



مطالعه تجربی کیفیت و اغتشاش جریان در تونل باد مادون صوت پرند

محدثه فدائی^{۱*}، مهدی کرمی خرم‌آبادی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران

دریافت ۱۴۰۵/۳/۹، بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۵، پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۵

چکیده:

در بررسی تجربی آیرودینامیک جریان هوا روی اجسام، تونل باد از مهم‌ترین تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده است. در این پژوهش تونل باد مادون صوت دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند که سرعت جریان در مقطع آزمون آن تا حدود ۱۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد از لحاظ کیفیت جریان، سطح اغتشاش و توزیع فشار روی دیواره نازل، اتاق آزمون و دیفیوزر قبل از نصب توری در اتاق آرامش مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی کیفیت جریان از ریک ۱۱ شاخه و جهت بررسی سطح اغتشاش از جریان‌سنج سیم داغ تک کاناله استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سرعت نسبت به فرکانس اینورتر خطی است و انطباق خوبی بین نتایج مانومتر دیجیتال و مانومتر آبی وجود دارد. حداکثر سرعت در اتاق آزمون در فرکانس ۵۰ هرتز اینورتر ۱۱۰ متر بر ثانیه است. سطح اغتشاش به‌دست آمده قبل از نصب توری‌ها حدود ۱ درصد می‌باشد و میزان تغییرات سرعت در بیش‌تر نواحی کم‌تر از ۰/۵ درصد است.

* عهده‌دار مکاتبات: mo.fadaei@iau.ac.ir

کلمات کلیدی: تونل باد مادون صوت، کیفیت جریان، جریان‌سنج سیم داغ، ریک فشار

نحوه استناد به این مقاله محدثه فدایی، مهدی کرمی خرم‌آبادی. مطالعه تجربی کیفیت و اغتشاش جریان در تونل باد مادون صوت پرند. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵؛ ۱۳ (۲): ۱-۱۶.

۱-مقدمه

یکی از مهم‌ترین ابزارهای آزمایش‌های تجربی در بررسی جریان‌های خارجی حول اجسام، تونل‌های باد هستند [۳-۱]. تونل باد نه تنها در بررسی جریان اطراف وسایل پرنده [۷-۴]، بلکه اطراف پره توربین باد [۸]، خودروها [۹]، ساختمان‌ها [۱۰]، پل‌ها [۱۱، ۱۲]، تجهیزات مرتبط با مهندسی ورزش [۱۴، ۱۳] و محیط زیست [۱۶، ۱۵] کاربرد دارد. با توجه به نوع کاربرد، طراحی تونل باد نیز متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال در طراحی تونل بادهای محیط زیست لازم است که طول اتاق آزمون برای توسعه طبیعی لایه مرزی و شبیه‌سازی لایه‌های پایینی اتمسفر، به اندازه کافی زیاد باشد. همچنین وجود موانع هندسی به منظور شبیه‌سازی زبری و جریان متلاطم طبیعی سطح زمین لازم است [۱۵]. در خصوص نوع مدار تونل باد، انواع تونل باد مدار بسته و مدار باز وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب مختص به خود را دارند. به عنوان مثال به کارگیری روش‌های آشکارسازی جریان در تونل باد مدار باز ساده‌تر بوده و بازگشت مواد مورد استفاده جهت آشکارسازی جریان به مدار را نخواهیم داشت. همچنین به علت عدم برگشت جریان به داخل مدار مشکل بالا رفتن دمای جریان داخل تونل باد نیز وجود نخواهد داشت [۱]. در رابطه با نوع اتاق آزمون، اتاق آزمون باز، دارای شکاف در دیواره و بسته وجود دارد. به طور معمول اتاق آزمون باز داخل اتاقکی به نام پلنوم قرار می‌گیرد و از مزایای آن حذف اثرات دیواره بر جریان اطراف مدل می‌باشد. در طراحی اتاق آزمون بسته به طور معمول شیب تا حدود نیم درجه به منظور جبران رشد لایه مرزی در نظر گرفته می‌شود. نوع نازل نیز بر اساس منحنی‌های چند جمله‌ای انتخاب می‌شود و بر کیفیت جریان اثرگذار است. از جمله نازل‌های معروف به نازل مهتا و میخائیل می‌توان اشاره کرد. نسبت مساحت ورودی به خروجی نازل معمولاً عددی بین ۶ تا ۹ است و انتخاب این عدد بر تغییرات سرعت در خارج از لایه مرزی و شدت اغتشاش جریان مؤثر خواهد بود [۱۷]. در خصوص دیفیوزر زاویه انبساط مخروطی معادل و نسبت مساحت از پارامترهای مهمی هستند که بر جدایش و کیفیت جریان تأثیرگذار می‌باشند [۱۸]. وقوع جدایش ارتعاشات روی دیواره، بارگذاری نوسانی روی فن، تغییر سرعت جریان در مقطع آزمون و افت انرژی را به دنبال خواهد داشت [۱۹]. همچنین در پیش‌بینی فاصله توری‌های نصب شده در اتاق آرامش و تراکم مش توری‌ها ملاحظات وجود دارد، از جمله این که فاصله بین توری‌ها حدود ۰/۲ قطر محفظه آرامش و فاصله بهینه آخرین توری با ورودی نازل حدود ۰/۲ مقطع آزمون باشد. فاصله کم‌تر موجب اعوجاج جریان عبوری و بیش‌تر سبب رشد لایه مرزی می‌شود. تراکم شبکه بزرگ‌تر از ۰/۵۷ و فاصله بین توری‌ها ۳۰ برابر اندازه شبکه باشد [۱۸]. برای طراحی فن و تخمین توان مورد نیاز الکتروموتور نیز لازم است افت‌های انرژی در بخش‌های مختلف به دقت محاسبه شود و سرعت مورد نیاز در اتاق آزمون مدنظر قرار گیرد [۱۸]. علاوه بر ملاحظات طراحی یکی از مهم‌ترین گام‌ها قبل از به کارگیری هر نوع تونل باد برای آزمایشات تحقیقاتی و صنعتی، کالیبراسیون تونل باد [۲۱، ۲۰] و تجهیزات اندازه‌گیری آن مانند سنسورهای فشار و بالانس [۲۶-۲۲] است. تونل‌های باد از اوایل قرن ۱۹ میلادی ابداع شده و دانش ساخت و به کارگیری آن تا به امروز توسعه یافته است [۲۷]. تونل‌های باد مادون صوت، گذر صوتی و مافوق صوت متعددی در ایران ساخته شده و در حال استفاده هستند. محمدعلی اردکانی [۲۸] در سال ۱۳۹۲ بهینه‌سازی طول نازل تونل باد عمودی را به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار داد. نازل یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در سازه تونل باد است که ساختار آن بر کیفیت جریان و نیز هزینه ساخت اثرگذار است. بررسی مذکور نشان داد که نازلی با نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی ۶/۲۵، طول به قطر ورودی ۰/۹ و فاصله نقطه عطف از ورودی نازل نسبت به طول آن ۰/۱۷۵ برای طراحی تونل باد مناسب است. نسبت طول به قطر ورودی نازل روی شدت اغتشاش اثر ندارد اما روی توزیع سرعت در خروجی نازل مؤثر است. نشاط و همکاران [۲۹] در تونل باد مدار باز دمنده دانشگاه حکیم سبزواری به بررسی اثر سر بالک بر کاهش گردابه‌های نوک بال ریز پهناد پرداختند. این تونل باد در مطالعه انجام شده توسط خوشنویس و همکاران [۳۰] روی دنباله جریان پشت یک سیلندر بیضی شکل نیز استفاده شد. در این مطالعه از یک سیم اغتشاش‌ساز برای کنترل

جریان و کاهش پسا استفاده شد. نتایج نشان داد که مکان نصب سیم اغتشاش ساز روی مدل و قطر آن تأثیر به سزایی روی کاهش پسا و کنترل جریان دارد. تأثیر سیم اغتشاش ساز به این صورت است که سبب انتقال لایه مرزی و کاهش عرض دنباله می شود. در یک قطر مشخص برای رینولدزهای بالاتر باید مکان سیم به نقطه سکون نزدیک تر باشد و در رینولدز مشخص با افزایش قطر سیم باید مکان آن به نقطه سکون نزدیک تر باشد.

خشخو و همکاران [۳۱] به مطالعه تجربی استفاده از عملگر پلاسما تخلیه سد دی الکتریک به عنوان وینگلت برای بال با مقطع ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ پرداختند. این مطالعه در تونل باد مادون صوت دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شد و تأثیر عدد رینولدز و ولتاژ در زوایای مختلف بررسی شد که افزایش ۲۵ درصدی راندمان را در پی داشت. تحلیل فرکانسی ریزش گردابه در کسکید کمپرسور محوری در اعداد رینولدز مختلف در تونل باد مدار باز دمنده دانشگاه علم و صنعت توسط شجاعی فرد و همکاران [۳۲] انجام شد. نتایج نشان داد که کاهش زاویه حمله سبب بزرگ تر شدن ناحیه دنباله می شود و با افزایش رینولدز فرکانس ریزش گردابه بیش تر می شود. در این مطالعه عدم قطعیت تجهیزات آزمایشی نیز مورد توجه قرار گرفت. یکی از مهم ترین گام ها قبل از به کارگیری یک تونل باد کالیبراسیون آن می باشد که شامل کالیبراسیون پارامترهای جریان و تجهیزات اندازه گیری مورد استفاده است [۲۰]. دهقان منشادی و سلطانی [۳۳، ۳۴] به بررسی کیفیت جریان در تونل باد مادون صوت جهاد کشاورزی استان فارس و ارائه روشی برای کاهش توربولانس در اتاق آزمون آن پرداختند. در این مطالعه در مقاطع خاصی از اتاق آرامش، نازل و قبل از ورودی اتاق آزمون سیم های با ضخامت های مختلف میلی متری نصب گردید تا با تسریع فرآیند گذار معکوس جریان از توربولانس به آرام، منجر به یکنواختی بیش تر جریان در اتاق آزمون گردد. زواری و فراهانی [۳۵] تونل باد مادون صوت مقیاس کوچک دانشگاه صنعتی شریف را راه اندازی و کالیبراسیون کردند. در این مطالعه شبیه سازی عددی جریان در نازل، اتاق آزمون و دیفیوزر نیز انجام شد. نتایج نشان داد که در مساحت عمده ای از مقطع آزمون جریان یکنواخت می باشد. میزان تغییرات سرعت استاندارد در محفظه آزمون باید کم تر از ۰/۲۵ باشد که در برخی مکان ها و فرکانس ۳۰ تا ۵۰ هرتز به ۰/۴۵ تا ۰/۶۷ درصد نیز می رسد. به علت عدم در اختیار داشتن دستگاه جریان سنج سیم داغ به منظور تعیین سطح اغتشاش اتاق آزمون از کره اغتشاشی به منظور تعیین میزان اغتشاش استفاده شد و میزان شدت اغتشاش ۰/۵ درصد تعیین گردید. آراسته و جوارشکیان [۳۶] در مطالعه ای تجربی یکنواختی جریان هوا در تونل باد مادون صوت دانشگاه فردوسی مشهد را مورد بررسی قرار دادند و نشان داده شد که بهترین زمان داده برداری ۵ ثانیه است. هم چنین در این آزمایش دور موتور و سرعت در اتاق آزمون با استفاده از بادسنج و جریان سنج سیم داغ معین گردید. همان طور که بیان شد تونل های باد مادون صوتی که در مطالعات فوق استفاده شده اند دارای سرعت هایی پائین تر از ۱۰۰ متر بر ثانیه هستند. در مطالعه حاضر بررسی کیفیت و سطح اغتشاش جریان در مقطع تست تونل باد مادون صوت مدار باز دمنده دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند انجام شده است که سرعت جریان در اتاق آزمون آن در فرکانس ۵۰ هرتز اینورتر، به حدود ۱۱۰ متر بر ثانیه می رسد و بدین جهت قابلیت استفاده در بازه گسترده تری از تحقیقات آیرودینامیک مادون صوت را دارا است. این تونل باد قبلاً از لحاظ کیفیت جریان مورد بررسی قرار نگرفته است و با توجه به این که هر تونل باد که جدید طراحی شده است ویژگی های منحصر به فردی از لحاظ کیفیت جریان دارد، در این پژوهش قبل از بهره برداری بررسی کیفیت جریان انجام شده است. در ابتدا در فرکانس های مختلف اینورتر داده های مانومتر آبی برداشت شده و با مانومتر دیجیتالی مقایسه شده است. سپس با استفاده از مانیوفولد سنسورهای فشار با یکدیگر سری و کالیبره شده اند و پس از آن برای سنجش یکنواختی جریان، با قرار دادن ریک ۱۱ شاخه در ۹ مکان مختلف توزیع سرعت در نقاط مختلف اتاق آزمون سنجیده شده است. فشار نقاط روی دیواره توسط نقاط ایجاد شده روی سطح بنده و اتصال آن ها به سنسورهای فشار، سنجیده شده است. هم چنین به منظور تعیین اغتشاش جریان در شرایطی که توری در اتاق آرامش نصب نشده و تنها لانه زنبوری در ورودی نازل نصب است از جریان سنج سیم داغ استفاده شده است.

۲- تجهیزات آزمون

۱-۲ ساختار تونل باد

برای انجام این پژوهش از تونل باد مادون صوت دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند استفاده شده است. طول کلی این تونل باد با احتساب ورودی جریان به لانه زنبوری، اتاق آرامش، نازل، اتاق آزمون تا خروجی از دیفیوزر ۱۷ متر و ارتفاع آن ۳ متر است. روی دیواره ۱۲ نقطه داده‌برداری به‌منظور سنجش فشار استاتیک ایجاد شده است که ۷ نقطه در طول نازل، سه نقطه در طول دیواره جانبی اتاق آزمون و سه نقطه در طول دیفیوزر واقع شده است. شکل (۱) تونل باد و نقاط داده‌برداری در طول دیواره را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) تونل باد مادون صوت دانشگاه آزاد واحد پرند ب) نقاط داده‌برداری در طول دیواره

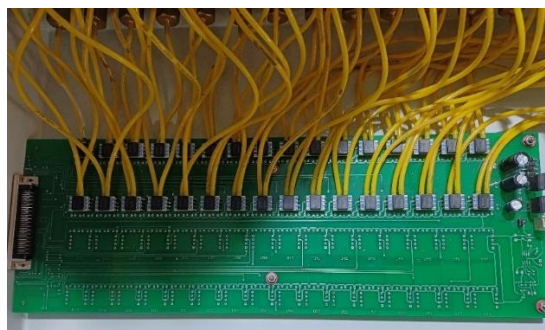
نازل این تونل باد مادون صوت دارای نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی ۹ است و اتاق آزمون آن دارای سطح مقطع 60×60 سانتی‌متر مربع و طول ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. نوع تونل مدار باز مکشی و تغییر دور موتور توسط کنترل پنل متصل به اینورتر صورت می‌گیرد و سبب تغییر سرعت می‌شود. فن دستگاه دارای ۱۲ پره متحرک و ۱۲ پره ثابت است، قطر آن در حدود $1/4$ متر با توجه به ابعاد دیفیوزر تونل و الکتروموتور دارای توان نامی ۱۱۰ کیلووات می‌باشد. حداکثر دور موتور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه است. شکل (۲) تصویری از پره‌های فن دستگاه را نشان می‌دهد.



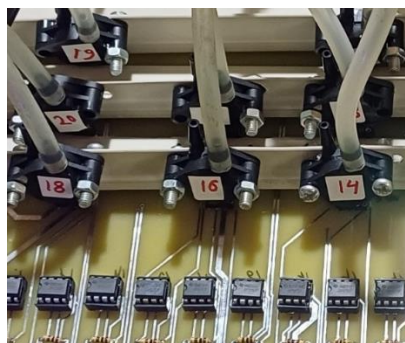
شکل ۲. پره‌های فن تونل باد

۲-۲ سنسورهای فشار

تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان در این پژوهش ۳۱ سنسور فشار ۱۶ میلی‌بار و ۲۰ سنسور فشار ۱۰۰ میلی‌بار است. شکل (۳) سنسورهای فشار را که داخل جعبه فشار نصب شده‌اند، نشان می‌دهد.



(الف)



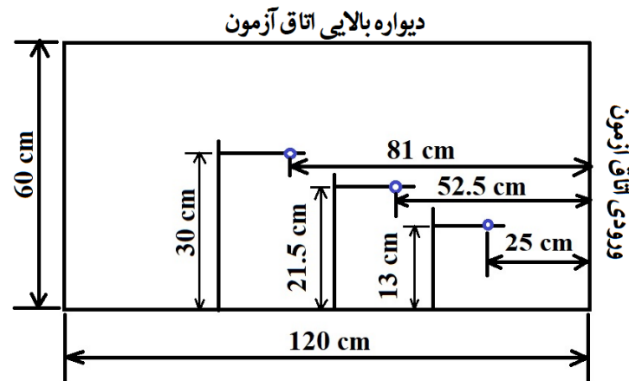
(ب)

شکل ۳. سنسورهای فشار (الف) ۱۶ میلی‌بار (ب) نمای بزرگ‌تر از سنسورهای ۱۶ میلی‌بار (ج) ۱۰۰ میلی‌بار



شکل ۴. ریک یازده شاخه

ریک ۱۱ شاخه در شکل (۴) و فاصله پورت استاتیک ریک فشار تا ورودی اتاق آزمون در سه مکان در راستای محور x در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. نمای شماتیک از مکان‌های قرارگیری ریک فشار

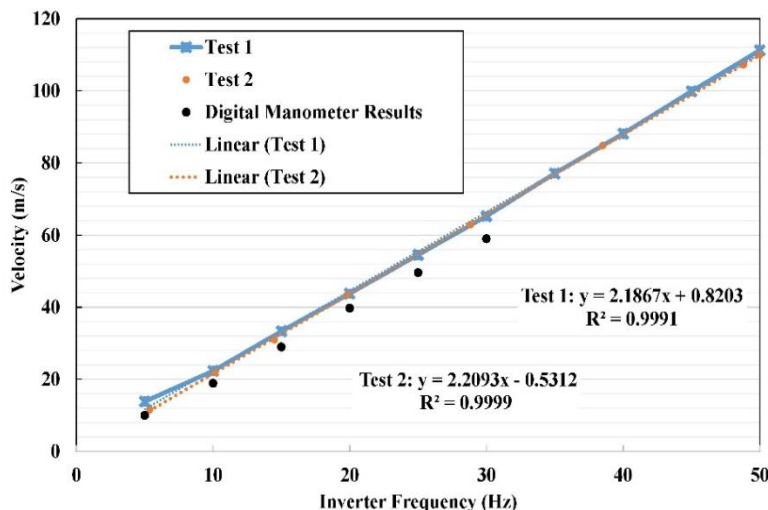
هم‌چنین برای سنجش شدت اغتشاش جریان در اتاق آزمون از جریان سنج سیم داغ تک کاناله استفاده شده است. شکل (۷) نمایی از پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ را نشان می‌دهد. هم‌چنین لوله پیتو به‌منظور کالیبراسیون آن مطابق با شکل (۷) نصب و به سنسورهای فشار متصل شده است.



شکل ۶. پراب دستگاه جریان سنج سیم داغ متصل در کنار لوله پیتو

۳- نتایج کیفیت جریان در تونل باد

به منظور اعتبارسنجی آزمایشات ابتدا نتایج به دست آمده از مانومتر آبی و دیجیتال مدل GM510 مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل (۷) ملاحظه می‌شود نتایج دارای حالت خطی هستند و انطباق مناسبی بین نتایج وجود دارد. همچنین به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، دو بار تکرار آزمایش در شکل (۷) ارائه شده است. در محاسبات انجام شده با توجه به دمای روز آزمایش ۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفریک محل آزمایش ۸۸۹ هکتوپاسکال (میلی‌بار)، میزان چگالی ۱/۰۲۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شده است.



شکل ۷. مقایسه سرعت نسبت به فرکانس اینورتر مانومتر آبی و دیجیتال

۳-۱ محاسبه عدم قطعیت

به منظور اطمینان از داده‌برداری هر کدام از آزمایش‌ها سه بار تکرار شده است و با استفاده از فرمول (۳-۲) انحراف معیار آن محاسبه شده است. همچنین عدم قطعیت استاندارد میانگین با استفاده از فرمول (۳-۳) محاسبه می‌شود [۱۸].

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r_k \quad (3-1)$$

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (r_k - \bar{r})^2} \quad (3-2)$$

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (3-3)$$

در این رابطه N تعداد داده‌برداری، r_k مقدار سرعت خوانده شده از سنسور فشار، S_r انحراف معیار و u_A عدم قطعیت استاندارد میانگین ناشی از تکرار است. برای سه تکرار در فرکانس ۲۰ هرتز این میزان ۴/۶ محاسبه شده است.

۳-۲ بررسی کیفیت جریان

یکنواختی جریان در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری شده توسط ریک جریان در شکل (۸) نشان داده شده است. به منظور محاسبه میزان انحراف از سرعت میانگین از فرمول (۳-۴) تا (۳-۷) استفاده می‌شود [۱۸، ۲۷].

$$V_n = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3-4)$$

$$\Delta P = k a_n \quad (3-5)$$

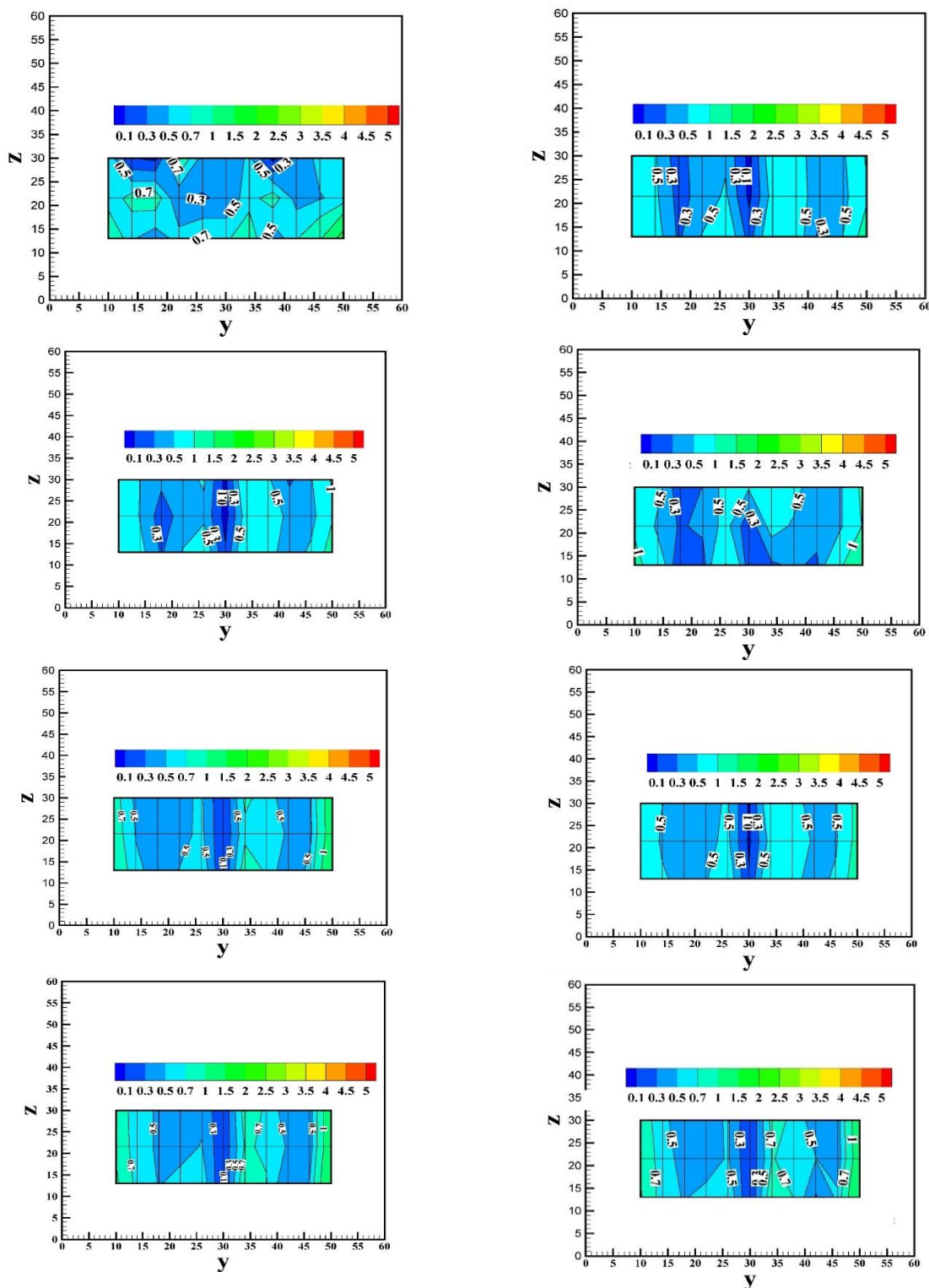
$$V_{avg} = \sum_{n=1}^{11} V_n \quad (3-6)$$

$$\text{Velocity Deviation from mean} = |V_n - V_{avg}| \times 100/V_{avg} \quad (3-7)$$

در روابط فوق V_n سرعت در یک فرکانس مشخص در مکان‌های مختلف از ریک ۱۱ شاخه است. a_n مقدار ولتاژ خوانده شده مربوط به سنسور متصل به هر کدام از شاخه‌ها و k ضریب کالیبراسیون هر سنسور است. V_{avg} متوسط سرعت و رابطه (۳-۷) میزان انحراف از مقدار متوسط سرعت است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان انحراف سرعت از سرعت متوسط در بیش‌تر مناطق کم‌تر از ۰/۵ درصد است که در حالت استاندارد می‌بایست حدود ۰/۲۵ درصد باشد [۱۸، ۲۰، ۲۷، ۳۷] و این میزان با نصب توری بهبود نیز خواهد یافت.

شدت اغتشاش جریان قبل از نسب توری‌ها در سرعت بین ۱۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه در شکل ۹ نشان داده شده است. به منظور محاسبه شدت اغتشاش ابتدا کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ مطابق شکل ۶ به کمک لوله پیتوت استاتیک متصل به سنسورهای فشار تفاضلی انجام شده است.



شکل ۸. کانتورهای توزیع انحراف سرعت از میزان میانگین در مقاطع و سرعت‌های مختلف (راست) ۵/۵ سانتی‌متر چپ) ۸۱
سانتی‌متر، ردیف (۱) ۱۰، ردیف (۲) ۴۰، ردیف (۳) ۸۰، ردیف (۴) ۱۱۲ متر بر ثانیه

منحنی کالیبراسیون به دست آمده یک منحنی درجه سوم است و در آن مطابق با معادله (۳-۸) سرعت تابعی درجه سوم از ولتاژ جریان سنج سیم داغ است.

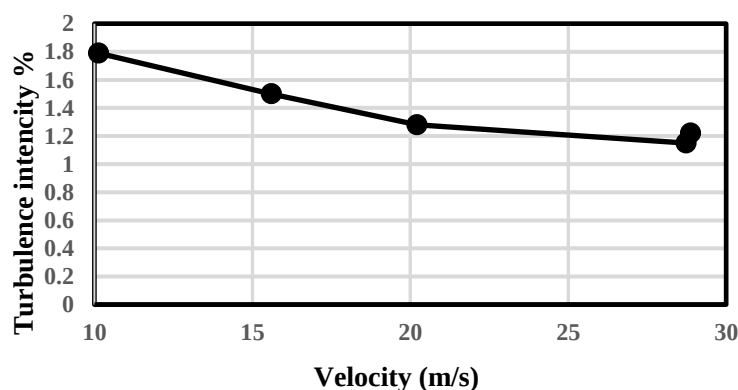
$$u = aV^3 + bV^2 + c \quad (3-8)$$

در رابطه فوق V ولتاژ و u سرعت می باشد. سپس شدت اغتشاش جریان از رابطه (۳-۹) محاسبه می شود.

$$TI = \frac{u'}{u_{avg}} \quad (3-9)$$

که u' انحراف جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت و مانند رابطه (۳-۱) و (۳-۲) قابل محاسبه است. u_{avg} سرعت متوسط است. تعداد ۳۰۰۰۰ داده با فرکانس داده برداری ۱ کیلوهرتز به منظور محاسبه شدت اغتشاشات در هر سرعت برداشت شده است [۱۸،۲۷].

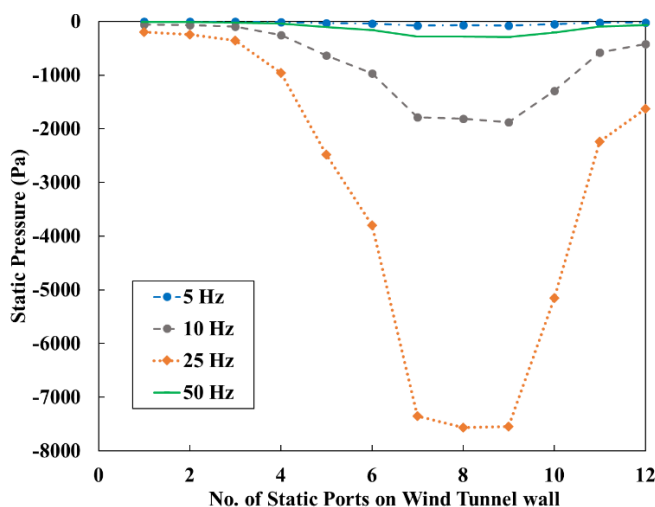
همان طور که در شکل (۹) ملاحظه می شود شدت اغتشاش در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه حدود ۱/۸ درصد می باشد و با افزایش سرعت به حدود ۱ درصد می رسد. این موضوع لزوم نسب توری ها را کاملاً مشخص می کند.



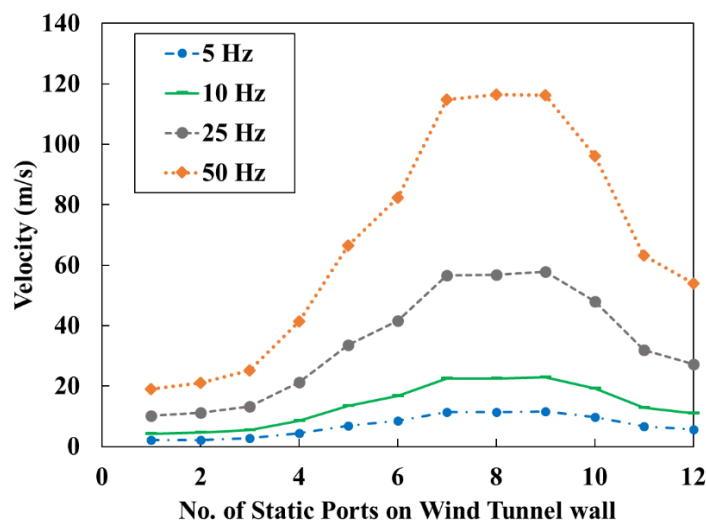
شکل ۹. شدت اغتشاش جریان در سرعت های مختلف بدون نصب توری

توزیع فشار استاتیک در راستای طولی روی دیواره از نازل تا دیفیوزر نیز یکی از مواردی است که هنگام کالیبراسیون تونل باد مورد بررسی قرار می گیرد تا ارزیابی از میزان درستی طراحی های نازل، اتاق آزمون و دیفیوزر ارائه دهد و همچنین ورودی مناسب برای روش های عددی را به منظور مقایسه صحیح با آزمایش های تجربی فراهم سازد. در شکل (۱۰) توزیع فشار استاتیک از نازل تا دیفیوزر در ۱۲ نقطه مختلف در طول دیواره در فرکانس های ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ هرتز نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که همان طور که انتظار می رود نازل سبب کاهش فشار استاتیک شده است و دیفیوزر سبب افزایش فشار استاتیک می شود. هر چه میزان فرکانس و در واقع میزان سرعت جریان بیش تر می شود میزان کاهش فشار استاتیک در نازل و افزایش آن در دیفیوزر بیش تر خواهد بود. شیب منفی در طول اتاق آزمون نشان از مکش ناچیز جریان در اتاق آزمون به دلیل رشد لایه مرزی همان طور که مورد انتظار است، دارد. با توجه به رشد لایه مرزی و کاهش سطح مقطع در انتهای اتاق آزمون بنا به قانون بقای جرم میزان سرعت و متناظر با آن فشار دینامیک افزایش می یابد و در نتیجه مطابق رابطه برنولی فشار استاتیک در انتهای اتاق آزمون کم تر از ورودی خواهد بود. این موضوع سبب ایجاد یک جریان مکشی در اتاق آزمون می شود که باید میزان آن برای اتاق آزمون خالی کوچک بوده و با افزایش

شیب نیم درصدی در طول اتاق آزمون سعی می‌شود از وقوع آن جلوگیری شود. همچنین در شکل (۱۱) سرعت در نقاط مختلف تونل باد نشان داده شده است. نقش نازل در افزایش سرعت، نقش دیفیوزر در کاهش سرعت و حداکثر سرعت در اتاق آزمون تونل باد با توجه به شکل قابل تشخیص است.



شکل ۱۰. فشار استاتیک در نقاط مختلف دیواره



شکل ۱۱. سرعت در نقاط مختلف تونل باد

۴- نتیجه‌گیری

یکی از موارد مهم در بهره‌برداری از هر تونل بادی که جدید طراحی شده است بررسی کیفیت جریان آن می‌باشد. با تعیین کیفیت جریان، سطح اغتشاش جریان و انحراف زاویه‌ای جریان می‌توان علاوه بر اطمینان از صحت نتایج در آزمایش‌های تونل باد روی اجسام مختلف ضرایب تصحیح لازم را روی نتایج اعمال کرد. لذا در این پژوهش تونل بادی که جدید طراحی و اجرا گردیده است مورد بررسی قرار گرفت. در این خصوص از ابزارهایی مانند لوله پیتوت استاتیک، جریان‌سنج سیم داغ، ریک فشار، سنسورهای تفاضلی فشار و مانومتر آبی استفاده می‌شود. در این مطالعه بررسی کیفیت جریان در تونل باد مادون صوت پرند با استفاده از ابزارهای فوق

انجام پذیرفته است. ابتدا مقایسه ای به منظور اعتبارسنجی نتایج در خصوص فشار به دست آمده از مانومتر آبی و دیجیتال صورت گرفته و انطباق مناسبی مشاهده شد. سپس سنسورهای فشار با اتصال به منیوفولد به صورت هم زمان کالیبره شدند و عدم قطعیت ناشی از تکرار برای یکی از فرکانس های اینورتر به عنوان نمونه محاسبه شد که حدود ۵ درصد به دست آمد. نتایج حاکی از کیفیت متوسط در حالت بدون نصب توری و تنها در حضور لانه زنبوری است. انحراف مقادیر سرعت در نقاط مختلف مورد بررسی نسبت به مقدار متوسط در حدود ۰/۵ درصد است که می بایست به حدود ۰/۲۵ درصد کاهش یابد. میزان سرعت در اتاق آزمون در فرکانس ۵۰ هرتز اینورتر ۱۱۰ متر بر ثانیه و توزیع فشار استاتیک در طول دیواره در سطح مورد انتظار بوده است. مقدار اغتشاش جریان در حد ۱ درصد است و لزوم نصب توری ها را مشخص می کند. یکی از محدودیت های بررسی صورت گرفته تک کاناله بودن دستگاه جریان سنج سیم داغ است که سبب می شود تنها مولفه سرعت در راستای جریان قابل اندازه گیری باشد. در این بررسی فرض شده شدت اغتشاش در دو راستای عرضی و عمودی تقریباً یکسان باشد که در تحقیقات آینده جای بررسی بیش تری دارد. همچنین عدم قطعیت به دست آمده مربوط به تکرارپذیری آزمایش ها می باشد و لازم است در مطالعات بعدی سهم خطای تجهیزات تعیین شود. در رابطه با نصب توری فواصل توری ها و تراکم شبکه توری از ملاحظات مهم طراحی می باشد. در مراحل بعدی پژوهش اثر نصب سه لایه توری با تراکم مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مراجع

- [1] Jalal A, Hassan W, Buzal MZ, Mali MA, et al., (2026). Design, optimization, and performance validation of a subsonic wind tunnel for aerodynamic investigations. Next Energy, Vol 12; 100652, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X26001420>
- [2] Recommended Practice: Calibration of Subsonic and Transonic Wind Tunnels (AIAA R-093-2003(2018)), <https://doi.org/10.2514/4.476624.001>
- [3] Kalyani Panigrahi, Brahmini Priya, Sabareesh Geetha Rajasekharan, P. S. Gurugubelli; Construction & calibration of a low-speed subsonic wind tunnel for experimental investigations on flow-induced instabilities. AIP Conf. Proc. 26 December 2023; 2943 (1): 020013. <https://doi.org.access.semantak.com/10.1063/5.0183078>
- [4] A.R. Davari, A Simple Analytical Model to Describe the Impact of Wing on the Flow field over the Tail in Subsonic Flow, Aerosp. Sci. Technol. (2018), 17; 31682-6. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.017>
- [5] A. Ebrahimi et al., Experimental study of stall control over an airfoil with dual excitation of separated shear layers, Aerosp. Sci. Technol. (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.09.027>
- [6] Ghamkhar K, Ebrahimi A, Shariloo K. Wavelet analysis of the flow field around an oscillating airfoil undergoing pure pitching motion at low Reynolds number. Phys. Fluids 35, 063607 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0154125>
- [7] Oo NL, Richards PJ, Sharma RN. Ice-Induced Separation Bubble on RG-15 Airfoil at Low Reynolds Number. AIAA Journal. <https://doi.org/10.2514/1.J059257>
- [8] Moutun S, Schaffarczyk AP, Timmer N. Wind Tunnel Tests of a Thick Wind Turbine Airfoil. Wind Energy, 2024; 27:994–1010. <https://doi.org/10.1002/we.2938>

- [9] Olivier Flamand, Philippe Delpech, Pierre Palier, Jean-Paul Bouchet, Benefit of Wind Tunnels with Large Test Sections for Wind Engineering Applications. Mathematical Modelling in Civil Engineering, Vol. 15- No. 2: 14- 19- 2019. <https://doi.org/10.2478/mmce-2019-0005>
- [10] Yu P, Wind Tunnel Technology in Green Building Environment. Nature Environment and Pollution Technology. Vol 15(1); 237-242; 2016.
- [11] G. Diana a, M. Falco a, S. Bruni a, A. Cigada a, et. al., Comparisons between wind tunnel tests on a full aeroelastic model of the proposed bridge over Stretto di Messina and numerical results. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 54-55; 101-113, 1995. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00034-B](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00034-B).
- [12] Hao Hu a, Huoyue Xiang a b, Kehong Liu a, Hongyu Chen a, Yongle Li. Experiments of aerodynamic admittances for moving vehicles on bridges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 226; 105041, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105041>
- [13] Fabio Malizia a b, Bert Blocken. Bicycle aerodynamics: History, state-of-the-art and future perspectives. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 200; 104134, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104134>
- [14] Ismail, Erlanda Augupta Pane, Reza Abdu Rahman. An open design for a low-cost open-loop subsonic wind tunnel for aerodynamic measurement and characterization. HardwareX. Volume 12, October 2022, e00352. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00352>
- [15] Colette Alexia Preston , Cheryl McKenna Neuman & J. Wayne Boulton (2020): A Wind Tunnel and Field Evaluation of Various Dust Suppressants, Journal of the Air & Waste Management Association, <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1779148>
- [۱۶] امیر امرایی، بهناز دهرآزما، تثبیت خاکهای ریزدانه به وسیله مواد طبیعی به منظور جلوگیری از پیدایش ریزگردها در اثر وزش باد. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، آبان ۱۳۹۷.
- [17] Lakshman R, Ranjan Basak. Analysis of transformed fifth order polynomial curve for the contraction of wind tunnel by using OpenFOAM, International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 377 (2018) 012048 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012048>
- [۱۸] ارسلان قجر، آرش شمس طالقانی، مهران مصدری، ۱۴۰۱، اصول طراحی و کالیبراسیون تونل های باد سرعت پائین، انتشارات سازمان صنایع هوایی
- [19] Louis Cattafesta, Chris Bahr, and Jose Mathew, Fundamentals of Wind-Tunnel Design. Encyclopedia of Aerospace Engineering. 2010, <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>
- [20] Carl Knowlen, Matthew Hudgins, Kirsten Wind Tunnel Flow Quality Assessment: 2018, 7-11 January 2019, San Diego, California, AIAA SciTech Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1944>
- [21] Marcelo Assato, Roberto M Girardi, Nide G C R Fico Jr, Ita's Low Speed Wind Tunnel: Calibration of The Test Section Flow. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2004 Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 - Dec. 03, 2004

[22] Rajkumar Khot, Khot, S B Kandagal Kandagal, J Sharana Basavaraja. Design, Optimization and Calibration of 6-Component External Wind Tunnel Balance. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 11, Issue 1, 525-532, January-2020.

[23] James Julian, Tulus Hidayat Yusanto, Adi Winarta, Fitri Wahyuni, et al., Numerical analysis of 6-DOF independent external balance for subsonic wind tunnel. Engineering Science and Technology, an International Journal 54 (2024) 101704. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101704>

[24] Marija Samardžić, Zoran Anastasijević, Dragan Marinkovski, External Six-Component Strain Gauge Balance for Low Speed Wind Tunnels. Scientific Technical Review, 2014, Vol. 64, No.3, pp.40-46.

[25] Ahmed ABOELEZZ, Yunes ELQUDSI, Mostafa HASSANALIAN, Ahmed DESOKI, Wind Tunnel Calibration, Corrections and Experimental Validation For Fixed-Wing Micro Air Vehicles Measurements. Aviation, 2019 Volume 23 Issue 4: 104–113. <https://doi.org/10.3846/aviation.2019.11975>

[26] Rhew R. Wind Tunnel Force Balance Calibration Study – Interim Results. 8th International Symposium on Strain-Gauge Balances.

[۲۷] محمدعلی اردکانی، تونل باد با سرعت پائین اصول طراحی و کاربرد، ۱۳۸۸، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و سازمان پژوهش های علمی و صنعتی

[۲۸] اردکانی، محمدعلی. بهینه کردن طول نازل تونل باد عمودی با استفاده از روش های عددی و تجربی. مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۳۹۲؛ ۳(۳): ۱۴۷-۱۳۷. doi: 10.22044/jsfm.2013.218

[۲۹] نشاط، امیررضا، خوشنویس، عبدالامیر بک، ایزدی یزدی، محمد جواد. بررسی تجربی اثرات سربالک منحنی دوباله در گردابه های نوک بال ریز پهنپاد با جریان سنج سیم داغ. مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۳۹۷؛ ۸(۲): ۲۰۴-۱۹۳. doi: 10.22044/jsfm.2018.6546.2534

[۳۰] بک خوشنویس، عبدالامیر، نظری، سجاد، ایزدی یزدی، محمد جواد. بررسی تجربی دنباله در یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز. مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۳۹۶؛ ۷(۲): ۱۶۳-۱۴۹. doi: 10.22044/jsfm.2017.3999.2067

[۳۱] خوشخو، روح الله، مانی، محمود، صالحی ابری، سید محمدرضا، آقایی ملک آبادی، معصومه. بررسی تجربی استفاده از عملگر پلاσμα تخلیه سد دی الکتریک DBD به عنوان وینگلت مجازی. مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۴۰۳؛ ۱۴(۱): ۹۲-۷۷. doi: 10.22044/jsfm.2024.13888.3815

[۳۲] شجاعی فرد، محمد حسن، رجبی اسلامی، مسعود، زارع، جواد. تحلیل فرکانسی ریزش گردابه در کسکید کمپرسور محوری در اعداد رینولدز متوسط. مکانیک سازه ها و شاره ها، ۱۳۹۵؛ ۶(۱): ۲۷-۱۹. doi: 10.22044/jsfm.2016.687

[۳۳] مجتبی دهقان منشادی، محمدرضا سلطانی ۱۳۸۲، بررسی کیفیت جریان در مقطع کاری یک تونل باد زیر صوت با استفاده از سیم داغ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف

[۳۴] مجتبی دهقان منشادی، محمدرضا سلطانی، کاوه قربانیان ۱۳۸۸، ارائه روشی برای کاهش توربولانس در تونل های باد مادون صوت، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف

[۳۵] سام زواری، محمد فراهانی، ۱۴۰۱، راه اندازی، شبیه سازی و کالیبراسیون تونل باد زیر صوت SARL، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف

[۳۶] مصطفی آراسته، محمدحسن جوارشکیان، ۱۳۹۸، بررسی تجربی یکنواختی سرعت هوا در مقطع آزمایش تونل باد به وسیله جریان سنج سیم داغ، بیست و هفتمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، ۱۰ تا ۱۲ اردیبهشت، تهران، ایران

[37] Jewel B. Barlow, William H. Rae, Alan Pope. Low-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley & Sons, 1999.

Experimental Study of Flow Uniformity and Turbulence Level of Parand Subsonic Wind Tunnel

Mohaddeseh Fadaei^{1*}, Mahdi Karami Khorramabadi²

^{1*} Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ram.C., Islamic Azad University, Ramsar, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Khor.C., Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Received: Spring 2026

Accepted: Summer 2026

Abstract:

In the experimental study of aerodynamics of air flow over objects, the wind tunnel is one of the most important laboratory equipment used. In this study, the subsonic wind tunnel of the Islamic Azad University, Parand Branch, whose flow velocity in the test section reaches about 110 m/s, has been investigated in terms of flow quality, turbulence level, and pressure distribution on the nozzle wall, test section, and diffuser before installing the grids in the settling chamber. An 11-branch rake was used to investigate the flow quality, and a single-channel hot-wire anemometer was used to investigate the turbulence level. The results show that the velocity changes are linear with respect to the inverter frequency, and there is a good agreement between the results of the digital manometer and the water manometer. The maximum velocity in the test section at a frequency of 50 Hz of the inverter is 110 m/s. The turbulence level obtained before installing the grids is about 1 percent, and the rate of velocity changes in most areas is less than 0.5 percent.

Keywords: subsonic wind tunnel, flow uniformity, Hotwire anemometer, Pressure rake.

*corresponding author: mo.fadaei@iau.ac.ir

Cite this article as: Mohaddeseh Fadaei, Mahdi Karami Khorramabadi, Experimental Study of Flow Uniformity and Turbulence Level of Parand Subsonic Wind Tunnel. **Journal of Energy Conversion**, 2026, 13(2), 1-16.