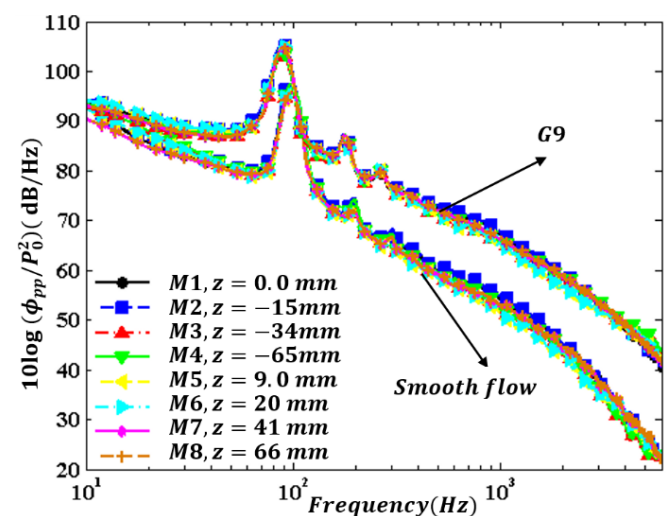
به منظور بررسی ابعاد فیزیکی ساختارهای گردابه‌ای، تغییرات تابع همدوسی عرضی (در راستای دهانه مدل) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۴۰]. در شکل ۱۴ تغییرات تابع همدوسی عرضی به ازای فاصله $\eta_z = 15\text{mm}$ (فاصله عرضی بین میکروفون‌های ۱ و ۲) در سرعت ۱۰ m/s و برای هر دو جریان آزاد آرام و آشفته نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار تابع همدوسی عرضی در فرکانس‌های پایین به مراتب بزرگتر از فرکانس‌های بالا بوده و این بدان معناست که ابعاد فیزیکی گردابه‌هایی که مسئول ایجاد نوسانات فشار در فرکانس‌های پایین هستند، بزرگتر است. البته در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته ماکزیمم مقدار تابع همدوسی در فرکانس ریزش گردابه (برای جریان آزاد آرام و آشفته به ترتیب فرکانس‌های ۹۸ و ۸۸ هرتز) که متناظر با بیشینه استروهاال است و همچنین هارمونیک‌های آن رخ می‌دهد. به عبارت بهتر در این فرکانس‌ها سیگنال‌های دریافتی

و سوم طیف فشار سطح در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته که به هارمونیک‌های اول و دوم بیشینه استروهاال مشهور هستند، از دامنه کوچک‌تری در مقایسه با بیشینه استروهاال برخوردار هستند. این روندی منطبق بر نتایج مرجع [۱۸] است و نشان می‌دهد که چنین نویزهایی در مقایسه با نویز باریک باند اول از سطح انرژی کمتری برخوردارند. بنابراین نویز منتشر شده از جریان عبوری از سطح مدل به طور قابل توجهی تحت تأثیر نویز باریک باند اول است. به طور کلی، بیشینه استروهاال و هارمونیک دوم آن تحت تأثیر نوسانات نیروی لیفت روی سطح مدل و هارمونیک اول تحت تأثیر نوسانات نیروی درگ می‌باشند. طبق شکل ۱۲ سطح طیف فشار سطح در جریان آزاد آشفته در مقایسه با جریان آزاد آرام بیشتر است. علاوه بر این بیشینه استروهاال و هارمونیک‌های اول و دوم آن در جریان آزاد آشفته به سمت فرکانس‌های پایین سوق می‌یابند که این نشان از کاهش عدد استروهاال در این جریان است. به عبارت بهتر در جریان آزاد آرام و در سرعت ۱۰ m/s بیشینه استروهاال در فرکانس ریزش گردابه $f = 98\text{Hz}$ که متناظر با عدد استروهاال $St = 0.215$ است، اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در همین سرعت و در هر سه جریان آزاد آشفته، فرکانس ریزش گردابه و عدد استروهاال متناظر با آن به ترتیب $f' = 88\text{Hz}$ و $St' = 0.193$ می‌باشند. در جریان آزاد آشفته افزایش سطح آشفتگی جریان و همچنین طول مشخصه منجر به افزایش سطح طیف فشار سطحی می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۴: تغییرات همدوسی عرضی برای فاصله در جریان آزاد $\eta_z = 15\text{mm}$ آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 14. Lateral coherence variations for $\eta_z = 15\text{mm}$ in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s.



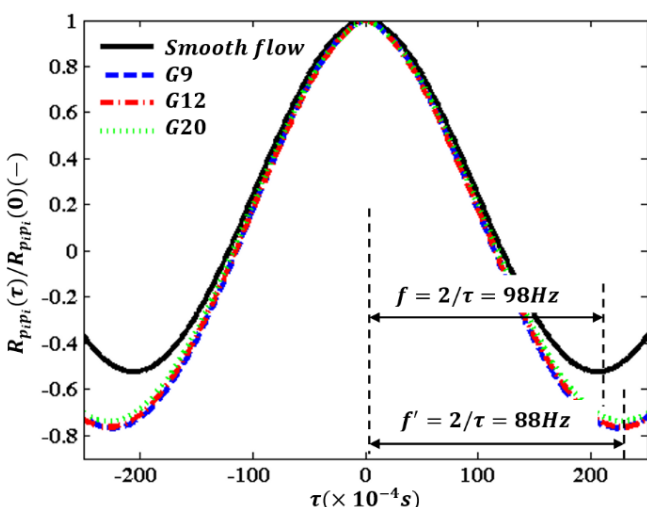
شکل ۱۳: طیف فشار سطح در راستای دهانه مدل در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 13. Surface pressure spectra at the spanwise direction in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s.

با جریان آزاد آشفته بزرگتر است که این می‌تواند نشانی از کوچکتر بودن ساختارهای گردابه‌ای در جریان آزاد آشفته در مقایسه با جریان آزاد آرام باشد.

برای درک این مطلب تغییرات همبستگی خودکار سیگنال‌های فشار میکروفون شماره ۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور در معادله (۲) به جای نوسانات سرعت از نوسانات فشار استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشهود است، سطح زیر منحنی همبستگی خودکار که نشانی از اندازه ساختارهای گردابه‌ای در موقعیت میکروفون است، در جریان آزاد آرام نسبت به جریان آزاد آشفته بیشتر است. البته در جریان آزاد آشفته با افزایش شدت آشفتگی و طول مشخصه ساختارهای گردابه‌ای، سطح زیر منحنی همبستگی خودکار افزایش می‌یابد که نشان از بزرگتر شدن ساختارها است. در شکل ۱۶ تأخیر زمانی متناظر با کمترین همبستگی خودکار در جریان آزاد آرام و آشفته به ترتیب برابر با 2.05×10^{-4} و 2.29×10^{-4} است. این مقادیر بر طبق رابطه $f = 2/\tau$ تعیین کننده فرکانس‌های ریزش گردابه در جریان آزاد آرام ($f = 98 \text{ Hz}$) و آشفته ($f' = 87/3 \text{ Hz}$) هستند.

به منظور بررسی اندازه ساختارهای گردابه‌ای در راستای دهانه مدل، تغییرات طول مشخصه آنها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. طبق شکل، طول مشخصه در راستای دهانه و در هر دو جریان آزاد و آشفته، وابسته به فرکانس بوده و مقدار آن در فرکانس‌های پایین

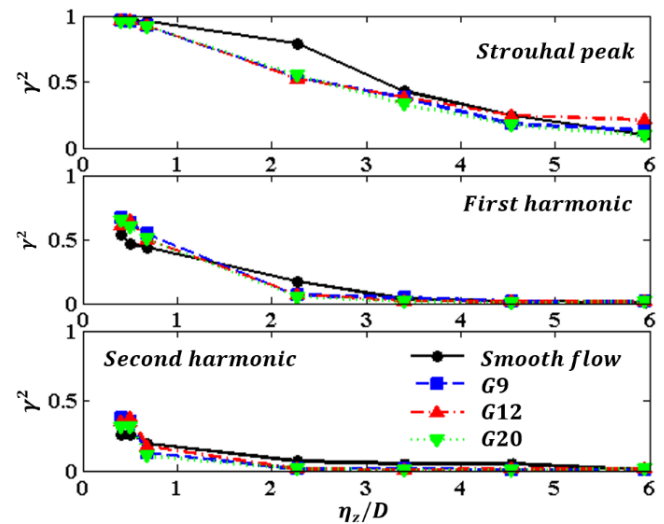


شکل ۱۶: تغییرات همبستگی خودکار میکروفون ۱۵ در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 16. Auto correlation variations of microphone 15 in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s.

توسط دو میکروفون شباهت بسیار زیادی به یکدیگر دارند و این نشان از بزرگ بودن ساختارهای گردابه‌ای در این فرکانس‌ها در مقایسه با سایر فرکانس‌ها است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تغییر ماهیت جریان آزاد از آرام به آشفته سبب جابه‌جایی فرکانس بیشینه تابع همدوسی (فرکانس ریزش گردابه) به فرکانس‌های پایین می‌شود که مشابه روند تغییرات فرکانس ریزش گردابه در شکل ۱۲ است. افزایش شدت آشفتگی و همچنین طول مشخصه در جریان آزاد آشفته سبب افزایش تابع همدوسی می‌شود که نشان از بزرگتر شدن ساختارهای گردابه‌ای در این شرایط است.

شکل ۱۵ تغییرات تابع همدوسی عرضی را برای جریان آزاد آرام و آشفته با افزایش η_z در فرکانس ریزش گردابه و هارمونیک‌های اول و دوم آن نشان می‌دهد. طبق این شکل افزایش فاصله بین میکروفون‌ها در هر سه فرکانس منجر به کاهش تابع همدوسی می‌شود. این نشان می‌دهد که اندازه ساختارهای گردابه‌ای متناظر با فرکانس ریزش گردابه بزرگ‌تر از کمترین فواصل بین میکروفون‌ها و کوچکتر از بیشترین فاصله بین آنها است. این در حالی است که ساختارهای گردابه‌ای در کلیه هارمونیک‌ها در مقایسه با کلیه فواصل η_z کوچکتر می‌باشند. البته از مقایسه نتایج تابع همدوسی در این فرکانس‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه گردابه‌ها در فرکانس ریزش گردابه در مقایسه با هارمونیک‌های آن بزرگتر است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که تابع همدوسی در جریان آزاد آرام در مقایسه



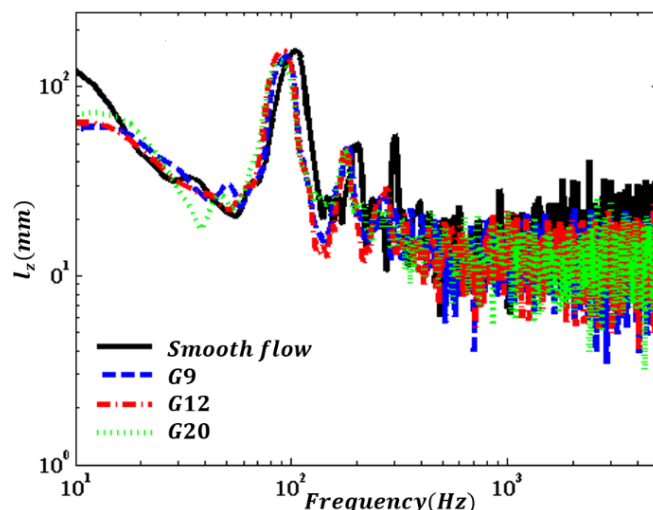
شکل ۱۵: تغییرات همدوسی عرضی در راستای دهانه مدل برای بیشینه استروال و هارمونیک‌های آن در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 15. Lateral coherence variations along spanwise direction for Strouhal peak and its harmonics in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s.

طیف فشار سطح و ماکزیمم مقدار همدوسی عرضی است. مشابه روند تغییرات در شکل‌های ۱۲ و ۱۴ تغییر ماهیت جریان آزاد از آرام به آشفته سبب جابه‌جایی فرکانس ریزش گردابه به فرکانس‌های پایین می‌شود.

شکل ۱۸ تغییرات همبستگی متقابل بین سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط میکروفون شماره ۹ با سیگنال‌های میکروفون‌های ۱۴ و ۱۵ را برای هر دو جریان آزاد آرام و آشفته نشان می‌دهد.

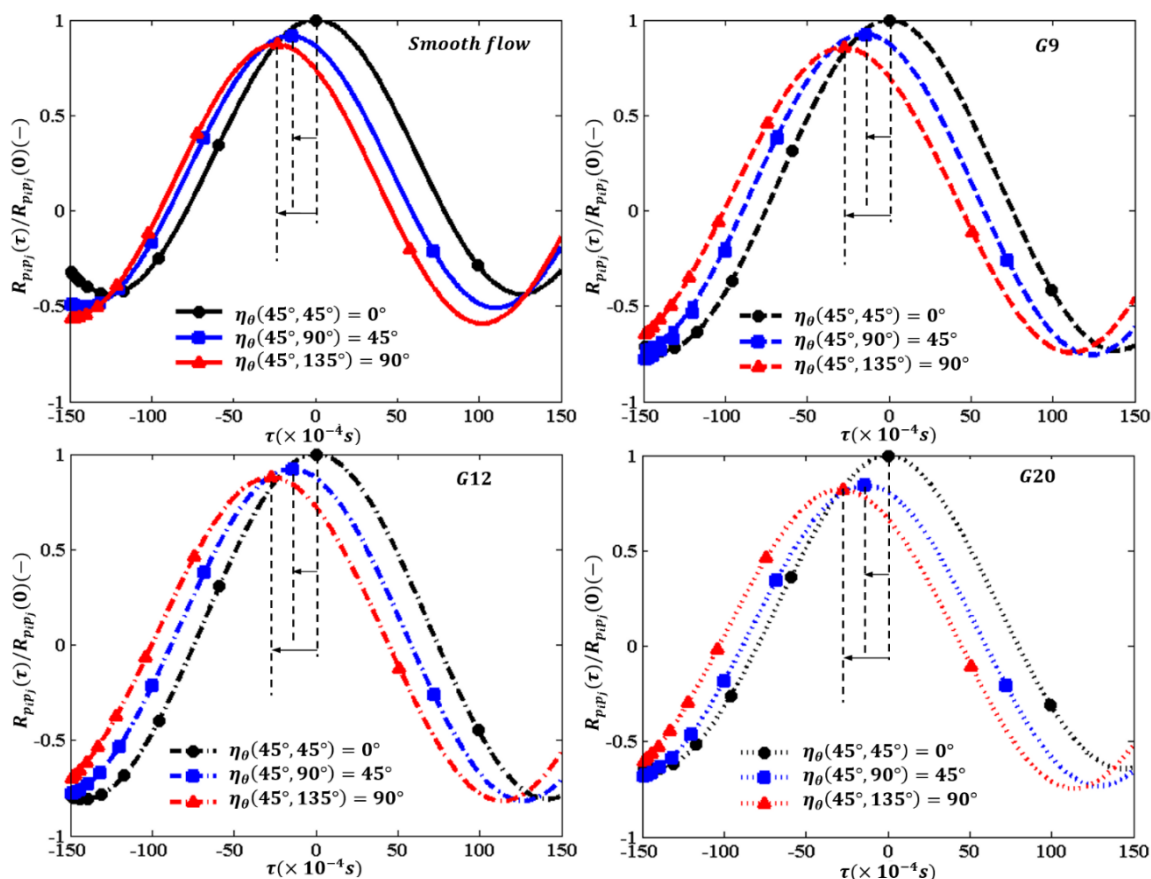
در فاصله $\eta_\theta = 0^\circ$ همبستگی متقابل متناظر با همبستگی خودکار سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون شماره ۹ است که بیشترین مقدار آن در تأخیر زمانی صفر اتفاق افتاده است. با افزایش فاصله بین میکروفون‌ها سطح همبستگی خودکار کاهش و تأخیر زمانی افزایش می‌یابد که این نشان از تغییر هویت بیشتر ساختارهای گردابه‌ای در طی جابه‌جایی بین میکروفون‌ها است. از تغییرات همبستگی متقابل در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش فاصله بین میکروفون‌ها، سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای افزایش می‌یابد و این سرعت مربوط به ساختارهای



شکل ۱۷: طول مشخصه در راستای دهانه مدل در جریان آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 17. Spanwise length scale as a function of frequency in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s.

بزرگتر از فرکانس‌های بالا است. علاوه بر این ماکزیمم مقدار طول مشخصه در سرعت ۱۰ m/s برای جریان آزاد آرام و آشفته در فرکانس‌های ریزش گردابه رخ داده که برابر با فرکانس ماکزیمم چگالی



شکل ۱۸: تغییرات همبستگی متقابل برای فواصل زاویه‌ای مختلف در جریان‌های آزاد آشفته و آرام و در سرعت ۱۰ m/s.

Fig. 18. Cross correlation variations for various angle distances in turbulence and smooth incident flow and at 10 m/s

جدول ۳ تغییرات سرعت جابه‌جایی در جریان آزاد آرام و آشفته
Table 3. Convection velocity variation in smooth and turbulence incident flow.

$\frac{U_c}{U_\infty}$	(m/s) U_c	$\tau(\times 10^{-4}s)$	$[R_{p_{ipi}}]_{max}$	(mm) ϵ	(deg) η_θ	شماره میکروفون(M)
Smooth flow						
۰/۵۱۸	۵/۱۸	۱۵	۰/۹۱۳۸	۷/۷۸	۴۵	۱ و ۹
۰/۶۴۸	۶/۴۸	۲۴	۰/۸۷۰۱	۱۵/۵۵	۹۰	۹ و ۱۵
G9						
۰/۴۷۱	۴/۷۱	۱۶/۵	۰/۹۲۳۸	۷/۷۸	۴۵	۱ و ۹
۰/۵۳۶	۵/۳۶	۲۹	۰/۸۵۳۳	۱۵/۵۵	۹۰	۹ و ۱۵
G12						
۰/۴۸۶	۴/۸۶	۱۶	۰/۹۱۹۶	۷/۷۸	۴۵	۱ و ۹
۰/۵۵۰	۵/۵۰	۲۸/۳	۰/۸۷۷۲	۱۵/۵۵	۹۰	۹ و ۱۵
G20						
۰/۴۵۷	۴/۵۷	۱۷	۰/۸۳۹۱	۷/۷۸	۴۵	۱ و ۹
۰/۵۱۸	۵/۱۸	۳۰	۰/۸۱۹	۱۵/۵۵	۹۰	۹ و ۱۵

به میکروفون‌های کندانسوری کوچک بسیار دقیق استفاده شده است. کلیه آزمایش‌ها در تونل باد مادون صوت دانشگاه یزد انجام شده است. به منظور ایجاد جریان آزاد آشفته از شبکه‌هایی با مش‌های مربعی در بالادست مدل استفاده شده است. پارامترهای مختلفی نظیر طیف فشار سطح، تابع همدوسی، همبستگی خودکار و متقابل، طول مشخصه در دهانه مدل و سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای در راستای جریان با استفاده از نوسانات فشار سطحی به منظور فهم هر چه بهتر ساختار جریان پیرامون مدل محاسبه شده‌اند. نتایج نشان دادند که با تغییر ماهیت جریان آزاد از آرام به آشفته بیشینه استروهمال به سمت فرکانس‌های پایین جابجا می‌شود که نشان از کاهش عدد استروهمال است. تغییرات تابع همدوسی نشان داد که در هر دو جریان آزاد آرام و آشفته اندازه ساختارهای گردابه‌ای در فرکانس ریزش گردابه در مقایسه با سایر فرکانس‌ها بزرگتر است که این نشان از بیشتر بودن سطح انرژی این ساختارها در این فرکانس‌ها است. بنابراین علاوه بر این نویز ناشی از جریان عبوری از سطح مدل به طور قابل توجهی تحت تأثیر نویز باریک باند اول است. تغییرات طول مشخصه در راستای دهانه مدل نشان داد که اندازه ساختارهای گردابه‌ای در فرکانس ریزش گردابه و همچنین هارمونیک‌های آن در جریان آزاد آرام در مقایسه با جریان آزاد آشفته بزرگتر است. علاوه بر این نتایج همبستگی متقابل نشان دادند که افزایش فاصله بین میکروفون‌ها سبب افزایش سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها می‌شود و این سرعت مربوط به ساختارهای بزرگی هستند که به طور عمده در جریان آزاد آرام تشکیل می‌شوند. بنابراین سرعت جابه‌جایی ساختارها

گردابه‌ای بزرگ است. در حقیقت هنگامی که فواصل بین میکروفون‌ها زیاد می‌شود، تنها ساختارهای با ابعاد بزرگ (فرکانس‌های پایین) همدوسی قابل توجهی داشته (هویت خود را حفظ نموده) و در نتیجه محدوده فرکانسی قابل ارائه کاهش می‌یابد (متناظر با افزایش تأخیر زمانی). همچنین مرکز ساختارهای بزرگ از سطح فاصله بیشتری داشته و در نتیجه نسبت به ساختارهای کوچک نزدیک به سطح با سرعت بیشتری حرکت می‌نمایند. بنابراین با توجه به فروپاشی هر چه سریعتر ساختارهای گردابه‌ای کوچک (دارای انرژی کمتر)، سرعت جابه‌جایی ساختارها بیشتر متأثر از ساختارهای بزرگ بوده و در نتیجه سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات سطح همبستگی متقابل، تأخیر زمانی و سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌های در جریان آزاد آرام و آشفته، تغییرات این پارامترها به ازای تغییر فواصل زاویه‌ای در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ می‌توان گفت که سرعت جابه‌جایی ساختارهای گردابه‌ای در جریان آزاد آرام در مقایسه با جریان آزاد آشفته بیشتر است و با توجه به توضیحات شکل ۱۸ می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه ساختارهای گردابه‌ای در جریان آزاد آرام در مقایسه با جریان آزاد آشفته بزرگتر است که این اثباتی بر نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ است.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی نوسانات فشار ناپایای سطح تحت شرایط جریان آزاد آرام و آشفته از یک استوانه دایره‌ای مجهز

the Physical Society of London, .36. (1923-1924): 153-157.

- [10] Davis, M. R., Pan, N. H., "Noise generation by the interaction of turbulent jets with circular cylinder", *Journal sound and vibration*, 3. (1989): pp. 427-442.
- [11] Hutcheson, F. V., Brooks, T.F., "Noise radiation from single and multiple rod configurations". *International Journal of Aeroacoustics*, 11(3&4). (2012):291-334.
- [12] Phillips, O. M., "The intensity of Aeolian tone", *Journal of fluid mechanics*, 1. (1956): pp. 607.
- [13] Blake, W. K. "Mechanics of flow-induced sound and vibration". *General Concepts and Elementary Sources*, 1. (1986.): pp. 44-64.
- [14] Curle, N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 231. (1955): pp. 505-51.
- [15] Afshari, A., Dehghan, A. A., Kalantar, V., Farmani, M.. "Experimental investigation of surface pressure spectra beneath turbulent boundary layer over a flat plate with microphone", *Modares Mechanical Engineering*, 17. 1. (2017): pp. 263-272, (in Persian).
- [16] Williams, J. F., Hall, L., "Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane". *Journal of Fluid Mechanics*, 40. (1970): pp. 657-670.
- [17] Fujita, H., Suzuki, H., "The Aeolian tone and the surface pressure in high Reynolds number flow". *AIAA paer*. 99-(2002).
- [18] Casalino, D., Jacob, M., "Prediction of aerodynamic sound from circular rods via spanwise statistical modeling". *Journal of Sound and Vibration*. 262. (2003): pp. 815-844.
- [19] Maryami, R., Dehghan, A. A., Afshari, A., "Experimental investigation of circular cylinder model noise by measuring unsteady surface pressures", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Accepted Manuscript, (2017).
- [20] Fujita, H., "The characteristics of the Aeolian tone radiated from two-dimensional cylinders". *Fluid*

در جریان آزاد آرام در مقایسه با جریان آزاد آشفته بیشتر است.

فهرست علائم

c_0	سرعت صوت، m/s
f	فرکانس، Hz
$P(t)$	نوسانات فشار در حوزه زمان، N/m^2
$P(f)$	نوسانات فشار در حوزه فرکانس، N/m^2
علائم یونانی	
$\phi_{p_i p_i}(f)$	چگالی طیفی خودکار نوسانات فشار میکروفون، $N^2/m^4 Hz$
$\phi_{p_i p_j}(f)$	چگالی طیفی متقابل نوسانات فشار بین دو میکروفون i و j ، $N^2/m^4 Hz$

تقدیر و تشکر

نویسندگان از گروه آیروداکوستیک دانشگاه بریستول به سرپرستی دکتر مهدی آذرپیوند بواسطه پشتیبانی تجهیزاتی و علمی پژوهش حاضر، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Strouhal, V., "Ueber eine besondere art der tonenegung", *Annalen der Physik und Chemie (Leipzig) Series 3*. 5. (1878): pp. 216-251.
- [2] Rayleigh, L., "Acoustical observations II", *Philosophical Magazine*. 7. (1879): pp. 149-162.
- [3] Bernard, H., "Formation des centres de giration a l'arriere d'un obstacle en mouvement", *Compte rendu hebdomudaire des seances de l'Academie des Sciences, Paris* 147. (1908): pp. 839-842.
- [4] Karman, T. V., Rubach, H., "Uber den mechanismus des flussigkeits- und luftwiderstandes", *Physikufische Zeitschrift*, 13. (1912): pp. 49-59.
- [5] Kruger, F. V., Lauth, A., "Theorie der hiebtone". *Annulen der Physik (Leipzig)*, 44, (1914): pp. 801-812.
- [6] Borne, R. D., As quoted in reference[9], *Zeitschrift Hugtechnik*. Vol.3, 30.
- [7] Rayleigh, L., "Aeolian tones". *Philosophical Magazine*. 29, (1915): pp. 434-444.
- [8] Relf, E. F., "On the sound emitted by wires of circular section when exposed to an air current". *Philosophical Magazine*. 42. (1921): pp. 173-176.
- [9] Richardson, E. G., "Aeolian tones", *Proceedings of*

- [31] Uberoi, M. S., Wallis, S., “Effect of Grid Geometry on Turbulence Decay”, *Phys. Fluids*, 9. (1967): pp. 1216-1224.
- [32] Corrsin, S., “Turbulence: experimental methods”. In *Handbuch der Physik* (ed. S. Flugge & C.A. Truesdell), pp. 524-589.
- [33] Roach, P.E., “The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids”, *Int J Heat Fluid Flow*, 8. (1963): pp. 82–92.
- [34] Lavoie, P., Djenidi, L. Antonia, R. A., “Effect of Initial Conditions on the Generation of Coherent Structures in Grid Turbulence”, *Book of Extended Abstracts Whither Turbulence Prediction and Control*, Seoul, Korea, (2006).
- [35] Aufderheide, T., Bode, C., Kozulovic, D., Friedrichs, J., “The generation of higher levels of turbulence in a low-speed cascade wind tunnel by pressurized tubes”, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI).
- [36] Laws, E. M., Livsey, J. L., “Flow through screens”, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 10, (1978): pp.247-266.
- [37] Mohamed, M. S., Larue, J. C., “The decay power law in grid-generated turbulence”, *J. Fluid Mech.* 219. (1990): pp. 195-214.
- [38] Hinze, J., *Turbulence*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, (1975).
- [39] Bendat, J. S., Piersol, A. G., “Random data: analysis and measurement procedures”, John Wiley & Sons, (2011).
- [40] Sagrado, A. G., “Boundary Layer and Trailing Edge Noise Sources”, Ph.D. Thesis, Department of Engineering, University of Cambridge, (2007).
- [41] Herrig, A., Kamruzzaman, M., Würz, W., Wagner, S., “Broadband airfoil trailing-edge noise prediction from measured surface pressures and spanwise length scales, noise notes”, 12. (2013): pp.13-36.
- [42] Achenbach, E., “Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^6$ ”, *J. Fluid Mech.* 34. (1968): PP.625-639.
- [43] Sadeh, W., Saharon, D.B., “Turbulence Effect On Cross flow Around a Circular Cylinder at Subcritical Reynolds Numbers”, *NASA Contractor Dynamics Research*, 42. (2010):1–25.
- [21] Leclercq, D., Doolan, C.J., “The interaction of a bluff body with a vortex wake”. *Journal of Fluids and Structures*, 25. (2009): 867–888.
- [22] Ackerman, J. R., Gostelow, J. P., Rona, A., Carscallen, W. E., “Measurements of Fluctuating Pressures on a Circular Cylinder in Subsonic Cross flow” *AIAA JOURNAL*, 47 (2009): 2121-2131.
- [23] Oguma, Y., Yamagata, T., Fujisawa, N., “Measurement of sound source distribution around a circular cylinder in a uniform flow by combined particle image velocimetry and microphone technique” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 118, (2013):1–11.
- [24] Doolan, C.J., “Computation bluffbody aerodynamic noise prediction using a statistical approach”. *Applied Acoustics*, 71(2010):1194–1203.
- [25] Ali, M.S.M., Doolan, C.J., Wheatley, V., “Aeolian tones generated by a square cylinder with a detached flat plate”. *AIAA Journal*, 51 (2013): 291–301.
- [26] Orselli, R. M., Meneghini, J. R., and Saltara, F., “Two and Three-Dimensional Simulation of Sound Generated by Flow Around a Circular Cylinder” 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference) 11 - 13 May (2009), Miami, Florida.
- [27] Barlow, J. B., Rae, W., Pope, A., “Low-speed wind tunnel testing”, John Wiley & Sons, Inc, (1999).
- [28] Wilkins, S. J., Hall, J. W., “Experimental Investigation of a Tandem Cylinder System With a Yawed Upstream Cylinder”, *Journal of Pressure Vessel Technology*. 136. (2014): pp. 1-8.
- [29] Hutcheson, F. V., Brooks, T. F., Lockard, D. P., Choudhari, M. M., Stead, D. J., “Acoustics and Surface Pressure Measurements from Tandem Cylinder Configurations”, 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2014-2762).
- [30] Salze, É., Bailly, C., Marsden, O., Jondeau, E., Juvé, D., “An experimental characterization of wall pressure wave vector-frequency spectra in the presence of pressure gradients”, in *Proceeding of*, (2014).

- [46] Breuer, M., "Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: Numerical and modeling aspects", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 28. (1998): pp. 1281–1302.
- [47] Jenkins, L.N., Khorrami, M.R., Choudhari, M.M., McGinley, C.B., "Characterization of Unsteady Flow Structures Around Tandem Cylinders for Component Interaction Studies in Airframe Noise", *AIAA paper. AIAA-2005-2812*, May 2005.
- Report 3622.
- [44] Norberg, C., "Interaction between free stream turbulence and vortex shedding for a single tube in cross flow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 23. (1986): pp. 501-514.
- [45] Norberg, C., "Effect of Reynolds number and a low-intensity free stream turbulence on the flow around a circular cylinder", *Ph.D. Thesis, Chalmers university of technology*, (1987).

