

بررسی تجربی تأثیر دهانه ناقوسی شکل بر عملکرد نازل

دانشیار، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده مهندسی مکانیک

محمدعلی اردکانی*

چکیده

نازل یکی از اجزای مهم تونل باد می‌باشد که وظیفه آن شتاب دادن به جریان هوا، کاهش غیر یکنواختی و شدت اغتشاش‌های آن، در خروجی نازل می‌باشد. به منظور کاهش هزینه ساخت در برخی تونل‌بادهای مدار باز مکنده، به‌ویژه تونل‌بادهای عمودی، اتاق آرامش قبل از نازل را ناساخته و به جای آن دهانه ورودی به شکل ناقوس طراحی می‌شود. در این تحقیق تجربی، با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ، جریان در ورودی و خروجی نازلی که دارای دهانه ورودی و یا فاقد آن است، مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد نازل در تونل‌بادهای از نوع دم‌نده و مکنده مشابه بوده، همچنین تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل در جهت کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا قابل توجه نمی‌باشد، ولی استفاده از دهانه ناقوسی شکل در ورودی نازل سبب کاهش ۷٪ تلفات می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نازل، تونل باد، دهانه ورودی، جریان‌سنج سیم داغ، شدت اغتشاش‌ها، غیریکنواختی جریان

Experimental Investigation on the Effect of Bell Mouth on Nozzle Performance

M. A. Ardekani

Associate Professor, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Institute of Mechanical Engineering

Abstract

Nozzle is an important component of wind tunnel. Its main functions: conversion of static pressure to dynamic pressure and reduction of turbulence intensity and helping in uniformity of the velocity profile in the test section of wind tunnel. In order to reduction of wind tunnel building costs, in some wind tunnel special vertical type, setting chamber may be replaced by a bell mouth at the nozzle inlet. Experimental methods such as hot wire anemometry have been used in this research. Result show that the effect of nozzle in blowing and suction type of wind tunnels is similar. Effect of bell mouth at the nozzle inlet is not significant for turbulence intensity reduction, but bell mouth of the nozzle inlet reduce the losses of nozzle about 7%.

Keywords: Nozzle, Wind Tunnel, Bell mouth, Hot-wire Anemometer, Turbulence Intensity

۱- مقدمه

تونل باد با سرعت کم از نوع مدار باز را می‌توان به دو دسته مکنده و دمنده تقسیم‌بندی نمود. در تونل باد مدار باز از نوع مکنده، جریان هوا از محیط اتمسفر وارد اتاق آرامش، سپس وارد نازل و از طریق نازل وارد محوطه آزمون می‌شود [۱]. بنابراین نازل یکی از اجزای اصلی تونل باد می‌باشد که وظیفه اصلی آن شتاب دادن به جریان هوا و همچنین کاهش غیریکنواختی سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن می‌باشد [۲]. به منظور کاهش هزینه ساخت، در برخی از تونل بادهای مدار باز از نوع مکنده، به‌ویژه تونل بادهای عمودی، اتاق آرامش قبل از نازل ساخته نشده و جریان هوا به طور مستقیم از اتمسفر وارد نازل می‌شود. در صورتی که اتاق آرامش ساخته نشود و یا آنکه توری‌های آن حذف شود و فقط از لانه زنبوری در آن استفاده شود، نگهداری و تمیز نمودن اتاق آرامش به‌ویژه در تونل بادهای عمودی ساده‌تر خواهد بود. لذا در بسیاری از تونل بادهای عمودی که برای شبیه‌سازی عملیات سقوط آزاد از آن استفاده می‌شود، فاقد توری در اتاق آرامش می‌باشد. بنابراین مناسب است که جریان هوا در خروجی نازل و یا به عبارت دیگر در محوطه آزمون، برای تونل بادی که فاقد اتاق آرامش است، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به منظور کاهش افت فشار و به دست آوردن جریان هوای مناسب، در مدخل ورودی کانال‌ها، از ورودی‌های به شکل ناقوس استفاده می‌شود که کم‌کم پهن می‌گردند. به عنوان مثال به منظور کاهش افت فشار کانال بستر آزمایش فن [۳]، در مدخل ورودی آن از شکل ناقوس استفاده شده است. طبق مرجع [۴] دهانه ورودی می‌تواند به شکل ربع دایره بوده و شعاع بهینه آن نیز ۰/۱۴ قطر ورودی لوله جریان هوا است. در صورتیکه شعاع دهانه ورودی بیشتر از مقدار فوق باشد، تأثیری بر بهبود عملکرد جریان هوا نخواهد داشت. در ارتباط با نازل و طراحی آن، تحقیقات وسیعی توسط پژوهشگران مختلفی انجام گرفته است. ساده‌ترین و متداول‌ترین روش طراحی نازل، توسط مورل [۵] و [۶] پیشنهاد شده که بر اساس تئوری جریان پتانسیل انجام شده است. فانگ و همکارانش [۷] و [۸] نیز جریان در نازل را به صورت عددی و تجربی، ارزیابی نموده و با اندازه‌گیری‌های توزیع فشار و توزیع سرعت و مقایسه آن با نتایج عددی، نشان دادند که طرح ارایه شده آنها کاربردی است.

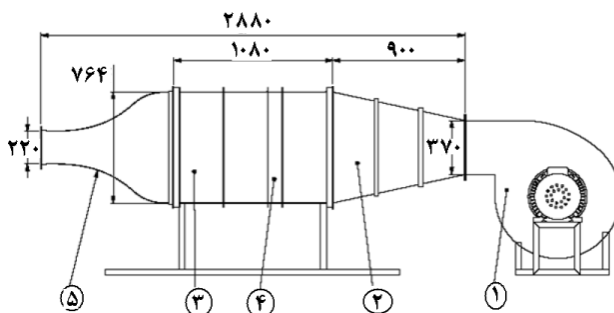
تاکنون تحقیقات لازم، بر روی تأثیر دهانه ورودی نازل، بر عملکرد آن انجام نشده است. در این مقاله، توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه نازل، توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در ورودی و خروجی نازلی که دارای دهانه ورودی به شکل ربع دایره بوده و یا فاقد دهانه ورودی است، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تأثیر دهانه ورودی نازل بر روی افت فشار آن نیز در این مقاله بررسی شده است.

۲- روش آزمایش

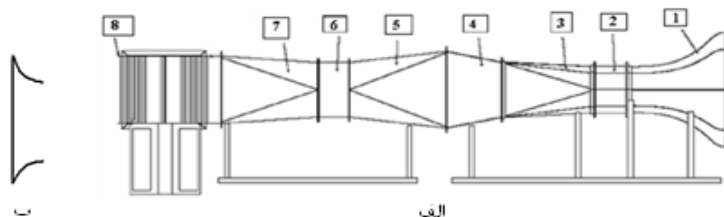
در این کار پژوهشی، به منظور بررسی تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل، نازل در شرایط مختلف مورد آزمون قرار گرفته است. منحنی دیواره نازل مورد آزمون را می‌توان به دو منحنی ورودی و خروجی با نقطه مشترک X_i (نقطه عطف) طراحی نمود [۱۱]. نازل مورد آزمون دارای سطح مقطع هشت ضلعی در ورودی و خروجی است. همچنین نسبت سطح ورودی به خروجی آن ۶/۲۵ بوده و نسبت طول نازل به قطر ورودی آن ۰/۹ است، نقطه مشترک دو منحنی X_i در فاصله ۰/۳L از ورودی نازل قرار گرفته است. نازل در شرایط مختلف مورد آزمون و بررسی قرار گرفته است، در جدول ۱ شرح آزمون‌های فوق ارایه شده است. همان‌گونه که در جدول فوق بیان شده، به‌منظور آزمایش نازل با جریان هوای ورودی کنترل شده، نیاز به تونل باد دمنده می‌باشد. برای آزمون نازل با دهانه ورودی و بدون دهانه ورودی، نیاز به تونل باد مکنده است. شکل ۱ تونل باد مورد نظر را برای آزمون‌های نازل در حالت دمنده نشان می‌دهد. در این تونل باد، فن از نوع سانتریفوژ بوده که سرعت دورانی آن توسط سیستم کنترل دور تنظیم شده و در نتیجه سرعت جریان هوا در تونل باد تغییر می‌کند. برای آزمایش‌های حالت مکنده نیز از تونل بادی مطابق با شکل ۲ الف استفاده شده است. در این تونل باد، فن از نوع جریان محوری بوده و در پایین دست اتاق آزمون قرار دارد. سرعت جریان هوا در این تونل باد نیز با استفاده از کنترل دور تنظیم می‌شود. شکل ۲ ب دهانه ناقوسی شکل نازل را نشان می‌دهد که مطابق شکل فوق دهانه ورودی نازل به شکل ربع دایره می‌باشد، شعاع این ربع دایره ۰/۱۳ قطر ورودی نازل می‌باشد. در این آزمون‌ها، توزیع فشار استاتیکی در امتداد دیواره نازل توسط فشارسنج ۳۲ کاناله اندازه‌گیری شده است. خروجی فشارسنج‌ها نیز به کارت اخذ داده‌ها A/D متصل شده و داده‌ها از طریق آن به رایانه ارسال می‌شود. فشارسنج‌ها دارای بازه ۱۲۵۰ پاسکال می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری سرعت و اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی و خروجی نازل از جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده [۱۲] که پراب آن یک بعدی و ساخت شرکت فراسنجش صبا می‌باشد. برای جابه‌جایی پراب جریان سنج سیم داغ نیز از ساز و کار انتقال‌دهنده استفاده شده که دقت جابه‌جایی آن حدود ۰/۱ mm می‌باشد.

جدول ۱- شرایط آزمایش و شرح آن

نوع مدار	شماره آزمون	شرح آزمون
دمنده	N1	نازل با جریان هوای ورودی کنترل شده
مکنده	N2	نازل بدون دهانه ناقوسی شکل
مکنده	N3	نازل با دهانه ناقوسی شکل



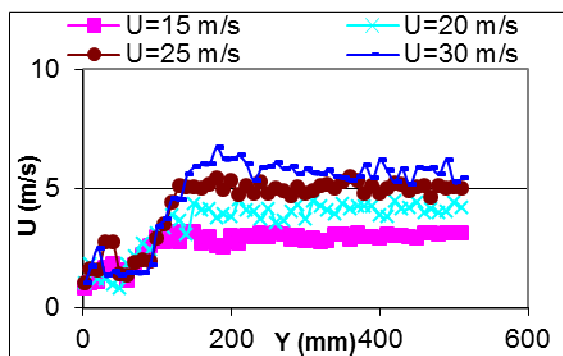
شکل ۱- تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- نازل (مقیاس میلی متر باشد).



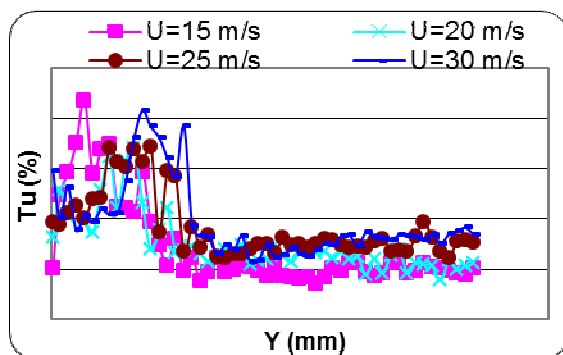
شکل ۲- الف: تونل باد مکنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- نازل ۲- مقطع آزمون ۳- دیفیوزر اول ۴- دیفیوزر دوم ۵- قطعه تبدیل ۶- فن پروانه محوری ۷- دیفیوزر سوم ۸- خروجی مثلی شکل شکل ۲ب: دهانه ناقوسی شکل نازل

۳- بررسی نتایج

بسیار قوی ناشی از توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل است.

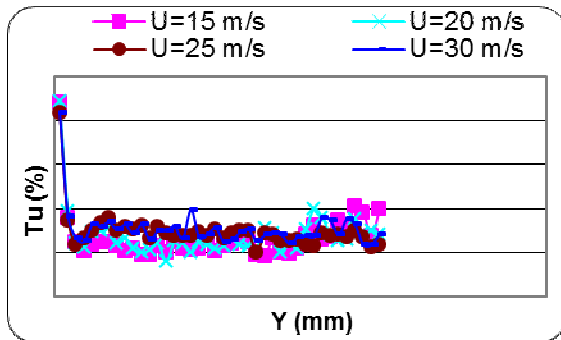


شکل ۳- توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل برای N2



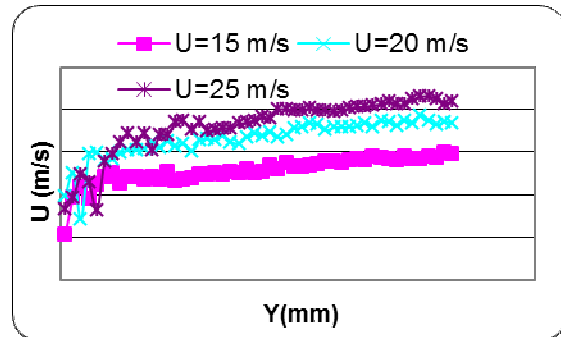
شکل ۴- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل برای N2

در ابتدا نازل را بدون دهانه ورودی به شکل زنگوله و یا ناقوس در نظر گرفته و جریان هوا در ورودی و خروجی آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳ توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل را برای حالتی که نازل فاقد دهانه ورودی (N2) است، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، توزیع سرعت جریان هوای ورودی به نازل یکنواخت نبوده و در نزدیکی دیواره نازل سرعت به مراتب کمتر از سرعت جریان هوا در مرکز نازل است، این منحنی نشان می‌دهد که جریان هوای ورودی به نازل مناسب نمی‌باشد. شکل ۴ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل بدون دهانه ورودی (N2) را در عرض مرکز آن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل در حالت مکنده مناسب نمی‌باشد. مقدار شدت اغتشاش‌ها در کناره ورودی نازل به مراتب بالا بوده و حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌باشد. این شدت اغتشاش‌ها در مرکز نازل کم شده و به مقدار ۵ الی ۸ درصد می‌رسد که این مقدار نیز برای ورودی نازل مقدار بسیار زیادی است. شکل ۵ توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل را در حالت (N2) در عرض مرکز نازل نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل یکنواخت شده است ولی در کناره دیوار نازل سرعت جریان هوا دارای نقصان بوده که این نقصان جریان هوا نسبت به جریان ورودی شکل ۳ بسیار کمتر است. این نقصان می‌تواند ناشی از تأثیر جریان ورودی نازل و یا تأثیر لایه مرزی باشد که به احتمال

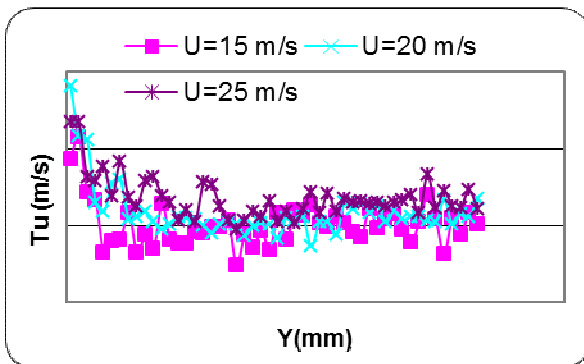


شکل ۶- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل برای N2

توجه به شرایط جریان ورودی به نازل می‌باشد. همچنین در کناره‌های دیواره نازل شدت اغتشاش‌ها بالا است که ناشی از لایه مرزی است.

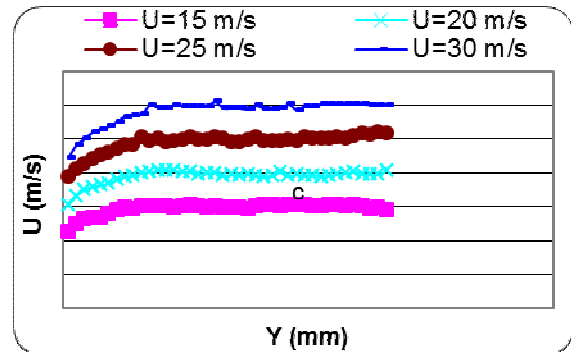


شکل ۷- توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل برای N2



شکل ۸- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل برای N2

به منظور بررسی و مقایسه تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل، توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل برای حالت‌های مختلف در شکل ۱۱ برای سرعت ۱۵ m/s نشان داده شده است. محور افقی شکل فوق با استفاده از قطر دایره محاطی نازل بی‌بعد شده است. همچنین محور عمودی شکل فوق سرعت بی‌بعد شده می‌باشد. این سرعت نسبت به سرعت در مرکز نازل بی‌بعد شده است.

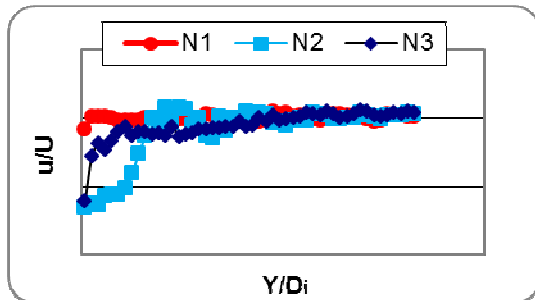


شکل ۹- توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل برای N2

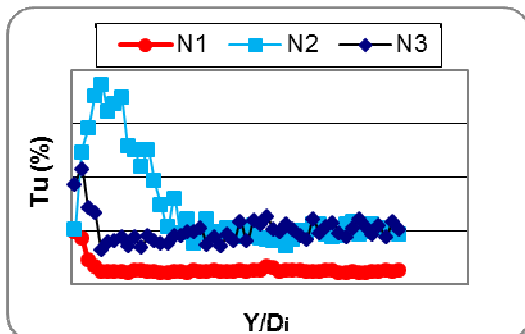
شکل ۶ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا را در سرعت‌های مختلف در خروجی نازل بدون دهانه ورودی و در عرض مرکز آن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی دیواره نازل بسیار بالا بوده که این موضوع ناشی از لایه مرزی در کنار دیواره خروجی نازل می‌باشد، با افزایش فاصله از دیواره مقدار شدت اغتشاش‌ها بسیار سریع کاهش یافته و به حدود ۲ الی ۳٫۵ درصد بستگی به سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد. به منظور بررسی تأثیر دهانه ورودی نازل بر عملکرد آن، نازل با دهانه ورودی به شکل ربع دایره و شعاع ۰٫۱۳ قطر ورودی نازل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۷ توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل و در عرض مرکز آن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، سرعت جریان هوا در کناره‌های ورودی نازل دارای نقصان بوده، و در نتیجه جریان هوا به صورت یکنواخت وارد نازل نمی‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۳ و ۷ می‌توان تشخیص داد که دهانه ناقوسی شکل نازل سبب یکنواخت‌تر شدن جریان هوا در نازل می‌شود. شکل ۸ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل را در سرعت‌های مختلف در عرض مرکز آن نشان می‌دهد. نازل فوق دارای ورودی به شکل ربع دایره بوده که شعاع آن ۱۳٪ قطر ورودی نازل می‌باشد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، دهانه ورودی نازل سبب شده که شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل یکنواخت‌تر شود اما همچنان مقدار آن بسیار زیاد است. شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در خروجی نازل که دارای دهانه ورودی به شکل ربع دایره است را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، سرعت جریان هوا در خروجی نازل یکنواخت‌تر شده اما در کناره خروجی نازل، نقصان سرعت وجود دارد که این نقصان مناسب اتاق آزمون و یا محوطه پرواز نمی‌باشد. با بررسی شکل ۱۰ می‌توان تشخیص داد که شدت اغتشاش‌های جریان در خروجی نازل به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است ولی مقدار آن با

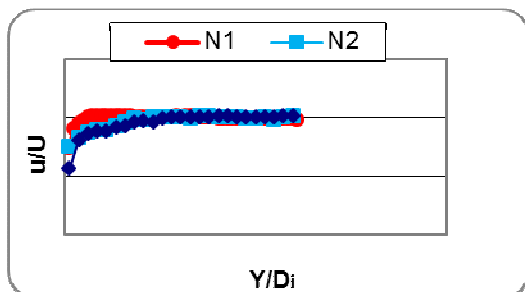
دارای دهانه ورودی (حالت N1) می‌باشد، شدت اغتشاش‌های ورودی به نازل در نزدیکی دیواره به مراتب کمتر از حالت N2 می‌باشد.



شکل ۱۰- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف در سرعت ۱۵ m/s

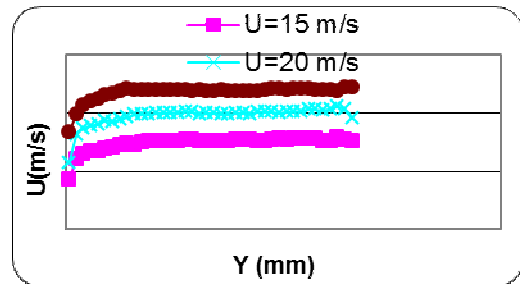


شکل ۱۱- توزیع سرعت جریان هوا در ورودی نازل برای حالت‌های مختلف در سرعت ۱۵ m/s

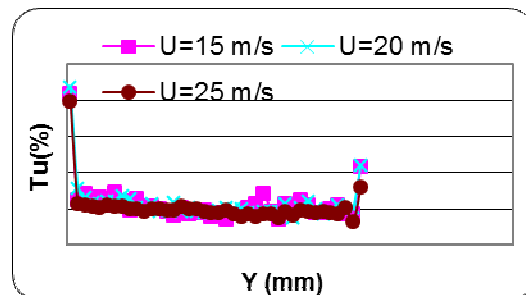


شکل ۱۲- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل برای حالت‌های مختلف در سرعت ۱۵ m/s

همچنین در فاصله کمتری از دیواره نازل، شدت اغتشاش‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. ولی شدت اغتشاش‌ها در مرکز نازل مشابه حالت N2 بسیار بالا و حدود ۵٪ می‌باشد. لذا برای طراحی و ساخت تونل باد با شدت اغتشاش‌های کم و یا متوسط حتماً نیاز است که جریان هوا در بالادست نازل با استفاده از توری و لانه زنبوری کنترل شود. شکل ۱۳ توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق هنگامی که جریان هوا کنترل شده می‌باشد (حالت N1)، در فاصله Y/D_i کمتر از ۰٫۰۵ سرعت جریان هوا در نازل یکنواخت می‌شود. ولی هنگامی که نازل به صورت



شکل ۹- توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل برای N2



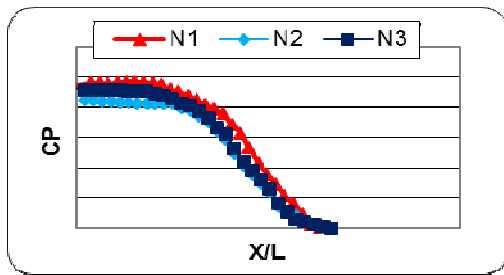
شکل ۱۰- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل برای N2

شکل ۱۲ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل برای حالت‌هایی که جریان هوای ورودی کنترل شده (N1)، نازل فاقد دهانه ورودی (N2) و یا دارای دهانه ورودی (N3) است، در سرعت ۱۵ m/s را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱ برای حالتی که جریان ورودی به نازل کنترل شده است و یا آنکه قبل از نازل اتاق آرامش قرار دارد، سرعت جریان هوا یکنواخت می‌باشد (حالت N1). هنگامی که قبل از نازل اتاق آرامش قرار نداشته و همچنین نازل فاقد دهانه ورودی است (حالت N2)، جریان هوا تا فاصله ۰٫۱۳ قطر ورودی نازل از هر طرف غیریکنواخت بوده و دارای نقصان می‌باشد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که سرعت در این ناحیه حدود ۰٫۴ سرعت در مرکز ورودی به نازل است. هنگامی که نازل دارای دهانه ورودی است (حالت N3)، جریان هوای ورودی به نازل یکنواخت‌تر می‌شود. ولی این یکنواختی در مقایسه با حالت (N1) کم می‌باشد. مطابق شکل ۱۲ هنگامی که جریان هوا کنترل شده

می‌باشد، شدت اغتشاش‌ها $T_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100$ در نزدیکی

دیواره ورودی نازل نسبتاً بالا بوده ولی در فاصله کمی از دیواره ورودی نازل شدت اغتشاش‌ها کاهش یافته و به حدود ۱٫۵٪ می‌رسد. هنگامی که تونل باد به حالت مکند بوده و نازل فاقد دهانه ورودی است، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در نزدیکی دیواره بسیار بالا بوده و تا حدود ۲۰٪ نیز افزایش می‌یابد. در فاصله ۰٫۱۵ قطر نازل از دیواره آن، شدت اغتشاش‌های جریان هوا یکنواخت شده ولی مقدار آن حدود ۵٪ می‌باشد، که این مقدار برای ورودی نازل بسیار بالا می‌باشد. هنگامی که نازل

در شکل ۱۶، محور افقی نیز نسبت به طول نازل بی‌بعد شده است. با توجه به منحنی فشار مشخص است که برای نازل در حالت‌های مختلف، گرادیان فشار معکوس محسوسی در مقاطع نازل وجود ندارد. وجود گرادیان فشار معکوس شدید، نشان‌دهنده جدایش و تلفات در جریان است. در شکل فوق همچنین مشخص است که مقدار ضریب C_p در مقطع ورودی برای حالتی که جریان هوای ورودی آن کنترل شده است، نزدیک به ۰٫۹۶ بوده و در مقطع خروجی صفر می‌باشد. با توجه به شکل ۱۶ مقدار C_p اندازه‌گیری شده در مقطع ورودی نازل برای حالتی که جریان هوای ورودی آن کنترل نشده است و فاقد دهانه ورودی است، حدود ۰٫۸۴ بوده که این مقدار طبق رابطه برنولی (برای حالت ایده‌آل و بدون تلفات) باید ۱ باشد. این اختلاف ناشی از غیر یکنواختی سرعت در مقطع ورودی و کاهش سطح موثر جریان و همچنین افت فشار ناشی از جریان هوای ورودی به نازل است.



شکل ۱۶- توزیع ضریب فشار استاتیکی بر روی دیواره نازل برای حالت‌های مختلف در سرعت ۱۵ m/s

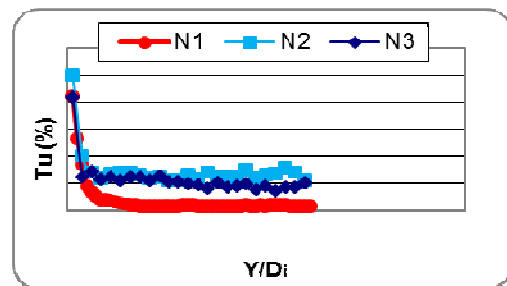
با توجه به شکل فوق، هنگامی که نازل دارای دهانه ورودی می‌باشد ضریب فشار ورودی نازل برابر ۰٫۹۱ می‌باشد. با توجه به مقادیر فوق می‌توان دریافت که اختلاف ضریب فشار برای حالت‌هایی که نازل فاقد دهانه ورودی است (حالت N1) با حالت ایده‌آل ۰٫۱۶ بوده، اختلاف ضریب فشار برای حالتی که نازل دارای دهانه ورودی است (حالت N2) با حالت ایده‌آل ۰٫۰۹ می‌باشد که نشانه عملکرد مناسب دهانه ورودی است. و این اختلاف برای جریان هوای کنترل شده در ورودی برابر ۰٫۰۴ می‌باشد. با توجه به بحث‌های انجام گرفته تأثیر دهانه ورودی سبب کاهش افت فشاری حدود ۷٪ در نازل می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی جریان هوای ورودی به نازل و تأثیر دهانه ورودی نازل بر عملکرد آن می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌های به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

- هنگامی که تونل باد از نوع مکنده است، در صورتی که جریان بالادست آن توسط توری و لانه زنبوری کنترل نشود، شدت اغتشاش‌های جریان هوای ورودی به نازل در

مکنده می‌باشد و جریان هوا در آن نیز کنترل نمی‌شود، سرعت جریان هوا تا فاصله Y/D_i حدود ۰٫۲۵ یکنواخت نشده است، و به عبارت دیگر از دو طرف حدود ۵۰٪ سطح مقطع خروجی نازل دارای جریان یکنواخت است. لذا استفاده از نازل بدون اینکه جریان هوای ورودی آن کنترل شود، مناسب تونل بادهای تحقیقاتی و حتی آزمایشگاهی نمی‌باشد. با توجه به شکل ۱۳ نیز می‌توان دریافت که تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل در جریان خروجی آن ناچیز است. شکل ۱۴ توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا، در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق هنگامی که جریان هوای ورودی به نازل کنترل شده است، شدت اغتشاش‌های خروجی از نازل حدود ۰٫۰۵٪ بوده، و در فاصله $Y > 0.1D_i$ نیز توزیع شدت اغتشاش‌ها در عرض نازل یکنواخت می‌شود. فاصله ناحیه‌ای است که تحت تأثیر لایه مرزی قرار نگرفته است. مطابق شکل ۱۴ هنگامی که نازل در حالت مکنده بوده و جریان ورودی آن نیز کنترل نمی‌شود (حالت N2)، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مرکز آن حدود ۲٫۱٪ است. همچنین مشابه حالت N1، جریان تا فاصله $Y = 0.1D_i$ تحت تأثیر لایه مرزی قرار گرفته است. همچنین شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تأثیر دهانه ورودی نازل بر عملکرد آن ناچیز بوده و شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل نیز حدود ۲٪ است. این مقدار بسیار بالا بوده و برای تونل بادهای مورد استفاده در تحقیقات آیرودینامیکی و تحقیقات پایه مناسب نمی‌باشد.



شکل ۱۴- توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل برای حالت‌های مختلف در سرعت ۱۵ m/s

علت اینکه شدت اغتشاش‌ها در خروجی نازل بالا است را می‌توان ناشی از اغتشاش‌های ورودی جریان هوا دانست. به منظور بررسی تأثیر دهانه ورودی بر عملکرد نازل و افت فشار آن، فشار استاتیکی در امتداد نازل اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۶ توزیع ضریب فشار استاتیکی را در امتداد دیواره نازل در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل فوق، ضریب توزیع فشار طبق رابطه ۱ بی‌بعد شده است.

$$C_p = \frac{p - p_e}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

P_e	فشار استاتیکی در مقطع ورودی نازل (pas).
R	فاصله عمودی دیواره نازل نسبت به محور مرکزی آن (m)
T_{u_i}	اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در ورودی نازل
T_{u_o}	اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در خروجی نازل
u	سرعت متوسط جریان هوا در جهت x (m/s)
u'	اغتشاش‌های جریان هوا در جهت x (m/s)
X	نقطه مشترک در منحنی دیواره نازل (m)
μ_c	نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در جهت محور x
ρ	چگالی جریان هوا (kg/m ³)
V_c	نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در جهت محورهای عمود بر جریان

مراجع

[1] Morel, T., "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", ASME J. Fluids Eng. 97, pp.225-233, 1975.

[2] Morel, T., "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions", ASME J. Fluids Eng. 119, pp. 371-378, 1997.

[3] Fang, F., "A Design method for Contractions with Square End Sections", ASME J. Fluids Eng. 99, pp. 454-458, 1997.

[4] Fang, F., Chen, J.C., Hong, Y.T., "Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square wind tunnel contraction", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89, pp. 247-262, 2001.

[5] Rouse, H. and Hassan, M. M., "Cavitation-free Inlets and Contractions", Mech. Eng., vol. 71, PP. 213-216.

[6] Pope, A. and Goin, K.L., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc, 1984.

[7] اردکانی محمدعلی، "تونل باد با سرعت پایین، اصول طراحی و کاربرد"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اردیبهشت ۸۸

[8] AMCA standard 210-99 "Laboratory method of testing fans for Aerodynamic performance Rating" AMCA 1999.

[9] Frank P. Bleier, "Fan Hand Book (Selection, Applications and Design)", MEGraw-Hill, 1997.

[۱۰] اردکانی محمدعلی، "جریان سنج سیم داغ"، انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی، ۱۳۸۵.

مرکز آن بسیار بالا بوده و تا حدود ۶٪ نیز اندازه‌گیری شده است. استفاده از دهانه ورودی به شکل ناقوس و یا ناقوس تأثیر قابل قبولی بر روی شدت اغتشاش‌های جریان هوای ورودی نازل ندارد.

- توزیع سرعت جریان هوای ورودی به نازلی که به صورت مکنده است، دارای غیریکنواختی بسیار بالایی بوده به طوری که این غیریکنواختی حدود ۳۰٪ عرض ورودی نازل را در بر می‌گیرد. استفاده از دهانه ورودی به شکل ناقوس و یا ناقوس تأثیر زیادی بر روی یکنواخت نمودن جریان هوای ورودی نازل دارد.
- توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل تونل باد مکنده، که جریان بالادست آن کنترل نشده، مناسب نمی‌باشد و سرعت در اطراف دیواره دارای نقصانی حدود ۲۰٪ می‌باشد. غیریکنواختی سرعت جریان هوا در خروجی نازل بالا بوده، به طوری که استفاده از دهانه ورودی تأثیر قابل محسوسی بر جریان هوای خروجی ندارد.
- نسبت شدت اغتشاش‌های جریان ورودی به خروجی نازل، در حالتی که جریان هوای ورودی آن کنترل شده باشد و یا آن که به صورت مکنده باشد، مشابه یکدیگر بوده و با نتایج سایر پژوهشگران هم‌خوانی نزدیکی دارد. دهانه ورودی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در روند کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های جریان ورودی به خروجی نازل ندارد.
- اختلاف ضریب فشار بین ورودی و خروجی نازلی که جریان بالادست آن کنترل شده است، حدود ۱۲٪ بالاتر از نازلی است که در حالت مکنده بوده و فاقد دهانه ورودی است. با بررسی انجام گرفته مشخص شد، دهانه ورودی سبب بهبود این ضریب فشار حدود ۷٪ شده است.
- برای هر دو نوع تونل باد مدار باز مکنده و یا مدار بسته، که برای تحقیقات آیرودینامیکی و یا تحقیقات بنیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیاز است جریان بالادست نازل آن با استفاده از لانه زنبوری و توری کنترل شوند. در غیر اینصورت شدت اغتشاش‌های آن بسیار بالا خواهد بود و برای تحقیقات فوق کاربردی نخواهد داشت.

نمادها

C	نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل
Cp	ضریب فشار استاتیکی
D	قطر خروجی نازل (m)
Di	قطر ورودی نازل (m)
L	طول نازل (m)
P	فشار استاتیکی (pas)