



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۹ تا ۱۶
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 9-16



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک
AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
(ASJR-ME)

بررسی تجربی تأثیر ابعاد نازل بر یکنواختی جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن

محمدعلی اردکانی*

دانشیار، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۸/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷)

چکیده

به منظور کاهش هزینه‌های ساخت تونل باد عمودی، نیاز است که ارتفاع نازل تونل باد را کوتاه نمود. بدین منظور مناسب است که نسبت قطر ورودی به قطر خروجی نازل و نسبت طول نازل به قطر ورودی آن را کاهش داد، همچنین نقطه عطف منحنی‌های نازل را به بالادست جریان تغییر داد و قسمت خروجی نازل را کوتاه نمود. با توجه به تغییرات فوق، احتمال تغییر کیفیت جریان خروجی از نازل جود دارد که در این زمینه باید تحقیقات لازم انجام شود. در این تحقیقات تجربی با استفاده از جریان سنج سیم داغ توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در خروجی نازل کوتاه شده، مورد بررسی قرار گرفت. هنگامیکه نسبت سطح ورودی به خروجی نازل از ۱۲ به ۶/۲۵ کاهش می‌یابد، نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل از ۰/۲ به ۰/۴ افزایش می‌یابد. با استفاده از نتایج به دست آمده، می‌توان طول نازل را حدود ۶۲٪ کاهش داد به طوری که کیفیت جریان هوا در خروجی نازل کوتاه شده قابل قبول باشد.

کلمات کلیدی:

نازل، توزیع سرعت جریان هوا، شدت اغتشاش‌های جریان هوا، جریان سنج سیم داغ

۱- مقدمه

نازل تونل باد یکی از اجزای مهم آن است. وظیفه اصلی نازل تبدیل انرژی پتانسیل (فشار جریان هوا) به انرژی جنبشی (سرعت جریان هوا) است. نازل تونل باد تأثیر بسیار مهمی در کاهش شدت اغتشاش‌ها در اتاق آزمون دارد، همچنین سرعت جریان هوا را یکنواخت می‌کند. از این رو طراحی نازل اهمیت دارد. طراحی نازل باید طوری انجام پذیرد که در نزدیکی مقاطع ورودی و خروجی نازل گرادیان معکوس فشار وجود نداشته باشد [۳]، همچنین جدایش جریان در لایه مرزی ایجاد نشود. در نازل نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی هر چه بزرگتر باشد، شدت اغتشاش‌های جریان خروجی از آن نیز کمتر می‌شود [۱]. میزان تغییرات در توزیع سرعت خروجی در جهت محور نازل با افزایش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی کاهش می‌یابد. در زمینه طراحی نازل، پژوهشگران مختلف، تحقیقات تجربی و عددی متعددی را انجام داده‌اند و طرح‌های گوناگونی را ارائه نموده‌اند. ساده‌ترین و متداول‌ترین روش طراحی نازل، توسط مورل پیشنهاد شده که بر اساس تئوری جریان پتانسیل انجام شده است [۴-۵]. فانگ و همکارانش نیز جریان در نازل یک تونل باد را به صورت عددی و تجربی، ارزیابی نموده و با اندازه‌گیری‌های توزیع فشار و توزیع سرعت و مقایسه با نتایج عددی نشان دادند، طرح نازل فوق، قابلیت کاربردی شدن را دارد [۶-۷]. گالن و مارسیک [۸] نیز تغییر نسبت سطح مقطع را در نازل یک تونل باد بررسی نموده و کیفیت جریان هوا در خروجی نازل را مورد مطالعه و تحلیل قرار دادند.

منشادی و همکاران [۹] تأثیر زبری مصنوعی بر کنترل گرادیان فشار در نازل یک تونل باد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمون آنها نشان می‌دهد که تأثیر زبری بر توزیع فشار و شدت اغتشاش‌های جریان هوا، قابل ملاحظه بوده و در صورتی که موقعیت زبری مصنوعی در مکان مناسبی قرار گیرد، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل کاهش می‌یابد. اردکانی و همکارانش [۲] به منظور بررسی پدیده جدایش در نازل یک تونل باد، توزیع فشار بر روی بدنه آن را اندازه‌گیری نموده و با استفاده از این بررسی، نازل مطلوب تونل باد را انتخاب نمودند. شکل نازل را می‌توان به روش‌های گوناگونی که توسط پژوهشگران مختلفی ارائه شده، طراحی نمود. یکی از روش‌های طراحی منحنی نازل، استفاده از دو منحنی ورودی و خروجی نازل است معادله این دو منحنی عبارت است از [۱۰]:

$$0 < X < X_i \quad \frac{R}{D/2} = \frac{D_i}{D} - \left[\frac{D_i}{D} - 1 \right] \frac{(X/L)^3}{(X_i/L)^2} \quad (1)$$

$$X_i < X < L \quad \frac{R}{D/2} = 1 + \left[\frac{D_i}{D} - 1 \right] \frac{(1-X/L)^3}{(1-X_i/L)^2}$$

در رابطه فوق، R فاصله عمودی دیواره نازل نسبت به محور مرکزی آن، D_i قطر ورودی، D قطر خروجی، L طول نازل و X_i نقطه مشترک دو منحنی دیواره نازل است که در این نقطه، پیوستگی برقرار است.

در طراحی یک نازل، هرچه نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی بزرگتر باشد، غیر یکنواختی جریان و شدت اغتشاش‌های جریان خروجی از آن نیز کمتر می‌شود، بنابراین به منظور افزایش کیفیت جریان هوا، نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل (برای تونل باد با شدت اغتشاش‌های کم) حدود ۱۲ در نظر گرفته می‌شود و طول آن معمولاً حدود ۱ الی ۲ برابر قطر ورودی نازل در نظر گرفته می‌شود [۱].

در صورتی که نازل تونل باد عمودی طبق روابط و ملاحظات ارائه شده طراحی شود، طول آن و یا به عبارت دیگر ارتفاع آن افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در صورتیکه محوطه پرواز (خروجی نازل) دارای قطر $5/3$ متر باشد اگر نسبت سطوح ورودی به خروجی نازل ۱۲ و طول نازل نیز $1/2$ قطر ورودی نازل باشد، در این حالت طول نازل حدود ۲۲ متر خواهد بود. استفاده از چنین نسبت‌هایی برای تونل بادهای افقی، بویژه تونل بادهای کوچک و یا متوسط مناسب است، ولی برای تونل بادهای عمودی، بدلیل افزایش شدید ارتفاع سازه تونل باد، هزینه ساخت آن بسیار افزایش می‌یابد. همچنین ساخت آن نیز بسیار مشکل خواهد بود. بدین منظور باید طول نازل را کاهش داد. برای کاهش طول نازل باید نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل و نسبت طول نازل به قطر ورودی آن را کاهش داد. همچنین با توجه به رابطه (۱)، می‌توان نقطه عطف X_i را به سمت بالادست نازل انتقال داد. در این حالت منحنی پایین‌دست نازل دارای شیب ملایمتری شده و در نتیجه قسمت انتهایی نازل، قابل کوتاه شدن است. با توجه به تحقیقات عددی و بررسی‌های انجام شده، برای طرح تونل باد عمودی، نسبت سطوح ورودی به خروجی نازل را از عدد ۱۲ به $6/25$ کاهش داده، همچنین نسبت طول به قطر ورودی نازل به $0/9$ کاهش داده شد. به منظور قطع کردن انتهایی نازل، در صورتیکه نقطه عطف نازل از $X_i/L = 0.3$ به $X_i/L = 0.175$ جابه‌جا شود، قسمت خروجی نازل، دارای شیب ملایمتری بوده و در نتیجه می‌توان حدود ۹٪ از طول آن را نیز کاهش داد. با توجه به تغییرات ارائه شده، عملکرد نازل بر کاهش شدت اغتشاش‌ها و همچنین غیریکنواختی سرعت، تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین نیاز است که با استفاده از تحقیقات تجربی، این موضوع بررسی شود. بدین منظور ۳ عدد مدل نازل ساخته شده و توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در خروجی نازل مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله نتایج این تحقیقات ارائه شده و با نتایج به‌دست آمده از سایر پژوهشگران، مقایسه شده و تأثیر کاهش طول نازل بر کیفیت جریان هوا بررسی و ارائه شده است.

۲- روش آزمایش

آزمایش‌های مربوط به نازل با استفاده از تونل باد دمیده مطابق شکل ۱ انجام شده است. همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است، تونل باد فوق از نوع دمیده بوده و فن آن نیز از نوع گریز از مرکز است. سرعت دورانی فن توسط کنترل دور تنظیم شده و در نتیجه سرعت جریان هوا

پراب جریان سنج سیم داغ از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده که دقت جابه‌جایی آن حدود ۰/۱ mm است. مکانیزم انتقال دهنده پراب توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود.

به منظور بررسی صحت نتایج این تحقیق نیاز است که عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده بررسی شود. منشأ عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ در جدول ۲ ارایه شده است. در صورتی که مقدار سرعت اندازه‌گیری شده با استفاده از جریان سنج سیم داغ، تابعی از متغیرهای مستقل باشد، متغیر خروجی $y_i = f(x_i)$ خواهد بود. عدم قطعیت نسبی $U(y_i)$ تابعی از انحراف معیار واریانس ورودی است و طبق رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$U(y_i) = \frac{1}{U} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \left(\frac{\Delta x_i}{k_i} \right) = \frac{1}{k_i} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i \quad (2)$$

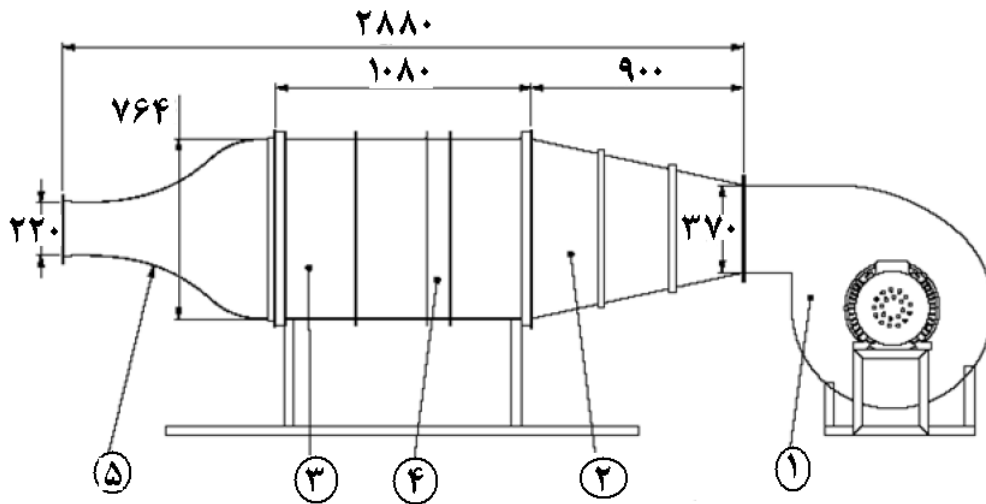
k عامل هم‌پوشان در منحنی توزیع نرمال گوس است که برای سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار آن ۲ در نظر گرفته شده است. مقادیر عدم قطعیت نسبی طبق جدول ۲ محاسبه و عدم قطعیت کلی طبق رابطه

$$2 \sqrt{\sum \left(\frac{1}{k_i} \cdot \frac{1}{U} \Delta y_i \right)^2}$$

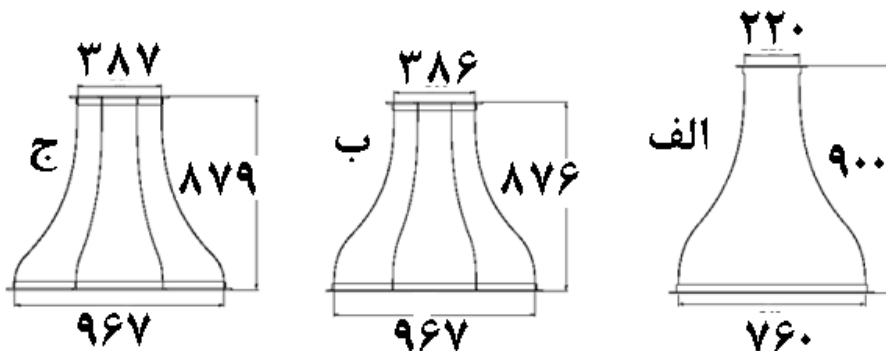
مشخص می‌شود که با محاسبات انجام شده این عدم قطعیت حدود ۲٪ است.

در تونل باد قابل کنترل است. تونل باد فوق دارای دیفیوزر زاویه باز بین فن و اتاق آرامش بوده که به منظور جلوگیری از جدایش در دیفیوزر اول، درون آن ۲ عدد توری قرار دارد. به منظور کاهش شدت اغتشاش‌ها و یکنواخت نمودن جریان هوا، از ۳ عدد توری و یک عدد لانه زنبوری در اتاق آرامش آن استفاده شده است. شکل ۲ (الف) تا (ج) سه مدل نازل را نشان می‌دهد که مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. مشخصات نازل‌های فوق در جدول ۱ بیان شده است. با توجه به شکل ۲ و جدول ۱، نازل N1، نازل مبنا بوده و مقاطع ورودی و خروجی آن چهار ضلعی است. نازل N2 و N3، نازل‌های مدل تونل باد عمودی به مقیاس ۷/۸٪ هستند. ورودی و خروجی نازل‌های فوق هشت ضلعی است. به منظور آزمایش بر روی مدل‌های N2 و N3، نیاز به یک تبدیل چهار ضلعی به هشت ضلعی در تونل باد است که تصویر آن به همراه نازل در شکل ۳ نشان داده شده است.

با استفاده از جریان سنج سیم داغ توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در ورودی و خروجی نازل اندازه‌گیری می‌شود. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی بوده و نوع سنسور آن از جنس تنگستن ۵ میکرونی است. جریان سنج سیم داغ و پراب آن ساخت شرکت فرانسجش صبا بوده، داده‌های اندازه‌گیری شده توسط کارت A/D ۱۲ بیتی به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار مربوطه تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابه‌جایی



شکل ۱: تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش، اجزای شکل: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- نازل



شکل ۲: (الف) مدل نازل N1 $(\frac{X_i}{L} = 0.3)$ (ب) مدل نازل N2 $(\frac{X_i}{L} = 0.3)$ (ج) مدل نازل N3 $(\frac{X_i}{L} = 0.175)$

۳- بررسی نتایج آزمایش

کیفیت جریان هوا در خروجی نازل با میزان یکنواختی و اندازه شدت اغتشاش‌های آن مشخص می‌شود. سرعت جریان هوا تابعی از زمان و مکان است و می‌توان سرعت لحظه‌ای را مطابق رابطه شماره رابطه به مقادیر سرعت متوسط و اغتشاش‌های آن تقسیم‌بندی نمود.

$$U(x, y, t) = \bar{U}(x, y) + u'(x, y, t) \quad (3)$$

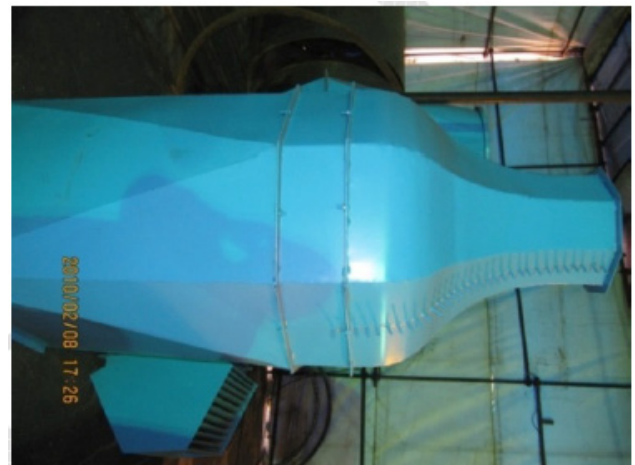
سرعت متوسط جریان بوده و تابعی از مکان در خروجی و یا ورودی نازل است، اغتشاش‌های جریان و یا در واقع تفاوت مقدار سرعت لحظه‌ای با سرعت متوسط در آن نقطه است. برای به دست آوردن سرعت متوسط در مقاطع ورودی و خروجی نازل از رابطه شماره استفاده می‌شود:

$$\bar{U}_a = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1, j=1}^n \bar{U}_{i, j} \quad (4)$$

که در آن $\bar{U}_{i, j}$ سرعت متوسط در مکان (i, j) است. در ابتدا به منظور بررسی تأثیر نازل بر کیفیت جریان هوا، سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن در ورودی و خروجی مدل‌های نازل اندازه‌گیری شد. شکل ۴ کانتور بی‌بعد شده سرعت متوسط محلی $\bar{U}(x, y)$ ، نسبت به سرعت متوسط جریان هوا \bar{U} ، در مقطع ورودی نازل N1، هنگامیکه سرعت در مقطع خروجی نازل $22/5 \text{ m/s}$ است، را نشان می‌دهد. شکل ۵ کانتور بی‌بعد شده، سرعت محلی نسبت به سرعت متوسط جریان هوا در مقطع خروجی نازل در سرعت $22/5 \text{ m/s}$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ تغییرات سرعت متوسط محلی نسبت به سرعت متوسط جریان هوا در مقطع ورودی نازل حدود $\pm 3\%$ است. شکل ۵ نشان می‌دهد که تغییرات سرعت متوسط محلی نسبت به سرعت متوسط جریان هوا در مقطع خروجی نازل کاهش یافته است.

جدول ۱: مشخصات نازل‌های مختلف مورد آزمون

شماره نازل	X_1/L	L/D_i	A_i/A_e	شرح آزمون
N_1	۰/۳	۱/۲	۱۲	سطح مقطع ورودی و خروجی
N_2	۰/۳		۶/۲۵	سطح مقطع ورودی و خروجی هشت ضلعی
N_3	۰/۱۷۵	۰/۹	۶/۲۵	سطح مقطع ورودی و خروجی هشت ضلعی



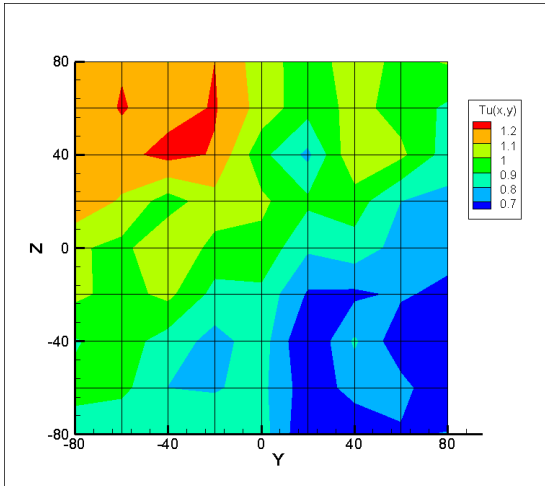
شکل ۳: تصویر نازل تونل باد

جدول ۲: منشأ خطا و عدم قطعیت

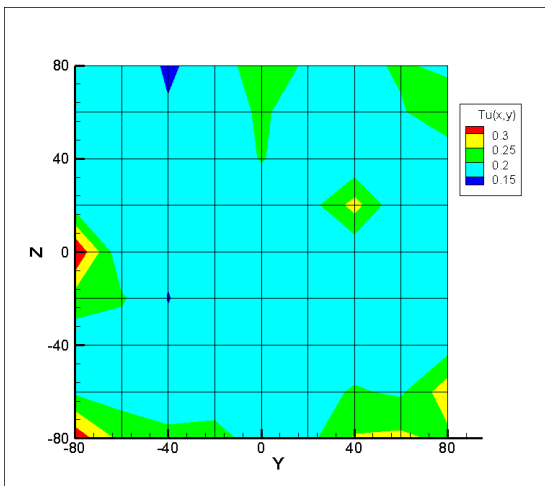
متغیر ورودی	مقدار نوعی	واریانس خروجی نسبی	مقدار نوعی	فاکتور دامنه خطا در منحنی گوس	عدم قطعیت نسبی	منشأ خطا
Δx_i	Δx_i	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	$\frac{1}{U} \Delta y_i$	k	$\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{U} \cdot \Delta y_i$	
ΔU_{cal}	۰/۰۴٪	$2\sqrt{(U - U_{cal})^2} = 2\sqrt{(\Delta U_{cal})^2}$	۰/۰۰۸	۲	۰/۰۰۴	اندازه‌گیری سرعت با استفاده از لوله پیتوت و فشارسنج الکترونیکی برای
ΔU_{fit}	۰/۰۵٪	$2\sqrt{(U - U_{fit})^2} = 2\sqrt{(\Delta U_{fit})^2}$	۰/۰۱	۲	۰/۰۰۵	برازش منحنی با استفاده از روش چندجمله‌ای
E_{AD}	۱۰ ولت ۱۲ بیت	$\frac{1}{U} \cdot \frac{E_D}{2^n} \cdot \frac{\partial U}{\partial E}$	۰/۰۰۰۸	$\sqrt{3}$	۰/۰۰۰۵	کارت A/D
ΔT	۱°	طبق مرجع [۱۲]	۰/۰۰۲	$\sqrt{3}$	۰/۰۰۱۲	تغییرات دما

متوسط که براساس سرعت متوسط بی بعد شده طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$\sigma(U) = \frac{1}{n^2 \bar{U}_a} \sum_{i=1, j=i}^n |\bar{U}_{i,j} - \bar{U}_a| \quad (6)$$



شکل ۶: کانتور شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقطع ورودی نازل N_1 در سرعت ۲۲/۵ متر بر ثانیه

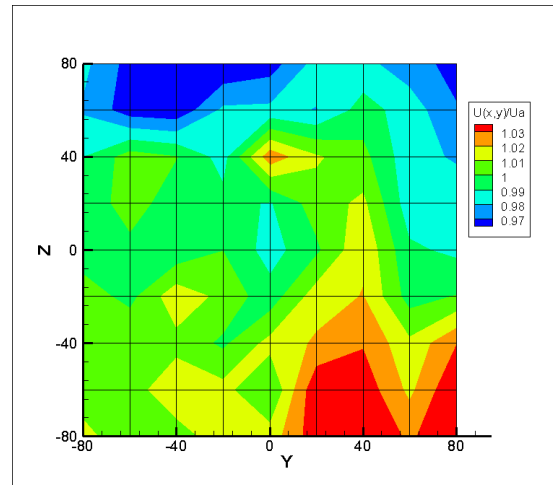


شکل ۷: کانتور شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقطع خروجی نازل N_1 در سرعت ۲۲/۵ متر بر ثانیه

با استفاده از شکل‌های ۴ و ۵، می‌توان مقدار انحراف بی بعد شده سرعت جریان هوا در ورودی و خروجی نازل را به دست آورد. شکل ۸ این مقدار انحراف را برحسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. مقدار غیر یکنواختی سرعت جریان هوا در ورودی نازل حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۲۵ تغییر می‌کند، ولی در خروجی نازل این مقدار حدود ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۷ است. با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت که نازل N_1 مقدار غیر یکنواختی جریان هوا را به حدود ۰/۳ کاهش داده است. هرچقدر این مقدار کمتر باشد، غیریکنواختی جریان بهتر و در نتیجه کیفیت جریان مناسب‌تر است. شکل ۹ تغییرات شدت اغتشاش‌های سرعت در ورودی و خروجی نازل را برحسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در ورودی

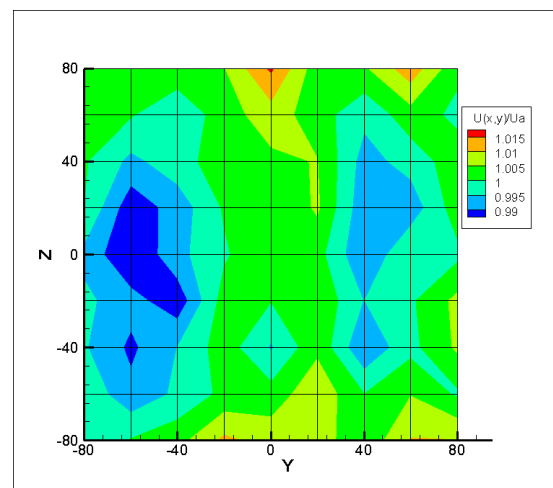
این تغییرات کمتر از ۱/۵٪ ± است. شدت اغتشاش‌های جریان هوا طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\%T_u(x,y) = \frac{\sqrt{u'^2(x,y)}}{\bar{U}(x,y)} \times 100 \quad (5)$$



شکل ۴: کانتور بی بعد شده سرعت متوسط محلی به سرعت متوسط جریان هوا در مقطع ورودی نازل N_1 در سرعت ۲۲/۵ متر بر ثانیه

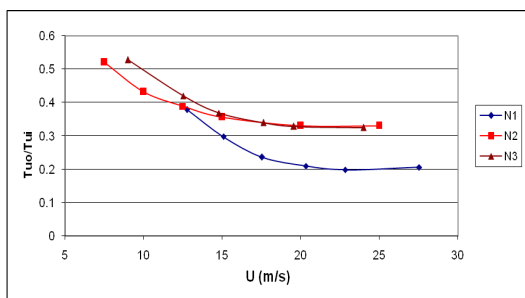
شکل‌های ۶ و ۷ کانتورهای شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقاطع ورودی و خروجی نازل N_1 را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶ تغییرات شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقطع ورودی نازل حدود ۰/۷٪ تا ۱/۲٪ است، ولی شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقطع خروجی نازل به مقدار ۰/۱۵٪ تا ۰/۳٪ کاهش یافته است.



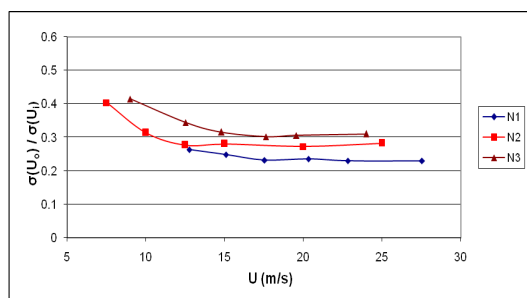
شکل ۵: کانتور بی بعد شده سرعت متوسط محلی به سرعت متوسط جریان هوا در مقطع خروجی نازل N_1 در سرعت ۲۲/۵ متر بر ثانیه

کانتورهای سرعت محلی و شدت اغتشاش‌ها در مقاطع ورودی و خروجی نازل N_1 در سرعت‌های ۱۵ m/s، ۲۰ m/s و ۲۵ m/s، ۱۲/۵ m/s مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای مشخص نمودن غیریکنواختی سرعت جریان هوا، مقدار انحراف سرعت، از سرعت

است. با توجه به روابط فوق، کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا توسط نازلی که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی آن ۱۲ است، طبق رابطه ارایه شده توسط برودمن حدود ۰/۲ و طبق رابطه ارایه شده پراتنل حدود ۰/۲۴ است. هنگامیکه نسبت سطوح مقطع ورودی به خروجی نازل ۶/۲۵ است، کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا، طبق رابطه ارایه شده توسط برودمن حدود ۰/۳۹ و طبق رابطه ارایه شده پراتنل حدود ۰/۴۴ است. با توجه به شکل ۹ و در نظر گرفتن شدت اغتشاش‌ها در ورودی و خروجی نازل، می‌توان دریافت که نتایج ناشی از تحقیقات کنونی برای نازل N_1 هم‌خوانی مناسبی با نتایج دیگر پژوهشگران دارد. اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن برای مدل‌های نازل N_2 و N_3 مطابق شکل‌های ۶ تا ۹ انجام شده و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۱۰ تغییرات نسبت شدت اغتشاش‌های خروجی به ورودی نازل‌های N_1 و N_2 و N_3 را برحسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد.



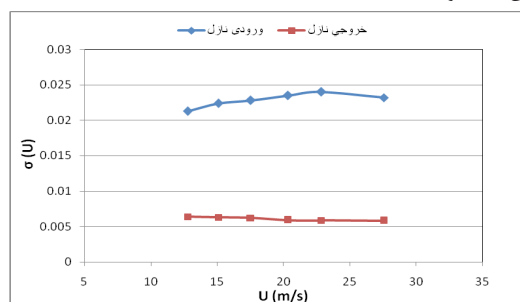
شکل ۱۰: تغییرات نسبت شدت اغتشاش‌های خروجی به ورودی نازل‌های N_1 و N_2 و N_3 بر حسب سرعت جریان هوا



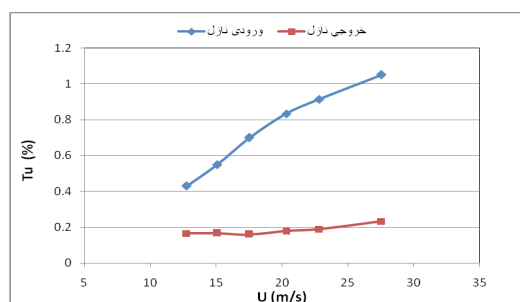
شکل ۱۱: تغییرات نسبت غیریکنواختی خروجی به ورودی نازل‌های N_1 و N_2 و N_3 بر حسب سرعت جریان هوا

همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است، با افزایش سرعت جریان هوا این نسبت کاهش یافته و مقدار آن برای نازل‌های N_2 و N_3 در سرعت‌های بالاتر از ۱۵ m/s تقریباً ثابت بوده و برابر با ۰/۳۳ است. گفتنی است نسبت سطوح مقطع ورودی به خروجی نازل‌های N_2 و N_3 برابر با ۶/۲۵ بوده و نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰ هم‌خوانی خوبی با نتایج سایر پژوهشگران دارد. همچنین مقدار کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا برای نازل N_1 که دارای سطوح مقطع ورودی به خروجی ۱۲ است، برای سرعت‌های بالاتر از ۲۰ m/s، حدود ۰/۲ است که هم‌خوانی خوبی با نتایج سایر محققان دارد. شکل ۱۱ تغییرات کاهش غیریکنواختی

نازل برای سرعت ۱۲/۵ m/s حدود ۰/۴ و برای سرعت ۲۷/۵ m/s حدود ۱/۰۵ است، ولی شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در خروجی نازل حدود ۰/۲ است و با افزایش سرعت این مقدار افزایش جزیی دارد. با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا توسط نازل بستگی به سرعت جریان هوا داشته و با افزایش سرعت این کاهش نیز بیشتر می‌شود. برای سرعت ۲۷/۵ m/s، کاهش شدت اغتشاش‌ها حدود ۲۰٪ است.



شکل ۸: نسبت انحراف سرعت به سرعت متوسط در ورودی و خروجی نازل N_1 بر حسب سرعت جریان در خروجی نازل



شکل ۹: تغییرات شدت اغتشاش‌های سرعت در ورودی و خروجی نازل (N_1) بر حسب سرعت جریان هوا در خروجی نازل

در ارتباط با کاهش میزان شدت اغتشاش‌های جریان هوا در نازل، تئوری‌های برودمن [۱۳] و تئوری پراتنل [۱۴] ارایه شده است. نسبت شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقاطع خروجی به ورودی طبق رابطه (۷):

$$\mu_c = \frac{u_o'^2}{u_i'^2} \quad (7)$$

محاسبه می‌شود. در رابطه فوق u_o' ، اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل و u_i' ، اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل است. مقدار نسبت شدت اغتشاش‌های جریان هوا طبق تئوری برودمن از رابطه (۸):

$$\mu_c = \frac{3}{4c^2} [\ln(4c^3) - 1] \quad (8)$$

محاسبه می‌شود. ولی این مقدار طبق تئوری پراتنل طبق رابطه (۹):

$$\mu_c = \frac{1}{c^2} \quad (9)$$

محاسبه می‌شود که در آن c نسبت سطوح مقطع ورودی به خروجی نازل

- کاهش غیریکنواختی از $0/23$ به $0/3$ افزایش می‌یابد.
- نسبت طول به قطر ورودی نازل تأثیر زیادی بر روی کاهش غیریکنواختی جریان هوا و اغتشاش‌های آن ندارد. بنابراین با کاهش این نسبت از $1/2$ به $0/9$ می‌توان طول نازل را حدود 25% کوتاه نمود.
- نازل طراحی شده طبق رابطه (۱)، از دو منحنی تشکیل شده که نقطه تقاطع دو منحنی آن (نقطه عطف) X_i است. با کاهش نسبت $\frac{X_i}{L}$ از $0/3$ به $0/175$ ، منحنی نازل در قسمت خروجی یکنواخت‌تر شده و در نتیجه می‌توان آن را کوتاه نمود. کاهش نسبت فوق از $0/3$ به $0/175$ ، تأثیری بر روی کاهش غیریکنواختی جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن ندارد. در این حالت با توجه به یکنواختی قسمت خروجی نازل می‌توان طول آن را نیز حدود 9% کوتاه نمود.
- با توجه به بحث‌های انجام شده، می‌توان طول نازل را حدود 62% کاهش داده، به‌طوریکه کیفیت جریان خروجی نازل، برای استفاده در تونل باد عمودی مناسب باشد.

۵- فهرست نمادها

c	نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی نازل
D	قطر خروجی
D_i	قطر ورودی
R	فاصله عمودی دیواره نازل نسبت به محور مرکزی آن
L	طول نازل
T_u	شدت اغتشاش‌های جریان هوا
\bar{U}	سرعت متوسط جریان هوا
u'	اغتشاش‌های جریان هوا
X_i	نقطه مشترک دو منحنی دیواره نازل
$\sigma(U)$	مقدار انحراف سرعت، از سرعت متوسط
μ_c	نسبت شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقاطع ورودی و خروجی نازل

۶- مراجع

- [۱] اردکانی محمدعلی، "تونل باد با سرعت پایین، اصول طراحی و کاربرد"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اردیبهشت ۱۳۸۸
- [۲] اردکانی، انوری، سعیدی و نکویان، "بررسی و تحلیل توزیع فشار در یک نازل تونل باد"، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، جلد اول، تابستان ۱۳۹۰
- [3] Pope, A. and Goin, K.L., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc, 1984
- [4] Morel, T., "Comprehensive Design of Axi-symmetric Wind Tunnel Contraction", ASME J. Fluids Eng. 97,

توسط نازل‌های N_1 و N_2 و N_3 را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق کاهش غیریکنواختی برای نازل N_1 حدود $0/23$ و برای نازل‌های N_2 و N_3 حدود $0/28$ و $0/3$ است. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان تشخیص داد، با تغییر نقطه عطف $\frac{X_i}{L}$ از $0/3$ به $0/175$ تأثیر نازل بر کاهش شدت اغتشاش‌ها و کاهش غیریکنواختی در سرعت‌های بالاتر از 15 m/s ناچیز است. بنابراین می‌توان از نازلی با نقطه عطف $\frac{X_i}{L} = 0/175$ برای طراحی تونل باد عمودی استفاده نمود. در این حالت، با توجه به اینکه تغییرات منحنی نازل در قسمت خروجی کمتر است، بنابراین می‌توان این قسمت از نازل را کوتاه نمود. با مقایسه نتایج نازل‌های N_1 با N_2 و N_3 می‌توان تشخیص داد که نسبت سطوح نازل نقش مهمی در کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا دارد. با افزایش نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی نازل، کاهش شدت اغتشاش‌ها و همچنین کاهش غیریکنواختی جریان بیشتر خواهد بود، ولی با توجه به اینکه معمولاً از تونل بادهای عمودی برای آزمایش‌های اسپین هواپیما و یا شبیه‌سازی سقوط آزاد استفاده می‌شود، شدت اغتشاش‌های آن در مقایسه با تونل بادهای آیرودینامیکی از اهمیت کمتری برخوردار است، بنابراین می‌توان برای تونل باد عمودی نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی کوچکتری را در نظر گرفت. همچنین کاهش نسبت طول به قطر ورودی نازل، از $1/2$ به $0/9$ نقش زیادی بر عملکرد نازل در کیفیت جریان ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، کاهش طول نازل است که با استفاده از نتایج آن بتوان ارتفاع نازل تونل باد عمودی را که برای شبیه‌سازی عملیات چتربازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کاهش داد. با توجه به نتایج آزمایش‌های به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

- شدت اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی و خروجی نازل، بستگی به سرعت جریان هوا دارد. با افزایش سرعت جریان هوا، این نسبت کاهش یافته و برای سرعت‌های بالاتر از 20 m/s ، این نسبت تقریباً ثابت است. برای سرعت‌های بالاتر از 20 m/s ، نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، با روابط ارائه شده توسط برودمن و پرانتل هم‌خوانی مناسبی دارد.
- کاهش شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل بستگی شدیدی به نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی نازل دارد. با کاهش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل از $1/2$ به $6/25$ ، نسبت کاهش شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل از $0/2$ به $0/4$ افزایش می‌یابد. ولی در این حالت می‌توان طول نازل را حدود 28% کوتاه نمود.
- کاهش غیریکنواختی سرعت متوسط جریان هوا در خروجی نازل بستگی به نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی آن دارد. هنگامیکه سطح مقطع ورودی به خروجی نازل از $1/2$ به $6/25$ کاهش می‌یابد،

- Ghorbanian, K., "Control of Pressure Gradient in the Contraction of a Wind Tunnel", World Academi of Science, Engineering and Technology J., Vol. 40 , 2008
- [10] Rouse, H. and Hassan, M. M., "Cavitation-free Inlets and Contractions", Mech. Eng., Vol. 71, pp. 213- 216.
- [11] Jorgensen, F. "How to measure turbulence with hotwire anemometers". Dantee dynamics Info, 2002
- [12] Ardekan, M. A., Farhani F., "Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures", J. Flow Measurement and Instrumentation 20174-179, 2009
- [13] Batchelor, G.K., "The Theory of Homogeneous", Cambridge, P.74
- [14] Prandtl, L., "Herstellung einwandfreier luftstrome, Handbuch der Experimentalphysik", Bd. 4, 2 Teil, Akademische Verlagsgesellschaft, S., pp. 65-106, 1932
- pp. 225-233, 1975
- [5] Morel, T., "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions", ASME J. Fluids Eng., Vol. 119, pp. 371-378, 1997
- [6] Fang, F., "A Design method for Contractions with Square End Sections", ASME J. Fluids Eng., Vol. 99, pp. 454-458, 1997
- [7] 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, Vol. 89, pp. 247-262, 2001
- [8] Callan, J., and Marusic, I., "The Effect of a Changing Aspect Ratio Through a Wind Tunnel Contraction", AIAA 19- 2461, Fluids, 2000
- [9] Dehghan, D., Mirzaei, M., Soltani, M. R., and