



بهینه کردن طول نازل تونل باد عمودی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی

محمدعلی اردکانی*

دانشیار پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۸/۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۵/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۶

چکیده

نازل یکی از قسمت‌های اصلی تونل باد عمودی می‌باشد، طول نازل در این نوع تونل‌بادهای از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، به طوری که با کاهش آن می‌توان هزینه ساخت تونل باد را کاهش داد. با استفاده از نرم‌افزار فلونت فلوینت جریان هوا در نازل شبیه‌سازی شده و طول آن بهینه شده است. به‌منظور کاهش طول نازل، نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل، نسبت طول نازل به قطر ورودی آن و همچنین پروفیل نازل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی نشان می‌دهد که نازلی با نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی ۶/۲۵، طول به قطر ورودی ۰/۹ و فاصله نقطه عطف از ورودی نازل به طول آن ۰/۱۷۵ برای طراحی تونل باد عمودی مناسب است. نتایج عددی توسط تحقیقات تجربی صحه‌گذاری شد. در روش تجربی مدل نازل ساخته شده و با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ، جریان هوا در نازل مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان طول نازل را ۶۰٪ کاهش داد.

کلمات کلیدی: نازل؛ روش عددی؛ روش تجربی؛ توزیع سرعت جریان هوا؛ شدت اغتشاش‌های جریان هوا.

Optimization of a vertical wind tunnel nozzle length using numerical and experimental methods

M.A. Ardekani*

Assoc. Prof., Mech. Eng., Iranian Research Organization for Science and Technology (I.R.O.S.T.), Tehran, Iran

Abstract

Nozzle is an important component in vertical wind tunnels. Nozzle length of this type of wind tunnel is very important, so with length reduction, the cost of building of wind tunnel can be reduced. Using FLUENT software, the flow in the nozzle is simulated and its length is optimized. In this paper, considerations such as reduction of the ratio of nozzle cross section area at inlet and outlet and nozzle length to inlet diameter ratio and truncation of the nozzle cone at the outlet have been used to reduce nozzle length. Numerical results indicate that the nozzle with the ratio of cross section 6.25 and nozzle length to inlet diameter ratio 0.9 for designing is suitable. In experimental method, the model of nozzle have built and air flow through the nozzle was studied using hot-wire anemometer. According to the results, the nozzle length can be reduced up to 60%. he abstract should be written with 100 to 200 words (Times New Roman 9).

Keywords: Nozzle; Numerical method; Experimental method; Velocity distribution; Turbulence intensity.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۷۳۹۸۹۶۹، فکس: ۰۲۱۸۹۷۸۲۶۶۶

آدرس پست الکترونیک: ardekani@irost.ir

۱- مقدمه

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

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

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 بین دو منحنی برقرار می‌باشد. شکل ۱ منحنی شکل نازل را به صورت بی‌بعد، طبق معادله (۱) نشان می‌دهد.

با توجه به هزینه ساخت و مشکلات اجرای آن، مسئله عمده در طراحی نازل تونل باد عمودی، کوتاه نمودن طول آن می‌باشد. به طوری که کوتاه نمودن طول آن تاثیر شدیدی بر روی افت فشار، غیر یکنواختی سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوای خروجی آن نداشته باشد. با توجه به معادله (۱) و شکل ۱ می‌توان طول نازل را از ۳ طریق کاهش داد: ۱- با کاهش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل ۲- با کاهش نسبت طول به قطر ورودی نازل ۳- با تغییر مکان نقطه عطف نازل، پرفیل نازل را طوری طراحی نمود که بتوان مقاطعی از آن را کوتاه نمود.

با استفاده از روش‌های ارایه شده می‌توان طول نازل را کوتاه نمود، این کاهش سبب می‌شود که کیفیت جریان هوا در خروجی نازل تغییر کند. لذا نیاز است در این زمینه تحقیقات لازم انجام پذیرد. با توجه به اینکه با استفاده از پارامترهای مختلف می‌توان طول نازل را کاهش داد، لذا در صورتی که فقط از تحقیقات تجربی استفاده شود، نیاز به مدل‌های مختلف و گوناگونی خواهد بود. در نتیجه هزینه آن بسیار بالا خواهد رفت. بدین منظور نیاز است که از روش‌های عددی استفاده شود. در تحقیقات عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، تاثیر تغییر پارامترهای مختلف نظیر تاثیر نسبت سطح ورودی به سطح خروجی نازل، نسبت طول به قطر ورودی نازل و همچنین تغییر نقطه عطف را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این حالت با توجه به نتایج به دست آمده، ابعاد و پرفیل نازل کوتاه شده مشخص می‌شود.

همچنین با توجه به اینکه ساخت اتاق آزمون و یا محوطه پرواز دایروی شکل، مشکل می‌باشد، لذا با استفاده از روش‌های عددی، نتایج عملکرد نازل با سطح مقطع مدور را با

نازل تونل باد یکی از اجزای مهم تونل باد است که قبل از اتاق آزمون و یا محوطه پرواز قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی نازل تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی می‌باشد. همچنین در صورتیکه نازل به صورت مناسب طراحی و ساخته شود، شدت اغتشاش‌های جریان هوا و غیریکنواختی سرعت متوسط جریان هوا را کاهش می‌دهد [۱ و ۲]. لذا طراحی نازل از اهمیت خاصی برخوردار است. در زمینه طراحی نازل، پژوهشگران، تحقیقات تجربی و عددی متعددی را انجام داده و طرح‌های را ارائه نموده‌اند. ساده‌ترین و متداول‌ترین روش طراحی نازل، توسط مورل^۱ [۳ و ۴] پیشنهاد شده که بر اساس تئوری جریان پتانسیل است. فانگ^۲ و همکارانش [۵] و [۶] نیز جریان در نازل یک تونل باد را به صورت عددی و تجربی، ارزیابی نموده و با اندازه‌گیری توزیع فشار و توزیع سرعت و مقایسه نتایج تجربی با عددی نشان دادند، طرح نازل فوق، قابلیت کاربردی شدن را دارد. گالن و مارسیک^۳ [۷] تغییر نسبت سطح مقطع را در نازل یک تونل باد بررسی نموده و کیفیت جریان هوا در خروجی نازل را مورد تحلیل قرار دادند. در این راستا منشادی و همکاران نیز، به بحث کنترل گرادیان فشار در نازل تونل باد پرداخته و تاثیر زبری مصنوعی را بر توزیع فشار در دیواره نازل، بررسی و آزمایش نمودند. نتایج آزمون نشان داده است که تاثیر نوار زبری بر توزیع فشار و اغتشاش‌های جریان، قابل ملاحظه بوده و شدت کاهش اغتشاش‌ها، به موقعیت نوار زبری بستگی دارد [۸]. اردکانی و همکاران به منظور بررسی پدیده جدایش در نازل، توزیع فشار بر روی بدنه آن را برای تعدادی مدل اندازه‌گیری نموده و مشخص نمودند در صورتی که پدیده جدایش اتفاق نیافتد، افت فشار در نازل، بستگی به جریان ورودی آن دارد [۹]. شکل نازل را می‌توان به روش‌های گوناگونی که توسط پژوهشگران مختلفی ارایه شده، طراحی نمود. یکی از روش‌های طراحی برای منحنی دیواره نازل، استفاده از دو منحنی ورودی و خروجی (با نقطه مشترک X_i)، نقطه عطف است که معادله این دو منحنی به صورت زیر است [۱۰]:

¹ Morel

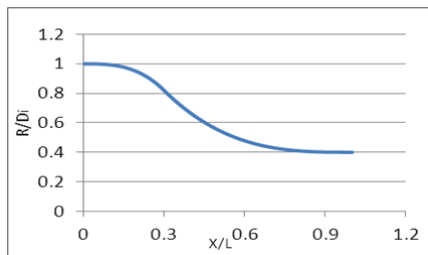
² Fang

³ Callan and Marusic

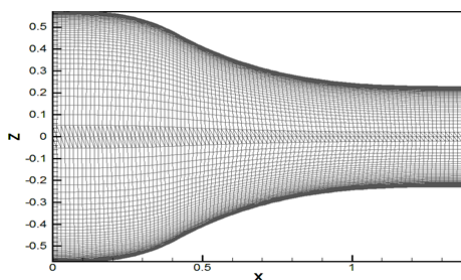
همچنین سرعت لحظه‌ای جریان هوا در خروجی نازل نیز محاسبه می‌شود، که با بررسی آن می‌توان عملکرد نازل را تشخیص داد. به‌منظور صحت‌گذاری داده‌ها، نیاز است که در ابتدا داده‌های به‌دست آمده را با داده‌های سایر پژوهشگران مقایسه نمود. لذا محاسبات برای نازلی با سطح مقطع ورودی و خروجی دایروی شکل به قطر ورودی ۱/۱۵ متر انجام شد. سرعت جریان هوای ورودی به نازل فوق، $12/8 \text{ m/s}$ فرض شده است که با توجه به اینکه نسبت سطوح ورودی به خروجی نازل $6/25$ است، سرعت جریان در خروجی نازل به 80 m/s می‌رسد.

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سرعت لحظه‌ای در خروجی نازل حدود $0/19 \text{ m/s}$ می‌باشد که با توجه به اینکه سرعت در این مکان حدود 80 m/s است، در نتیجه شدت اغتشاش‌ها برابر $0/23\%$ خواهد بود، لذا کاهش شدت اغتشاش‌های خروجی به ورودی برابر مقدار $0/329$ است. در ارتباط با کاهش میزان شدت اغتشاش‌های جریان هوا در نازل، تئوری‌های باچر [۱۱] و تئوری پرانتل [۱۲] ارایه شده است. نسبت شدت اغتشاش‌های جریان هوا در مقاطع خروجی به ورودی طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

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



شکل ۱- منحنی شکل نازل



شکل ۲- نمونه شبکه بندی دوبعدی

شکل‌های چند ضلعی نظیر شش ضلعی و هشت ضلعی مقایسه و بررسی می‌شوند.

در خاتمه به منظور صحت‌گذاری نتایج عددی، مدل نازل کوتاه شده را ساخته و با استفاده از تونل باد و تجهیزات اندازه‌گیری، جریان در ورودی و خروجی آن اندازه‌گیری شده و نتایج با نتایج عددی مقایسه می‌شوند. روش‌های عددی و تجربی مکمل یکدیگر بوده و هدف از این مقاله، کاهش طول نازل می‌باشد. در این مقاله در ابتدا روش تحقیق به صورت عددی و تجربی بیان شده، سپس نتایج داده‌های عددی تجزیه و تحلیل می‌شوند و در خاتمه نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده و پرفیل نازل انتخاب می‌شود.

۲ روش تحقیق

همانگونه که بیان شد، روش تحقیق به دو صورت عددی و تجربی می‌باشد.

۲-۱ روش عددی

رای شبيه سازی یک جریان به‌وسیله CFD ابتدا باید دامنه محاسباتی را تولید کرد، که از نرم افزار گمبیت برای مدل سازی، تولید شبکه محاسباتی و تعیین شرایط مرزی استفاده شده است. ابتدا هندسه نازل طبق معادلات (۱) شبکه‌بندی شده است. شکل ۲ نمونه شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق شبکه‌ها در نزدیکی دیوار نازل و یا به عبارت دیگر در لایه مرزی نزدیک به هم بوده ولی در مرکز نازل شبکه‌ها بازرتر می‌باشند. در نزدیکی دیواره‌های نازل ابعاد شبکه کمتر از $y^+ = 30$ می‌باشد. شرایط مرزی مسئله برای دیوار نازل شرط عدم لغزش می‌باشد. جریان هوا در ورودی نازل مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است، سرعت لحظه‌ای جریان هوا مطابق معادله $U(t) = \bar{U} + u'(t)$ می‌باشد. \bar{U} سرعت متوسط بوده و برای جریان فوق $12/8 \text{ m/s}$ است و $u'(t)$ نوسان سرعت لحظه‌ای بوده که به‌صورت موج سینوسی و دامنه آن 1 m/s است. با حل معادلات کوپل شده فشار و سرعت، انتخاب مدل $k-\omega$ SST برای قسمت لزجی، میدان محاسباتی حل می‌شود. همگرایی برای پارامترهای سرعت، پیوستگی و پارامترهای k و ω معیار $7-10$ می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، جریان هوا در نازل فوق حل شده و گرادیان فشار در امتداد نازل مشخص می‌شود.

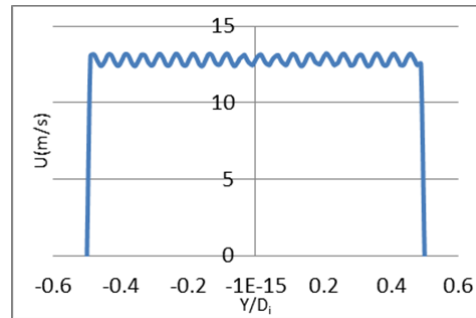
ضریب اصطکاک در امتداد دیوار نازل نیز بررسی شد، که نتیجه آن نبودن جدایش (ضریب اصطکاک سطح برابر، صفر) بر روی دیوار نازل می‌باشد.

۲-۲ روش تجربی

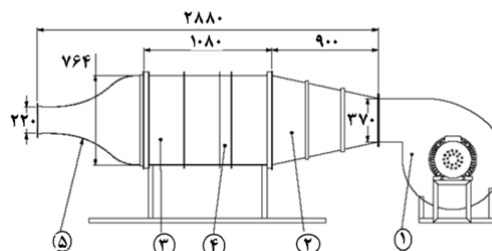
در این کار پژوهشی، به منظور صحت‌گذاری داده‌ها، بعد از آنکه نتایج عددی نازل مورد بررسی قرار گرفت، نازل بهینه مشخص شده و بر آن اساس مدل نازل ساخته شد. کلیه آزمایش‌های مربوط به نازل با استفاده از تونل باد انجام شده است. شکل ۴ تونل باد مورد نظر را نشان می‌دهد. در این تونل باد، فن از نوع سانتریفیوژ بوده که سرعت دورانی آن توسط سیستم کنترل دور تنظیم شده و در نتیجه سرعت جریان هوا در تونل باد تغییر می‌کند. این تونل باد، دارای یک دیفیوزر زاویه باز بین فن و اتاق آرامش بوده که به منظور جلوگیری از جدایش در آن، از ۲ عدد توری استفاده شده است. اتاق آرامش نیز به ابعاد $0.75 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ بوده که به منظور کاهش شدت اغتشاش‌ها و یکنواخت نمودن جریان هوا، از ۳ عدد توری و یک عدد لانه زنبوری استفاده شده است. در این آزمایش، توزیع فشار استاتیکی در امتداد دیواره نازل توسط فشارسنج ۳۲ کاناله اندازه‌گیری شده است. اوریفیس‌های لازم بر روی دیواره نازل نصب شده که با استفاده از شلنگ‌های مربوطه به فشارسنج الکترونیکی متصل شده است. خروجی فشارسنج نیز به کارت اخذ داده‌ها A/D متصل شده و داده‌ها از طریق آن به رایانه ارسال می‌شود. کارت اخذ داده‌ها از نوع NI بوده و ۱۶ بیتی می‌باشد. فشارسنج‌ها نیز دارای بازه ۱۲۵۰ پاسکال می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری سرعت و اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی و خروجی نازل از جریان سنج سیم داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شده که پراب آن یک بعدی می‌باشد. برای جابه‌جایی پراب جریان سنج سیم داغ نیز از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده که دقت جابه‌جایی آن حدود 0.1 mm می‌باشد [۱۳].

۳- نتایج تحقیقات

به منظور بهینه نمودن طول نازل، باید تغییرات نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل، تغییرات طول به قطر ورودی آن و همچنین تغییرات مکان نقطه عطف نازل مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه تأثیر تغییرات نسبت سطح مقطع



شکل ۳- توزیع سرعت ورودی به نازل



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

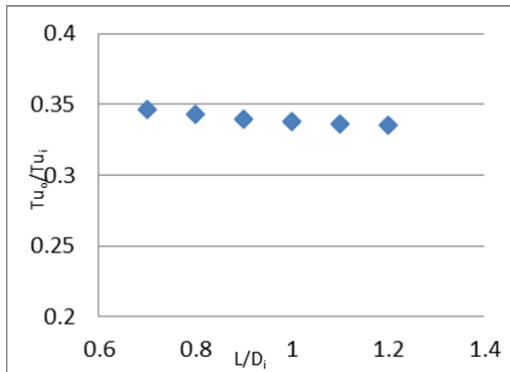
در رابطه فوق u'_o ، اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی نازل و u'_i ، اغتشاش‌های جریان هوا در ورودی نازل می‌باشد. مقدار نسبت شدت اغتشاش‌های جریان هوا طبق تئوری باچر طبق رابطه (۳):

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

محاسبه می‌شود. ولی این مقدار طبق تئوری پراتنل طبق رابطه (۴):

$$\mu_c = \frac{1}{c^2} \quad (4)$$

محاسبه می‌شود. در رابطه بالا، c نسبت سطوح مقاطع ورودی به خروجی نازل می‌باشد. با توجه به روابط فوق، کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا توسط نازلی که نسبت سطح مقاطع ورودی به خروجی آن $6/25$ است، طبق رابطه ارایه شده توسط باچر حدود 0.28 و طبق رابطه ارایه شده توسط پراتنل حدود 0.33 می‌باشد، که با مقدار 0.329 که از نتایج محاسبات به دست آمده هم‌خوانی مناسبی دارد. همچنین گرادبان فشار نامطلوب در شکل نازل فوق دیده نشده است.



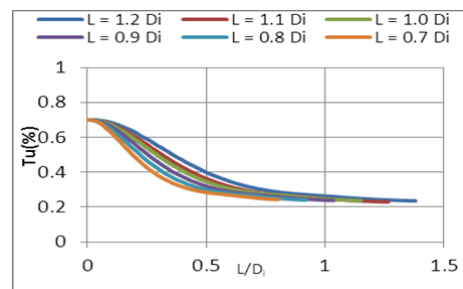
شکل ۶- منحنی کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های نازل در حالت‌های مختلف بر حسب نسبت طول به قطر

شکل ۷ توزیع فشار استاتیکی را در امتداد دیواره نازل‌های مورد نظر نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که توزیع فشار نازل‌هایی که طول آنها بزرگتر از 0.9 قطر ورودی است، دارای گرادیان فشار معکوس (شیب مثبت منحنی فشار) بر روی دیواره نازل نمی‌باشند. در نتیجه احتمال جدایش جریان در این نازل‌ها کم است. ولی برای نازل‌هایی با طول کوچکتر از 0.8 قطر ورودی گرادیان فشار معکوس دیده می‌شود. البته شدت آن ناچیز است و در نتیجه احتمال جریان معکوس در آنها نیز کم است. شکل ۸ توزیع سرعت جریان هوا را در خروجی نازل‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است نازل‌های با طول کوچکتر از 0.9 قطر ورودی، تغییرات سرعت زیادی را در خروجی خود ایجاد می‌کنند که باعث ایجاد غیریکنواختی زیاد در خروجی نازل می‌شود. این تغییرات شدید برای طراحی نازل تونل باد عمودی مناسب نمی‌باشد. شکل ۹ نیز بیشترین تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط در جهت جریان را برای نازل‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت هنگامی که L/D_i برابر 0.7 می‌باشد، اختلاف بیشترین و کمترین سرعت خروجی نازل برابر $5/5\%$ سرعت متوسط می‌باشد. با افزایش L/D_i به 1.2 ، این مقدار به کمتر از 1% سرعت متوسط می‌رسد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نازل با طول به قطر 0.9 انتخاب می‌شود، که در مقایسه با نازلی که طول به قطر آن 1.2 است، طول نازل 25% کاهش می‌یابد.

ورودی به خروجی نازل توسط پژوهشگران دیگر بررسی شده است [۱۱ و ۱۲]، لذا نیازی به بررسی آن در این قسمت نبوده و نسبت آن $6/25$ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- بررسی عددی اثر نسبت طول نازل به قطر ورودی آن

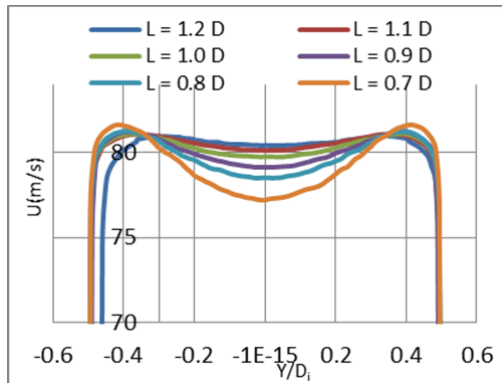
در این مرحله سعی بر آن است که با کوچک نمودن نسبت طول به قطر ورودی بتوان طول نازل را کاهش داد. نسبت طول به قطر نازل برای حالت‌های $1/1$ ، $1/0$ ، 0.9 ، 0.8 ، 0.7 مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است برای حالت‌های فوق، نسبت نقطه عطف X_1 به طول نازل L برابر 0.3 از ورودی نازل می‌باشد. شکل ۵ تغییرات شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در مرکز نازل با طول‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق شدت اغتشاش‌های جریان هوا در طول نازل کاهش یافته که این کاهش برای نازل‌های مختلف یکسان است و مقدار آن از 0.7% به 2.3% کاهش می‌یابد. ولی گرادیان کاهش شدت اغتشاش‌ها با کاهش طول نازل افزایش می‌یابد. شکل ۶ نسبت کاهش شدت اغتشاش‌ها را در نازل با طول‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶ کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی بستگی به طول نازل ندارد. این کاهش حدود 3.4% می‌باشد که با نتایج سایر پژوهشگران هم‌خوانی مناسبی دارد. این نسبت طبق معادلات ارایه شده توسط باچر^۱ [۱۱] برابر 0.28 و طبق معادلات ارایه شده توسط پرائتل^۲ [۱۲] برابر 0.33 است.



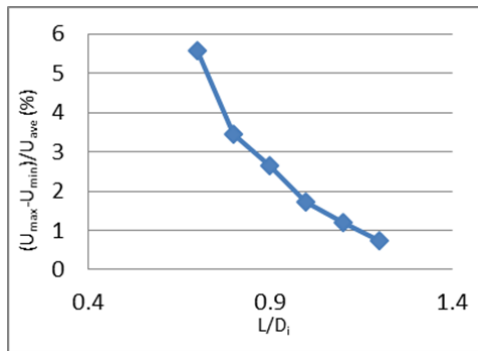
شکل ۵- تغییرات شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در امتداد محور مرکزی نازل در حالت‌های مختلف

¹ Batchelor

² Prandtl



شکل ۸- توزیع سرعت در خروجی نازل برای نازل با نسبت طول‌های مختلف

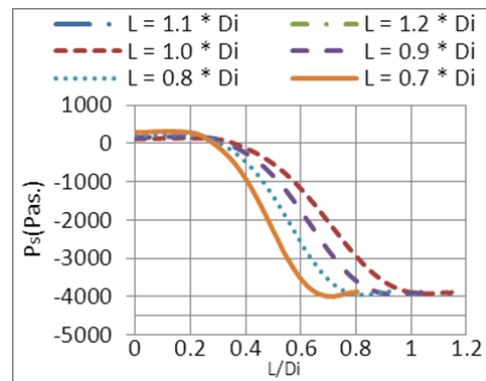


شکل ۹- بیشترین تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط در خروجی نازل بر حسب نسبت طول به قطر ورودی نازل

شکل ۱۲ توزیع فشار استاتیکی را در نزدیکی دیواره نازل‌هایی که فاصله نقطه عطف از ورودی آن تغییر می‌کند، را نشان می‌دهد، همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، گرادین مثبت فشار در امتداد نازل وجود ندارد. شکل ۱۳ توزیع سرعت در خروجی نازل را برای حالت‌هایی که فاصله بی‌بعد نقطه عطف از ورودی نازل تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. هنگامی که نقطه عطف نازل به سمت ورودی نازل منتقل می‌شود، تغییرات سرعت و به عبارت دیگر غیر یکنواختی آن افزایش می‌یابد.

۳-۲ بررسی تغییر مکان نقطه عطف نازل

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد با کاهش نسبت قطر ورودی به طول نازل به مقدار ۰/۹، طول نازل ۲۵٪ کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش مجدد طول نازل، می‌توان قسمت‌هایی از آن را که تغییرات آن نسبت به طول ناچیز است، کوتاه نمود. در صورتی که نقطه عطف به سمت بالادست یعنی به سمت ورودی نازل تغییر مکان دهد، تغییرات منحنی نازل در خروجی نازل کمتر بوده و لذا می‌توان قسمت انتهایی نازل را کوتاه کرد. بدین منظور طول به قطر نازل را ۰/۹ در نظر گرفته و تغییر فاصله بی‌بعد نقطه عطف از ورودی را برای حالت‌های ۰/۱، ۰/۱۷۵، ۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۴ بررسی می‌شود. شکل ۱۰ منحنی شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در امتداد محور مرکزی نازل را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در امتداد نازل کاهش یافته و روند کاهش آن نیز مشابه می‌باشد. شیب کاهش شدت اغتشاش‌ها با افزایش فاصله نقطه عطف از دهانه ورودی کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ منحنی کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های نازل را بر حسب فاصله نقطه عطف از ورودی نازل نشان می‌دهد. این نسبت از مقدار ۰/۳۵ در فاصله $\frac{X_i}{L} = 0.1$ به مقدار ۰/۳۱ برای $\frac{X_i}{L} = 0.4$ کاهش می‌یابد.

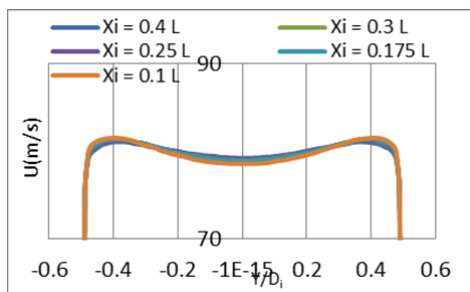


شکل ۱۰- تغییرات فشار استاتیکی در امتداد دیواره نازل با نسبت طول‌های مختلف

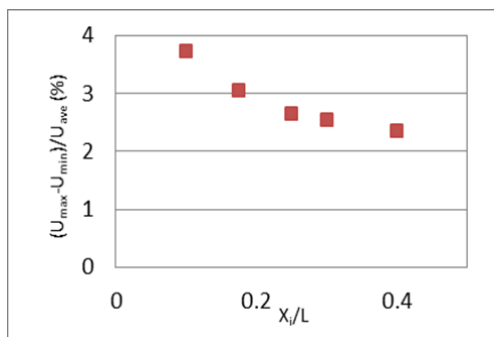
نقطه عطف نشان می‌دهد. هنگامی که $X_i = 0.1 L$ می‌باشد، این تغییرات حدود ۳/۷٪ و هنگامی که $X_i = 0.4 L$ است، این تغییرات حدود ۲/۳٪ است. با توجه به شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ فاصله بی‌بعد نقطه عطف از ورودی ۰/۱۷۵ انتخاب شد. در این حالت نازل قابلیت کوتاه شدن، حدود ۷٪ از طول خود را دارا می‌باشد.

۳-۳ بررسی اثر شکل مقطع ورودی نازل

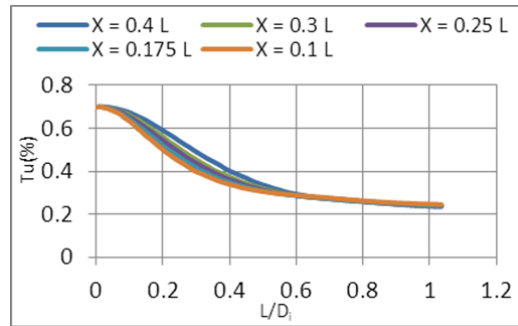
برای ساخت دیواره‌های محوطه پرواز از شیشه‌های پلی کربنات استفاده می‌شود که به صورت صفحات تخت در دسترس می‌باشند. در نتیجه سطح مقطع محوطه پرواز باید به صورت چند ضلعی‌های منتظم ساخته شود. در این قسمت با توجه به انتخاب شدن طول و نقطه عطف نازل، تعداد وجوه نازل را تغییر داده و اثر آن را بر جریان عبوری از آن بررسی می‌کنیم.



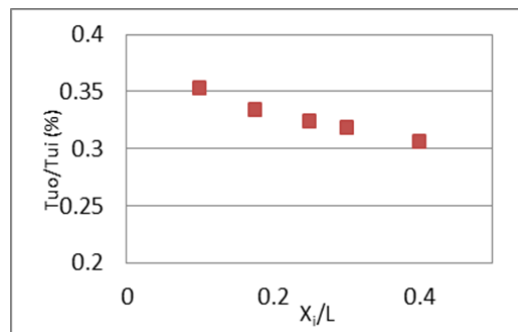
شکل ۱۳- منحنی توزیع سرعت در خروجی نازل برای حالت‌هایی که فاصله نقطه عطف از ورودی آن تغییر می‌کند



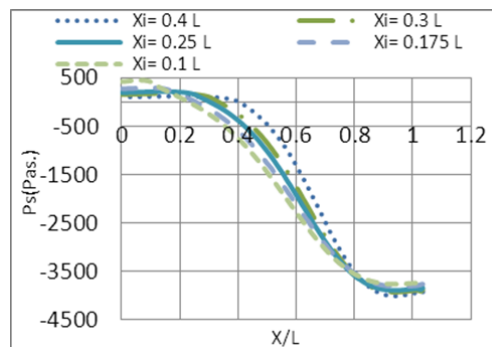
شکل ۱۴- بیشترین تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط در خروجی نازل بر حسب تغییرات فاصله بی‌بعد نقطه عطف



شکل ۱۰- منحنی شدت اغتشاش‌های سرعت جریان هوا در امتداد محور مرکزی نازل‌هایی که فاصله نقطه عطف از ورودی آن تغییر می‌کند

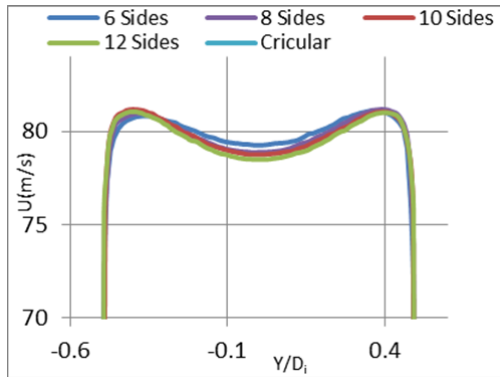


شکل ۱۱- منحنی کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های نازل‌ها بر حسب فاصله بی‌بعد نقطه عطف از ورودی



شکل ۱۲- منحنی توزیع فشار استاتیکی در نزدیکی دیواره و در امتداد آن، برای نازل‌هایی که فاصله نقطه عطف از ورودی آن تغییر می‌کند

شکل ۱۴ بیشترین تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط در خروجی نازل را بر حسب تغییرات فاصله بی‌بعد



شکل ۱۷- منحنی توزیع سرعت در خروجی نازل‌ها با مقاطع مختلف

متوسط در خروجی نازل را نشان می‌دهد. همه نازل‌ها به غیر از نازل ۶ وجهی مقادیر کاهش غیر یکنواختی آن‌ها نزدیک به هم می‌باشد.

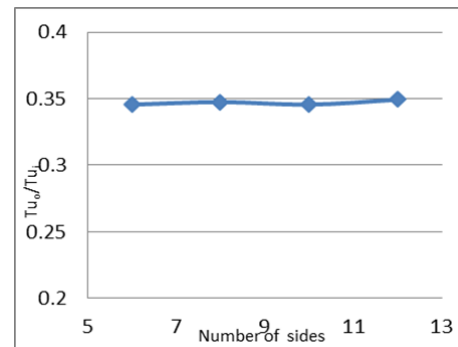
۴-۳ مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

با کاهش نسبت سطح ورودی به خروجی نازل از ۱۲ به ۶/۲۵، همچنین کاهش طول به قطر ورودی نازل از ۱/۲ به ۰/۹ و انتقال نقطه عطف نازل $\frac{X_i}{L}$ از ۰/۳ ورودی به ۰/۱۷۵ و کوتاه نمودن انتهای آن، طول نازل حدود ۶۸٪ کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه نتایج عددی نازل با سطح مقطع دایروی با نازل با سطح مقطع چند ضلعی مشخص شد که نتایج با یکدیگر هم‌خوانی مناسبی دارند. لذا در این قسمت نیاز است که نتایج عددی صحه‌گذاری شوند. بدین منظور سه نمونه مدل نازل ساخته شد و آزمایش‌های تجربی انجام گرفت. در این قسمت نتایج عددی با نتایج تجربی، مدل نازلی که سطح مقطع آن هشت ضلعی بوده و نسبت سطوح ورودی به خروجی آن ۶/۲۵ است، مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است طول به قطر ورودی نازل مدل ۰/۹ و نقطه عطف آن L $X_i = 0/175$ از ورودی قرار گرفته است. این مدل ۷/۸٪ نازل واقعی می‌باشد.

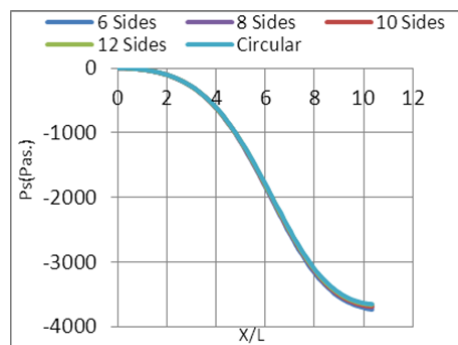
شکل ۱۹ تغییرات بی‌بعد شده شدت اغتشاش‌های جریان هوا در امتداد نازل را در سرعت ۲۰ m/s نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج عددی و نتایج تجربی، شدت اغتشاش‌های جریان هوا را نسبت به شدت اغتشاش‌های

برای این منظور جریان هوا در نازل برای سطح مقطع‌هایی به شکل ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ضلعی و دایروی بررسی و مقایسه می‌شود. شکل ۱۵ منحنی نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل را نشان می‌دهد. این نسبت شدت اغتشاش‌ها بستگی به شکل سطح مقطع نازل نداشته و نتایج به دست آمده با مراجع [۳ و ۴] هم‌خوانی دارد. شکل ۱۶ منحنی فشار استاتیکی را بر روی دیواره نازل (برای مقاطع مختلف) نشان می‌دهد. که برای تمامی نازل‌ها با سطوح مختلف شبیه به هم می‌باشند.

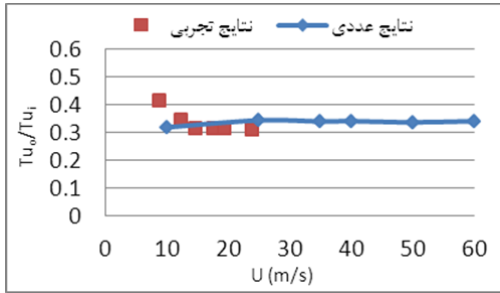
شکل ۱۷ منحنی‌های سرعت در خروجی نازل‌ها با مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است میزان انحنای منحنی سرعت در خروجی نازل‌ها به ترتیب از حالت ۶ وجه تا حالت دایره‌ای شکل بیشتر می‌شود. شکل ۱۸ میزان کاهش غیر یکنواختی سرعت



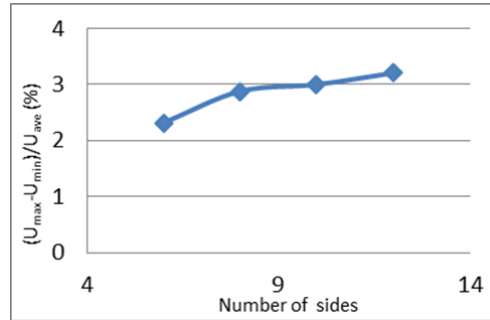
شکل ۱۵- منحنی کاهش نسبت شدت اغتشاش‌های نازل با مقاطع مختلف



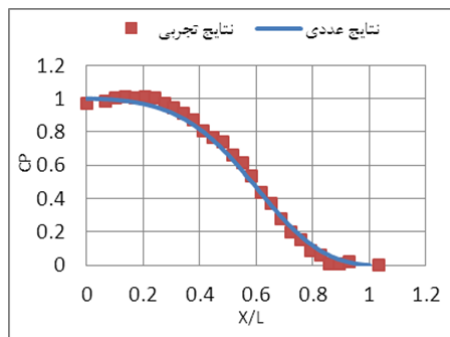
شکل ۱۶- منحنی توزیع فشار استاتیکی بر روی دیواره نازل‌ها با مقاطع مختلف



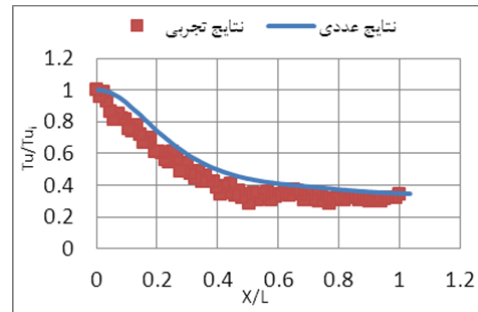
شکل ۲۰- تغییرات شدت اغتشاش‌های نازل بر حسب سرعت جریان هوا (مقایسه نتایج عددی با تجربی)



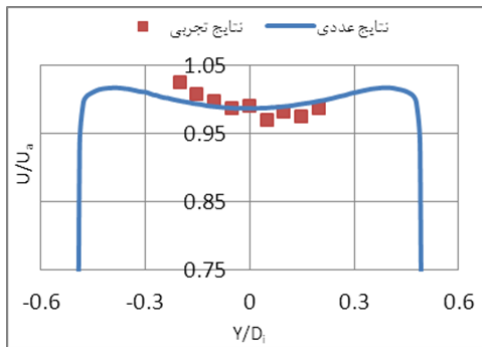
شکل ۱۸- بیشترین تغییرات سرعت نسبت به سرعت متوسط در خروجی نازل‌ها با مقاطع مختلف



شکل ۲۱- توزیع فشار استاتیکی بر روی دیواره نازل (مقایسه نتایج عددی با تجربی)



شکل ۱۹- تغییرات بی‌بعد شده شدت اغتشاش‌ها در امتداد نازل (مقایسه نتایج عددی با تجربی)



شکل ۲۲- توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل (مقایسه نتایج عددی با تجربی)

جریان هوا در ورودی بی‌بعد نموده‌ایم. شکل ۱۹ نشان‌دهنده هم‌خوانی داده‌های تجربی و عددی می‌باشد. شدت اغتشاش‌ها در خروجی نازل حدود ۳۴٪ ورودی آن می‌باشد. شکل ۲۰ تغییرات نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل را برحسب سرعت جریان هوا نشان می‌دهد که داده‌های عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با مقایسه شکل فوق می‌توان دریافت که داده‌های عددی و تجربی در سرعت‌های بالاتر از ۱۵ m/s هم‌خوانی مناسبی دارند. هنگامیکه سرعت خروجی نازل کمتر از ۱۰ m/s باشد، سرعت ورودی به آن برای مدل فوق کمتر از ۱/۸ m/s خواهد بود، که خطا در اندازه‌گیری در سرعت‌های کم بیشتر خواهد بود.

شکل ۲۱ توزیع ضریب فشار استاتیکی بر روی دیواره نازل را نشان می‌دهد. ضریب فشار استاتیکی طبق رابطه (۵)

$$CP = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (۵)$$

تعریف می‌شود. در رابطه فوق P_0 فشار استاتیکی در خروجی نازل و U_0 سرعت جریان هوا در خروجی نازل می‌باشد. همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، نتایج عددی و تجربی با عددی هم‌خوانی مناسبی دارد. شکل ۲۲ توزیع سرعت جریان هوا در خروجی نازل را نشان می‌دهد. در

۴- جمع‌بندی

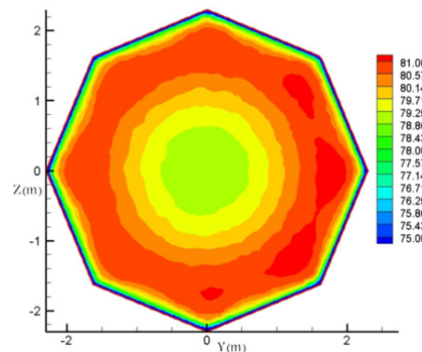
به‌منظور بهینه نمودن طول نازل تونل باد عمودی، آن را با استفاده از نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی نموده و هدف از شبیه‌سازی بررسی جریان خروجی نازل در شرایط مختلف می‌باشد. طول نازل تونل باد عمودی را باید کوتاه نموده، تا هزینه ساخت و همچنین مشکلات ساخت آنرا نیز کم نمود. بدین منظور پارامترهای مختلفی را برای کوتاه نمودن طول نازل در نظر گرفته و جریان هوا در آن شبیه‌سازی شده و نتایج زیر حاصل شده است:

- با توجه به تحقیقات سایر پژوهشگران [۹ و ۱۰] نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل را از ۱۲ به ۶/۲۵ کاهش داده، که در این حالت نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل از ۰/۲ به ۰/۳۳ افزایش می‌یابد. نتایج عددی به دست آمده، این نسبت را تأیید نموده، که بیانگر صحه‌گذاری نتایج عددی است. هنگامی که سطح مقطع ورودی به خروجی نازل را از ۱۲ به ۶/۲۵ کاهش می‌یابد، طول نازل حدود ۰/۲۸ کاهش می‌یابد.

- با استفاده از تحقیقات عددی، نسبت طول به قطر ورودی نازل، مورد بررسی قرار گرفت. نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل، بستگی به نسبت طول به قطر ورودی نازل نداشته، ولی توزیع سرعت در خروجی نازل بستگی به طول به قطر آن دارد. با کوتاه شدن طول نازل، اختلاف بیشترین و کمترین سرعت نسبت به سرعت متوسط جریان هوا افزایش می‌یابد. هنگامی که نسبت طول به قطر نازل ۰/۷ می‌باشد، این اختلاف ۵/۵٪ و با افزایش این نسبت، این اختلاف کاهش یافته و برای $L = 1/2 Di$ این اختلاف حدود ۰/۸٪ خواهد بود. با انتخاب $Di = 0/9 L$ می‌توان طول نازل را حدود ۲۵٪ کاهش داد.

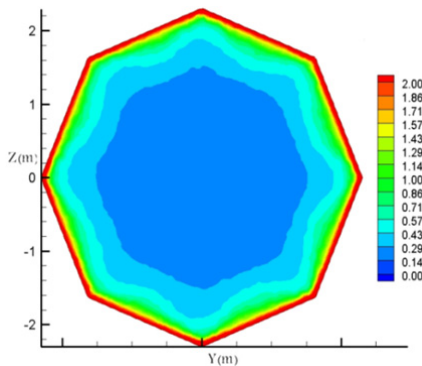
- نقطه عطف نازل را از ۰/۳ طول نازل به ۰/۱۷۵ طول نازل، و به سمت دهانه ورودی آن انتقال داده و بدین ترتیب منحنی خروجی نازل، یکنواخت‌تر می‌شود. در این حالت می‌توان طول نازل را ۷٪ کوتاه نمود. تأثیر این کوتاه نمودن برای نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی نازل حدود ۰/۰۴ بوده که ناچیز می‌باشد. همچنین مقدار یکنواختی جریان هوا (اختلاف بیشترین و کمترین سرعت نسبت به سرعت متوسط) از ۲/۵٪ به ۳/۵٪ افزایش می‌یابد.

شکل فوق سرعت جریان هوا با استفاده از سرعت متوسط جریان هوا U_a بی‌بعد شده است. نتایج عددی با نتایج تجربی هم‌خوانی مناسبی دارد. با توجه به شکل‌های ۱۹ الی ۲۲ نتایج عددی با استفاده از نتایج تجربی صحه‌گذاری می‌شوند. به منظور درک بهتر سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن، کانتور سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن در خروجی نازل ۸ وجهی در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل‌های فوق نشان داده شده است، سرعت در نزدیکی دیواره کم بوده که ناشی از لایه مرزی می‌باشد. همچنین در نزدیکی دیواره نازل اغتشاش‌های جریان هوا بالا بوده که با نزدیک شدن به مرکز نازل، اغتشاش‌های جریان هوا کاهش می‌یابد.



شکل ۲۳- کانتور سرعت جریان هوا در خروجی نازل ۸

وجهی



شکل ۲۴- کانتور شدت اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی

نازل ۸ وجهی

- [5] Fang F (1997) A design method for contractions with square end sections. *ASME J Fluids Eng* 99: 454–458.
- [6] Fang F, Chen JC, Hong YT (2001) Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square wind tunnel contraction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89: 247–262.
- [7] Callan J, Marusic I (2000) The effect of a changing aspect ratio through a wind tunnel contraction. *AIAA* 2000-2461.
- [8] Dehghan D, Mirzaei M, Ghorbanian K (2008) Control of pressure gradient in the contraction of a wind tunnel. *World Academi of Science, Engineering and Technology* 1: 4–29
- [۹] اردکانی م ع، انوری آ، سعیدی ع، نکوئیان ک (۱۳۹۰) بررسی و تحلیل توزیع فشار در یک نازل تونل باد. نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، سال سیزدهم، جلد اول.
- [10] Rouse H, Hassan MM (1944) Cavitation-free inlets and contractions. *Mech Eng* 71: 213–216.
- [11] Batchelor GK (1956) *The theory of homogeneous*. Cambridge, P.74.
- [12] Prandtl L (1932) *Herstellung einwandfreier luftstrome*, *Handbuch der Experimentalphysik*. Bd. 4, 2 Teil, Akademische Verlagsgesellschaft, S. 65–106.
- [۱۳] اردکانی م ع (۱۳۸۵) جریان سنج سیم داغ، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

• با توجه به اینکه محوطه پرواز تونل باد، به شکل چند ضلعی می‌باشد، نازل ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ ضلعی را شبیه‌سازی نموده و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هم‌خوانی مناسبی بین نازل‌های شبیه‌سازی شده، وجود دارد.

• با توجه به نتایج عددی، نازلی که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی آن ۶/۲۵، طول به قطر ورودی آن ۰/۹ و نقطه عطف منحنی‌های نازل $X_i = 0/175 L$ است، انتخاب شد. مدل این نازل ساخته شده و آزمایش‌های لازم بر روی آن انجام پذیرفته و داده‌های عددی مربوط به نازل بهینه شده توسط نتایج تجربی صحت‌گذاری شد. بدین ترتیب طول نازل حدود ۶۰٪ کاهش یافته، که هزینه ساخت تونل باد را به مراتب کاهش می‌دهد.

منابع

- [1] Pope A, Goin KL (1984) *Low speed wind tunnel testing*. 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc.
- [۲] اردکانی م ع (۱۳۸۸) تونل باد با سرعت پایین، اصول طراحی و کاربرد. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [3] Morel T (1975) *Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions*. *ASME J Fluids Eng* 97: 225–233.
- [4] Morel T (1997) *Design of two-dimensional wind tunnel contractions*. *ASME J Fluids Eng* 119: 371–378.