

## بررسی و تحلیل توزیع فشار در یک نازل تونل باد

نازل یکی از اجزای مهم تونل باد بوده که وظیفه اصلی آن، تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و کاهش شدت اغتشاش‌های جریان سیال است. طراحی نازل با استفاده از روشهای متداول، منجر به افزایش طول نازل و در نتیجه طول تونل باد می‌شود که این امر مشکلات متعددی را در ساخت تونلهای باد بزرگ به‌ویژه تونلهای باد عمودی، ایجاد نموده و متعاقباً هزینه ساخت آن را نیز بسیار بالا خواهد برد. در این مقاله، روش‌های مختلفی برای کاهش طول نازل ارایه شده و کیفیت جریان به صورت تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی پدیده جدایش در نازل، توزیع فشار بر روی بدنه آن، اندازه‌گیری و تحلیل شده است. تغییرات سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوا نیز با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمون بر روی مدل‌های مختلف نازل نشان می‌دهد که گرادیان فشار معکوس محسوسی وجود نداشته و بنابراین جدایش جریان در نازل اتفاق نیفتاده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان، طول نازل را به میزان ۶۳٪ کاهش داد که برای بکارگیری در تونل باد عمودی، مطلوب خواهد بود. نتایج اندازه‌گیری شدت اغتشاش و سرعت جریان هوا نیز نشان می‌دهد که کاهش شدت اغتشاش‌ها در نازلهای مورد نظر با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین همخوانی دارد.

محمد علی اردکانی<sup>۱</sup>

دانشیار

آذر انوری<sup>۲</sup>

مربی

علی سعیدی<sup>۳</sup>

کارشناس ارشد

کوروش نکوئیان<sup>۴</sup>

کارشناس ارشد

واژه‌های راهنما: نازل، تونل باد، گرادیان فشار، جریان‌سنج سیم داغ، شدت اغتشاش‌های جریان هوا

### ۱- مقدمه

نازل یکی از اجزای مهم تونل باد و سیستم‌های سیالاتی می‌باشد. وظیفه اصلی نازل، تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و افزایش سرعت جریان است. نازل همچنین تاثیر بسیار مهمی در کاهش شدت اغتشاش‌های جریان سیال داشته و سرعت جریان هوا را یکنواخت می‌کند. از این رو طراحی نازل از اهمیت خاصی برخوردار بوده و عدم طراحی صحیح منجر به افزایش تلفات می‌شود. یکی از نکات مهم در طراحی نازل، توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه آن می‌باشد، به طوری‌که در نزدیکی مقاطع ورودی و خروجی نازل، گرادیان معکوس فشار وجود نداشته و جدایش جریان در لایه مرزی ایجاد نشود. از این رو ضروریست پس از طراحی

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ardekani@irost.org

<sup>۲</sup> مربی، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران a.anvari@irost.org

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد مکانیک، شرکت فرا سنجش صبا

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مکانیک، معاونت جهاد خودکفایی نزا

دیواره‌ها، گرادیان فشار معکوس در مقاطع ورودی و خروجی نازل اندازه‌گیری و بررسی شود تا از کاهش کیفیت جریان پیشگیری گردد [۱] و [۲].

در زمینه طراحی نازل، محققان مختلف، تحقیقات تجربی و عددی متعددی را انجام داده و طرحهای گوناگونی ارائه نموده‌اند. ساده‌ترین و متداولترین روش طراحی نازل، توسط مورل پیشنهاد شده که بر اساس تئوری جریان پتانسیل انجام شده است [۳ و ۴]. فانگ و همکاران 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 [۵ و ۶]. نتایج بدست آمده توسط این محققان حاکی از آن است که اگرچه محاسبات جریان غیر لزج در مجاورت دیواره‌های نازل، شبیه‌سازی صحیحی را نشان نداده است، اما رفتار کلی جریان در نواحی دور از دیواره نازل، تطابق معقولی با رفتار عددی پیش‌بینی شده دارد. کالن و مارسیک [۷] نیز تغییر نسبت سطح مقطع را در نازل یک تونل باد بررسی نموده و کیفیت جریان در خروجی نازل را مورد مطالعه و 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، به موقعیت نوار زبری بستگی دارد [۸].

از جمله طرحهای ارائه شده برای منحنی دیواره نازل، دو منحنی ورودی و خروجی با نقطه مشترک  $X_i$  (نقطه عطف) می‌باشد که معادله این دو منحنی به صورت زیر است [۹]:

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

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 می‌باشد. در طراحی یک نازل، هر چه نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی بزرگتر باشد، شدت اغتشاش‌های جریان خروجی از آن نیز کمتر می‌شود. میزان غیر یکنواختی سرعت خروجی نیز با افزایش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی کاهش می‌یابد. لذا به منظور افزایش کیفیت جریان و کاهش شدت اغتشاش‌ها، نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل، (برای تونل باد با شدت اغتشاش‌های کم) حدود ۱۲ در نظر گرفته می‌شود. نسبت طول نازل به قطر ورودی آن نیز حدود ۱ الی ۲ فرض شده و نسبت موقعیت نقطه عطف به طول نازل (از مقطع ورودی) نیز حدود ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود [۲]. در صورتی که مقطع اتاق آزمون تونل باد بزرگ باشد و نازل تونل باد طبق ملاحظات ذکر شده طراحی شود، معیارهای فوق، منجر به افزایش طول نازل و در نتیجه طول تونل باد می‌شود. این افزایش طول، مشکلات جدی در ساخت تونلهای باد بزرگ به ویژه تونلهای باد عمودی ایجاد می‌نماید. این معضلات، شامل افزایش هزینه و مشکلات ساخت می‌شود. از این‌رو باید طول نازل کاهش داده شود. به منظور کاهش طول نازل می‌توان از روشهای ذیل استفاده نمود:

۱. کاهش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل

۲. کاهش نسبت طول نازل به قطر ورودی آن

۳. انتقال نقطه عطف  $X_i$  به سمت بالادست نازل به صورتیکه منحنی پایین دست نازل دارای شیب ملایمتری شده و در نتیجه قسمت انتهایی نازل، قابل کوتاه شدن شود.

با کاهش طول نازل، اگرچه مشکلات ساخت و هزینه‌ی اجرای آن کاهش می‌یابد، اما کیفیت جریان نیز متاثر شده و احتمال کاهش کیفیت آن، وجود دارد. با این وجود در صورتی که گرادیان فشار معکوس ایجاد نشود، کیفیت جریان خروجی نازل قابل قبول خواهد بود.

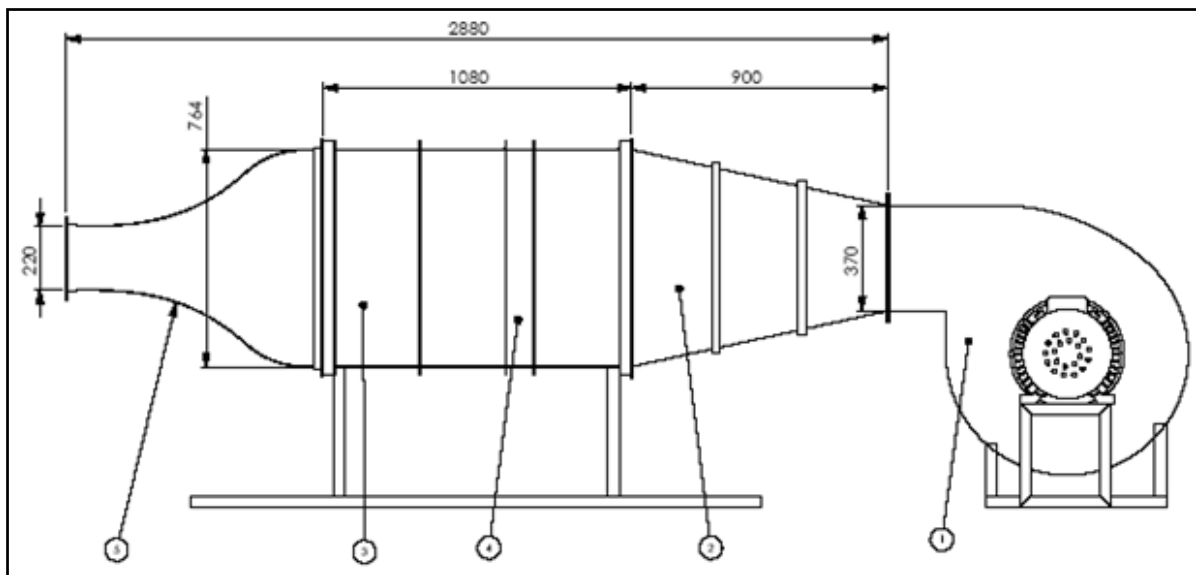
در این مقاله، توزیع فشار بر روی بدنه نازل تونل باد برای طرحهای مختلف نازل بررسی و تحلیل شده است. این تحلیلها در دو حالت دمنده و مکنده انجام شده است. همچنین تغییرات سرعت و شدت اغتشاشها در نازلها مورد بررسی، اندازه‌گیری شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج در طراحی یک تونل باد عمودی با نام طرح طوفان مورد استفاده قرار گرفته است. این تونل باد ویژه شبیه‌سازی عملیات چتربازی می‌باشد.

## ۲- روش آزمایش

در این کار پژوهشی، به منظور کوتاه نمودن طول نازل، چند طرح مختلف مورد آزمون قرار گرفته است. جدول (۱) مشخصات هندسی نازلها مورد نظر را نشان می‌دهد. آزمونهای مربوط به نازل با استفاده از دو تونل باد دمنده و مکنده در دو حالت دمش و مکش انجام شده 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 می‌یابد. 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.

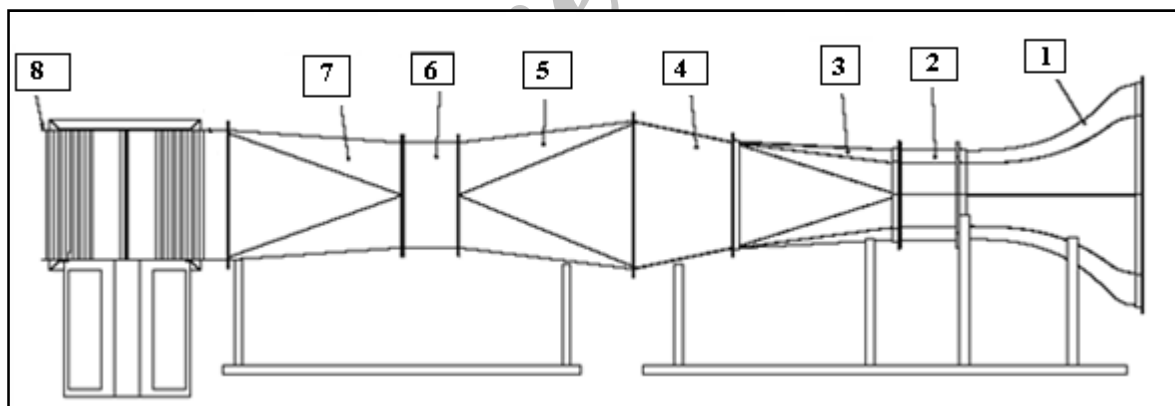
جدول ۱- مشخصات نازلها مختلف مورد آزمون

شماره نازل	$X_i/L$	$L/D_i$	$A_i/A_e$	شرح آزمون
N1	۰/۳	۱/۲	۱۲	وضعیت دمنده، سطح مقطع ورودی مربع
N2	۰/۳	۰/۹	۶/۲۵	وضعیت دمنده، سطح مقطع ورودی هشت ضلعی
N3	۰/۱۷۵	۰/۹	۶/۲۵	وضعیت دمنده، سطح مقطع ورودی هشت ضلعی
N4	۰/۳	۰/۹	۶/۲۵	وضعیت مکنده، سطح مقطع ورودی هشت ضلعی
N5	۰/۳	۰/۹	۶/۲۵	وضعیت مکنده با دهانه ورودی، سطح مقطع ورودی هشت ضلعی



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

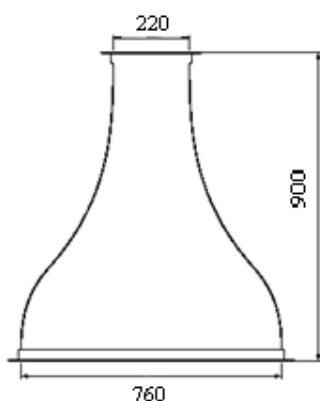
برای آزمایشهای حالت مکنده نیز از تونل بادی مطابق با شکل (۲) استفاده شده است. در این تونل باد، فن از نوع جریان محوری بوده و در پایین دست اتاق آزمون قرار دارد.



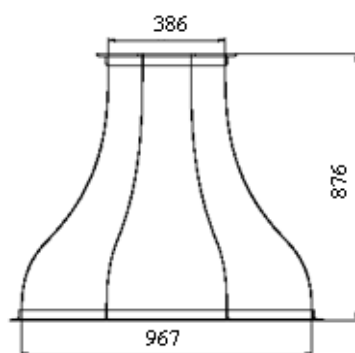
**شکل ۲- تونل باد مکنده مورد استفاده در آزمایش**  
شامل اجزاء: ۱- نازل ۲- مقطع آزمون ۳- دیفیوزر اول ۴- دیفیوزر دوم ۵- قطعه تبدیل اول فن ۶- فن محوری ۷- قطعه تبدیل دوم ۸- خروجی مثلثی شکل

در شکل (۳ الف) تا (۳ ج)، سه مدل نازل مورد بررسی نشان داده شده است. در شکل (۳ د) نیز تصویر نازل مدل تونل باد ارائه شده است. در این آزمونها، توزیع فشار استاتیکی در امتداد دیواره نازل توسط فشار سنج ۳۲ کاناله اندازه گیری شده است. مطابق با شکل (۳ د)، 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 می شود. کارت اخذ دادهها از نوع NI بوده

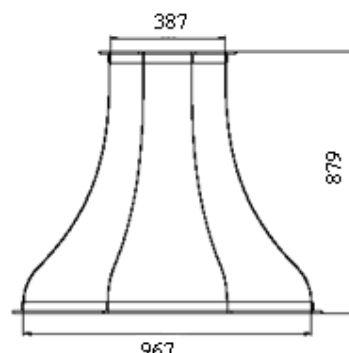
و ۱۶ بیتی می‌باشد. فشارسنجها نیز دارای بازه ۱۲۵۰ پاسکال می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری سرعت و اغتشاشهای جریان هوا در ورودی و خروجی نازل از جریان سنج سیم داغ استفاده شده که پراب آن یک بعدی است. برای جابه‌جایی پراب جریان‌سنج سیم داغ نیز از مکانیزم انتقال دهنده استفاده شده که دقت جابه‌جایی آن حدود ۰/۱mm می‌باشد. همچنین با استفاده از نرم‌افزارهای ویژه، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری فشار و سرعت جریان هوا در داخل نازل، تحلیل و پردازش شده است [۱۰-۱۱].



شکل ۳ الف - مدل نازل N1  
 $x_i/L=0.3$



شکل ۳ ب - مدل نازل N2  
 $x_i/L=0.3$



شکل ۳ ج - مدل نازل N3  
 $x_i/L=0.175$



شکل ۳ د - تصویر نازل مدل تونل باد

در این کار پژوهشی، به منظور کوتاه نمودن طول نازل، راهکارها و روشهای کاهش طول آن بررسی شده و با استفاده از نتایج تحلیل‌های عددی، چند طرح مختلف نازل انتخاب شده است. سپس مدل نازلها ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفته است. در ادامه نتایج آزمون مورد بحث قرار می‌گیرد.

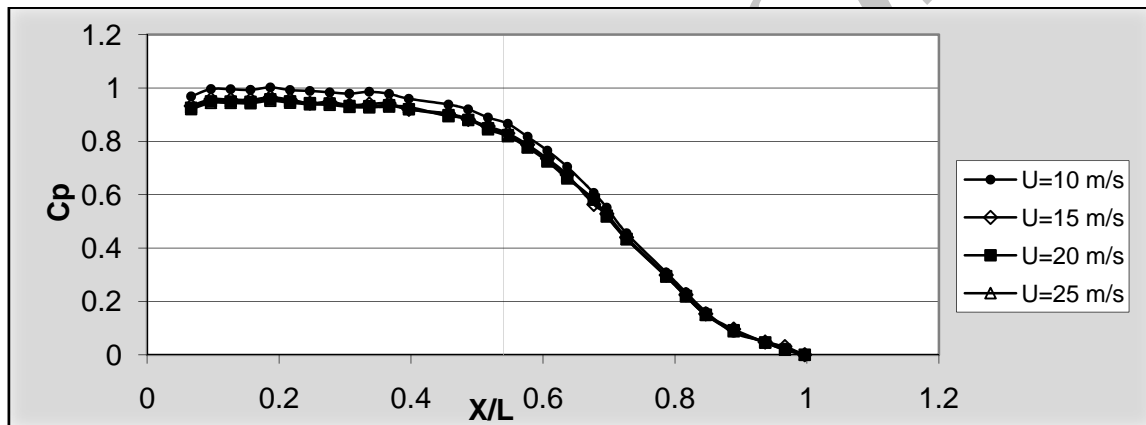
### ۳- نتایج آزمایش

در این بخش، نتایج آزمایشها برای طرحهای مختلف نازل ارایه می‌شود. این آزمایشها در دو وضعیت دمنده و مکنده انجام شده است. شکل (۴) توزیع فشار را در امتداد دیواره نازل مبنا (N1) نشان می‌دهد. نازل (N1)

نازل متداولی است که معمولاً در تونلهای باد از آن استفاده می‌شود [۱۲]. در شکل فوق، توزیع فشار طبق رابطه ۲ بی‌بعد شده است.

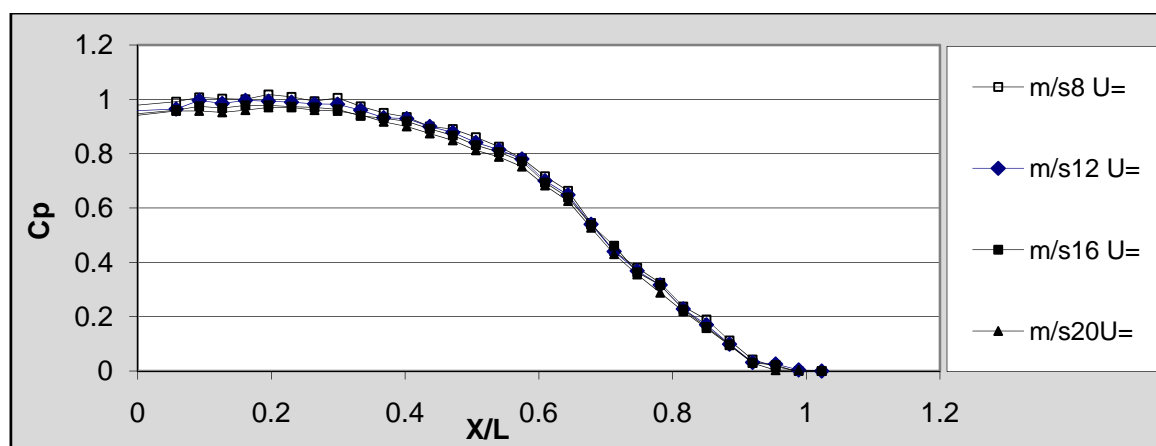
$$C_p = \frac{P - P_e}{\frac{1}{2}\rho U_e^2} \quad (2)$$

در شکل (۴)، محور افقی نیز نسبت به طول نازل بی‌بعد شده است. با توجه به منحنی فشار مشخص است که برای نازل N1 (با نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی ۱۲)، گرادیان فشار معکوس محسوس در مقاطع نازل وجود ندارد. وجود گرادیان فشار معکوس شدید، نشان دهنده جدایش و تلفات در جریان است. در شکل فوق همچنین مشخص است که مقدار ضریب  $C_p$  در مقطع ورودی نزدیک به ۱ بوده و در مقطع خروجی صفر می‌باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، مقدار ضریب  $C_p$  در مقطع ورودی، اندکی کاهش پیدا نموده که این امر ناشی از یکنواخت نبودن سرعت در مقطع ورودی می‌باشد.



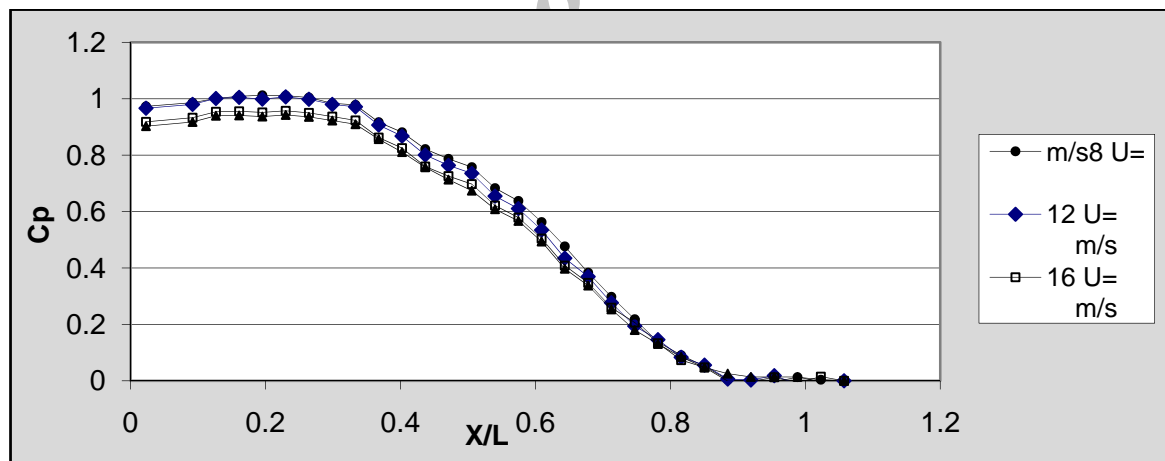
شکل ۴- توزیع فشار استاتیک بر روی دیواره نازل مبنا (N1) در سرعت‌های مختلف جریان

شکل (۵) توزیع فشار را برای نازل N2 در سرعت‌های مختلف جریان نشان می‌دهد. در این نازل نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی به مقدار ۶/۲۵ کاهش یافته است. همچنین نسبت طول به قطر آن نیز از ۱/۲ به ۰/۹ کاهش یافته که در مجموع، طول نازل به میزان ۴۶٪ کاهش پیدا کرده است. در شکل فوق، منحنی  $C_p$  نشان می‌دهد که در سرعت‌های مختلف، گرادیان فشار معکوس شدیدی که نشانگر جدایش جریان باشد، وجود ندارد.



شکل ۵- توزیع فشار استاتیک بر روی دیواره نازل N2 در سرعت‌های مختلف جریان

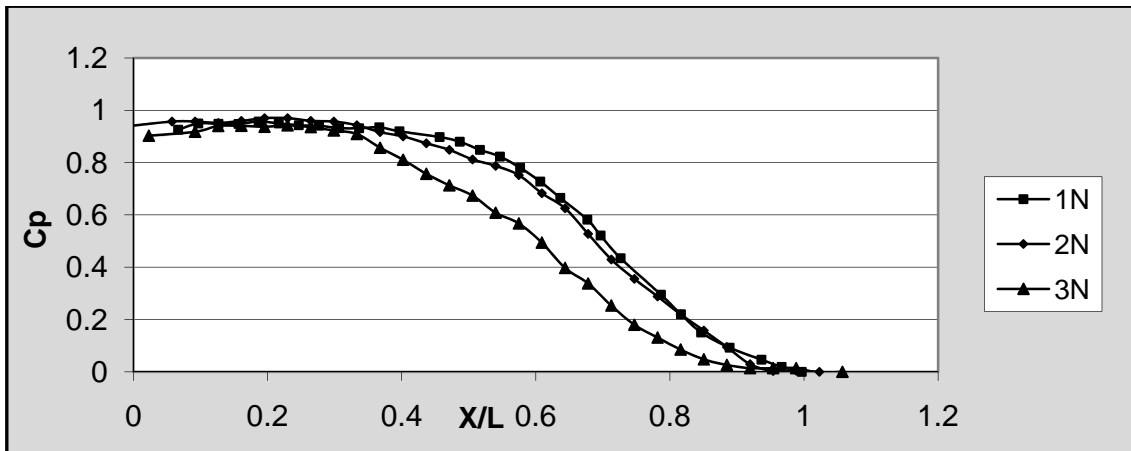
شکل (۶) توزیع فشار را برای نازل N3 در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. این نازل، مشابه نازل N2 است با این تفاوت که نقطه تقاطع دو منحنی دیواره نازل  $(X_i/L)$ ، از نسبت  $0/3$  به  $0/175$  تقلیل یافته و منحنی قسمت دوم در مقطع خروجی نازل یکنواخت‌تر شده است. بنابراین در این طرح، قابلیت بریده شدن و کاهش طول نازل به میزان ۵ درصد وجود داشته و می‌توان قسمتی انتهایی نازل را کوتاه‌تر نمود. با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت که برای مدل نازل N3 نیز، گرادیان فشار معکوس قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد.



شکل ۶- توزیع فشار استاتیک بر روی دیواره نازل N3 در سرعت‌های مختلف جریان

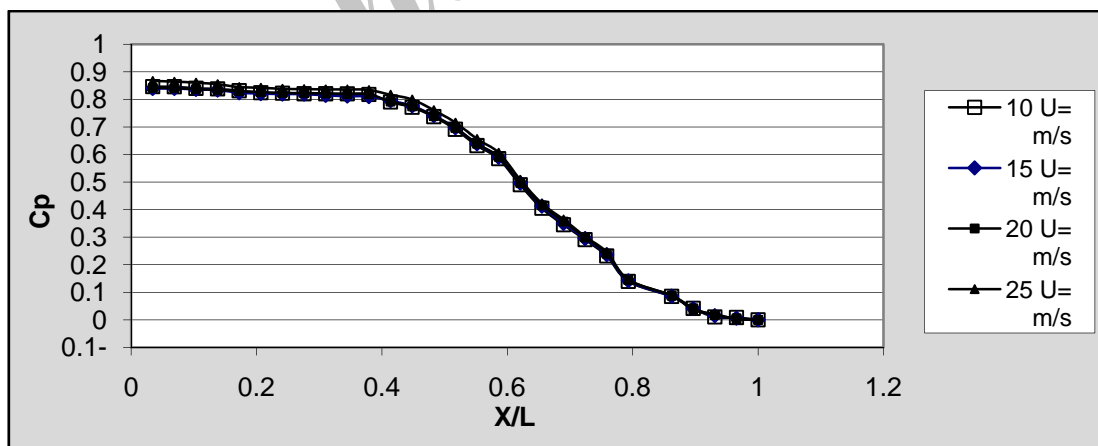
در شکل (۷) توزیع ضریب فشار  $C_p$  برای سه مدل نازل به صورت همزمان (در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود توزیع فشار در نازل‌های N1 و N2 تقریباً مشابه بوده که ناشی از مشخصه یکسان در نقطه تقاطع دو منحنی دیواره در دو نازل  $(X_i/L=0.3)$  می‌باشد. در مدل نازل N3 این نقطه تقاطع به نسبت  $0/175$  تغییر یافته و متناظر با این تغییر، در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود که منحنی توزیع فشار برای نازل فوق به سمت چپ (یا دهانه ورودی نازل) جابجا شده است. شکل فوق

همچنین نشان می‌دهد گرادیان فشار برای نازل N3 بیشتر است، اما این افزایش به میزان قابل توجهی نمی‌باشد.



شکل ۷- توزیع ضریب فشار  $C_p$  برای سه مدل نازل N3, N2, N1 در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

با توجه به اینکه تونل باد عمودی مورد نظر به صورت مکند می‌باشد، مدل نازل به صورت مکند نیز آزمایش شده که به نام مدل N4 بیان می‌شود. شکل (۸) نتایج آزمایش نازل N4 را در حالت مکند و بدون دهانه ورودی نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که منحنی  $C_p$  توزیع مطلوبی داشته و گرادیان فشار قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد. همچنین مشاهده می‌شود مقدار  $C_p$  اندازه‌گیری شده در مقطع ورودی نازل، حدود ۰/۸۵ بوده که این مقدار طبق رابطه برنولی باید نزدیک به ۱ باشد. این اختلاف ناشی از غیر یکنواختی سرعت در مقطع ورودی و کاهش سطح موثر جریان است.

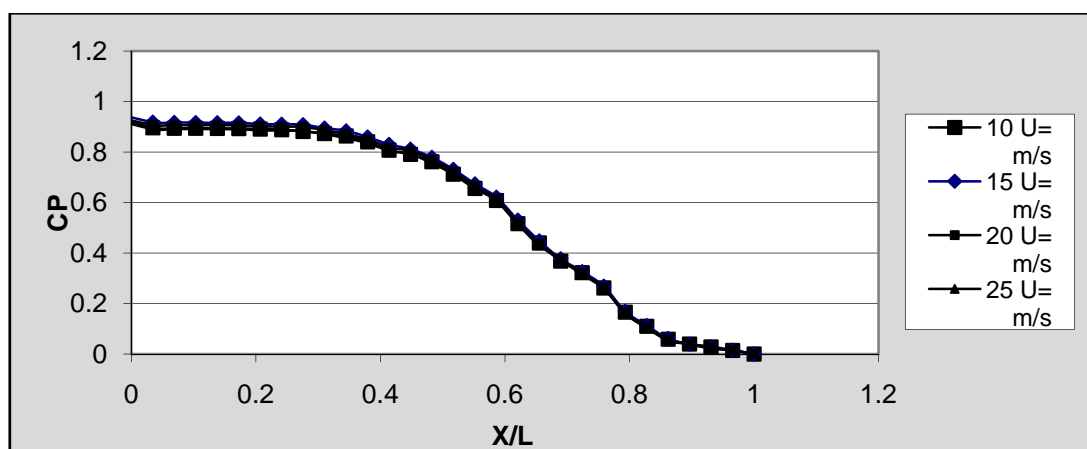


شکل ۸- توزیع فشار استاتیک بر روی دیواره نازل N4 در سرعت‌های مختلف جریان

به منظور بدست آوردن ضریب فشار نزدیک به یک و اصلاح غیر یکنواختی سرعت، یک دهانه ورودی به شکل ربع دایره، با شعاع  $(\frac{1}{4})$  قطر ورودی نازل، در دهانه ورودی نازل طراحی و نصب شد (نازل N5). شکل

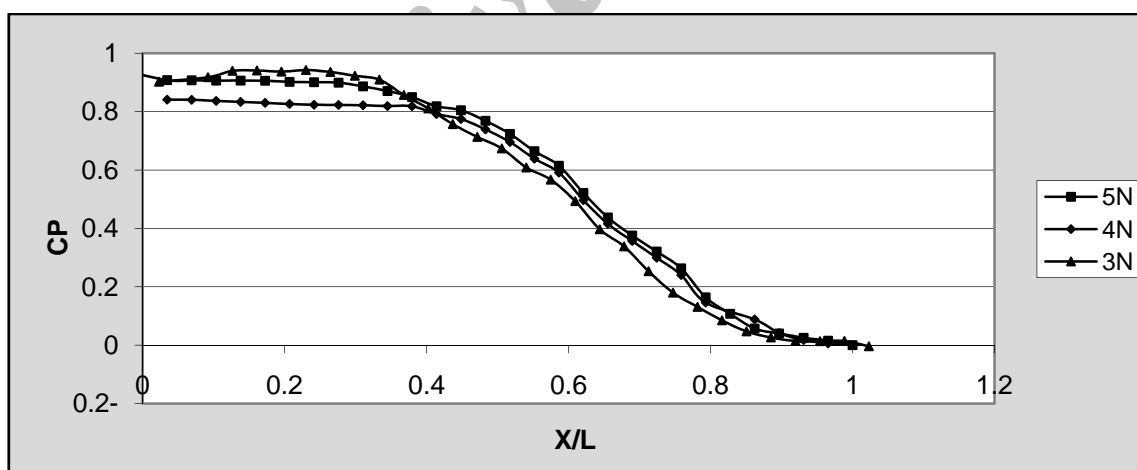


(۹) نتایج مربوط به آزمون این نازل را نشان می‌دهد. منحنی‌های توزیع بدون بعد فشار در شکل (۹) نشانگر آن است که ضریب  $C_p$  به مقدار ۱ نزدیکتر شده است.



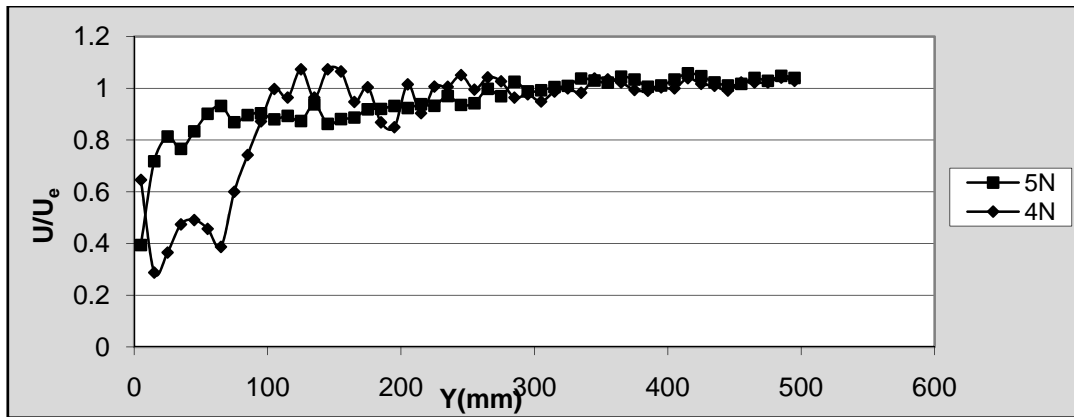
شکل ۹- توزیع فشار استاتیک بر روی دیواره نازل N5 در سرعت‌های مختلف جریان

در شکل (۱۰)، تغییرات ضریب  $C_p$  برای نازل‌های N3، N4 و N5 در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، با یکدیگر مقایسه شده است. در این شکل مشخص است برای نازل دمیده N3 و نازل مکنده با دهانه ورودی N5، توزیع فشار مشابه بوده ولی برای نازل مکنده بدون دهانه ورودی، ضریب افت فشار در مقطع ورودی نازل، دارای مقدار کمتری بوده که ناشی از غیر یکنواختی جریان در ورودی نازل می‌باشد.



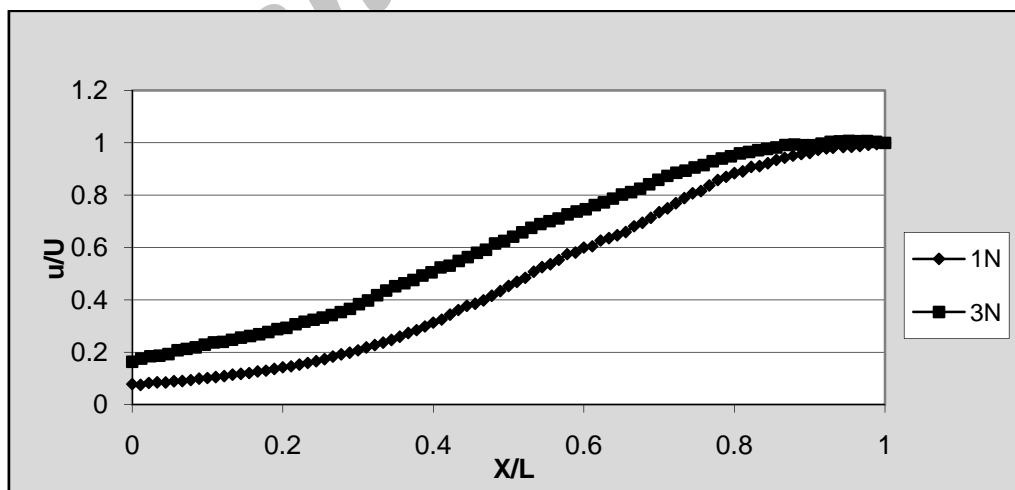
شکل ۱۰- توزیع ضریب فشار  $C_p$  برای سه مدل نازل N3، N4، N5 در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

به منظور بررسی بهتر جریان در مدل نازل با دهانه ورودی و بدون آن، سرعت جریان در مقطع ورودی نازل اندازه‌گیری شده و نتایج بی‌بعد شده آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در شکل فوق مشخص است که برای نازل N5، در فاصله حدود ۱۰۰ میلیمتری از دیواره نازل در مقطع ورودی آن، سرعت جریان هوا پایین می‌باشد و لذا ضریب  $C_p$  کمتر از ۱ می‌باشد.



شکل ۱۱- توزیع سرعت بی‌بعد شده جریان در دهانه ورودی برای دو مدل نازل N4 و N5 در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

با توجه به نتایج بدست آمده برای توزیع فشار در امتداد دیواره نازل‌های فوق، مشخص می‌شود که برای هر سه نازل، گرادیان فشار معکوس قابل توجهی که سبب جدایش جریان و ناپایداری شود، وجود ندارد. به منظور تایید داده‌های فوق، پروفیل سرعت و شدت اغتشاش‌ها در امتداد مرکزی نازل با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. شکل (۱۲) توزیع سرعت بی‌بعد شده ( $\frac{U}{U_e}$ ) بر مبنای سرعت خروجی نازل را برای نازل‌های N1 و N3 نشان می‌دهد. در شکل (۱۲) محور طولها با توجه به طول نازل بی‌بعد شده است. این نتایج به ازای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه حاصل شده است. در این شکل، مشخص است سرعت بی‌بعد شده در مقطع ورودی نازل، متناسب با نسبت مساحت سطح مقطع خروجی به ورودی است. شکل (۱۲) نشان می‌دهد، جریان در قسمت‌های خروجی نازل N3 ( $x_i/L=0.9$ )، سرعت مطلوب را دارا بوده و نسبت  $\frac{U}{U_e}$  نزدیک به یک می‌باشد. با توجه به یکنواخت شدن سرعت جریان در خروجی نازل، می‌توان قسمت انتهایی نازل را تا حدود ۵ درصد کوتاه نمود.



شکل ۱۲- توزیع سرعت بی‌بعد شده بر مبنای سرعت خروجی نازل برای نازل‌های N1 و N3

شکل (۱۳) شدت اغتشاش‌های بی‌بعد شده در امتداد نازل را برای نازل‌های N1 و N3 نشان می‌دهد. در شکل فوق، شدت اغتشاش‌ها نسبت به اغتشاش‌های ورودی بی‌بعد شده است. این شکل نشان می‌دهد، روند

کاهش اغتشاش‌ها در دو طرح نازل تقریباً مشابه بوده اما شیب کاهش اغتشاش‌ها در نازل N1 بیشتر است. در شکل (۱۳) نسبت اغتشاش‌های خروجی نسبت به اغتشاش‌های ورودی برای نازل N1 حدود ۰/۲ بوده و برای نازل N3 حدود ۰/۳۳ است که نشان می‌دهد، شدت اغتشاش‌ها برای نازل N3 حدود ۶۰ درصد بالاتر از نازل N1 است. این کاهش اغتشاش‌ها با نتایج تحقیقات بدست آمده توسط برودمن باچر و پرائتل نیز تایید می‌شود [۱۲-۱۳]. نسبت شدت اغتشاش‌ها در خروجی نازل به شدت اغتشاش‌ها در ورودی نازل توسط برودمن و باچر [۱۳] به صورت رابطه ۳ ارائه شده است:

$$T_{U_o} = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{2v_c + \mu_c}{3}} T_{U_i} \quad (3)$$

در رابطه فوق:

- ✓ C نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل
- ✓  $\mu_c$  نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در مقطع خروجی به ورودی در جهت جریان هوا
- ✓  $v_c$  نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در جهت محورهای عمود بر جریان هوا
- ✓  $T_{U_i}$  شدت اغتشاش‌های سرعت در ورودی نازل
- ✓  $T_{U_o}$  شدت اغتشاش‌های سرعت در خروجی نازل

بر طبق تئوری پرودمن و باچر، نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت به ترتیب عبارت است از:

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

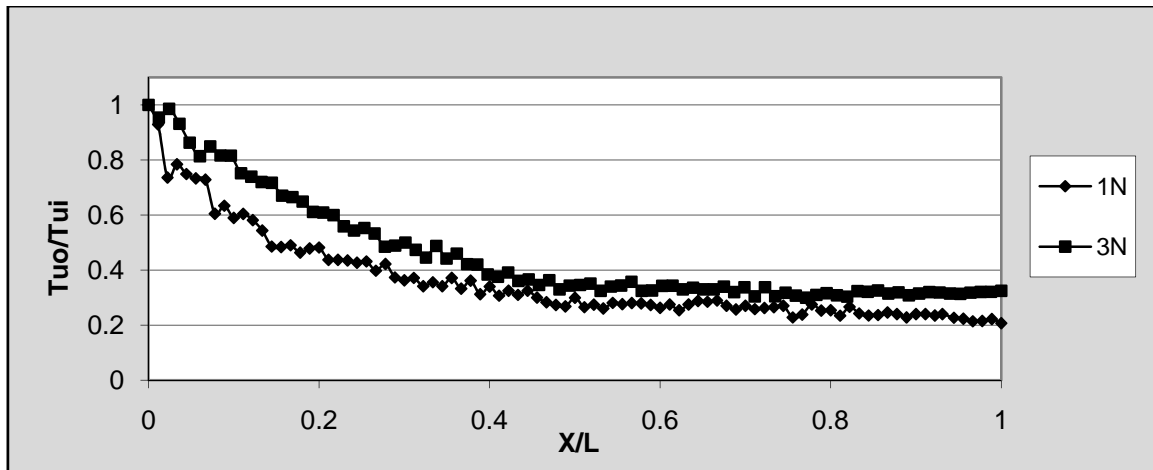
$$v_c = \frac{3}{4} C \quad (5)$$

پرائتل نیز نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در ورودی به خروجی نازل را به صورت روابط ساده ذیل پیشنهاد کرده است [۱۴]:

$$\mu_c = \frac{1}{C^2} \quad (6)$$

$$v_c = C \quad (7)$$

روابط فوق نشان می‌دهد کاهش شدت اغتشاش‌ها بستگی به نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی دارد. با توجه به روابط فوق برای نازل N1 که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی آن ۱۲ است، کاهش شدت اغتشاش‌ها (در رابطه ۳) بر اساس معادلات برودمن، حدود ۰/۲۱ و بر اساس معادلات پرائتل حدود ۰/۲۴ است که این مقادیر با مقدار بدست آمده در شکل (۱۳) همخوانی مطلوبی دارد. این همخوانی برای نازل N3 نیز که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی آن ۶/۲۵ است، برقرار می‌باشد.



شکل ۱۳- شدت اغتشاشات بی بعد شده در امتداد نازل برای نازل‌های N3 و N1

### نتیجه‌گیری

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

➤ کاهش طول نازل با استفاده از روش‌های ۱- کاهش نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل، ۲- کاهش نسبت طول نازل به قطر ورودی آن، و ۳- کوتاه نمودن قسمت انتهایی نازل انجام شده است. چنانچه نازل تونل باد عمودی طوفان با استفاده از روش‌های معمول طراحی شود، به صورتی که نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل معادل با ۱۲ در نظر گرفته شود و نسبت طول نازل به قطر ورودی آن نیز برابر با ۱/۲ فرض شود و نسبت موقعیت نقطه عطف به طول نازل  $(X_i/L)$  حدود ۰/۳ در نظر گرفته شود، طول نازل برای تونل باد طوفان که قطر خروجی آن ۵/۳ متر است، معادل با ۲۲ متر خواهد بود. در صورتیکه، نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل، ۶/۲۵ در نظر گرفته شود و نسبت طول نازل به قطر ورودی آن به مقدار ۰/۹ کاهش یافته و همچنین نسبت فاصله نقطه عطف  $X_i$  به طول نازل از ۰/۳ به ۰/۱۷۵ کاهش یابد، طول نازل معادل با ۱۱ متر می‌شود. با توجه به اینکه در طرح نهایی، قابلیت کوتاه نمودن طول نازل به میزان ۳ متر نیز ایجاد شده است، طول نهایی نازل ۸ متر خواهد بود.

➤ مقایسه نتایج آزمون بر روی مدل نازل نهایی (با طول کاهش یافته) نسبت به مدل مبنا نشان می‌دهد که گرادیان فشار معکوس محسوسی وجود نداشته و بنابراین جدایش جریان در امتداد نازل اتفاق نیفتاده است.

➤ اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها و سرعت جریان برای نازل‌های مورد آزمون، که با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ در امتداد نازل انجام شده، نشان می‌دهد که کاهش شدت اغتشاش‌ها در نازل‌های مورد نظر مطلوب بوده و با نتایج بدست آمده توسط سایر محققین از جمله پیرانتل

- همخوانی دارد. نسبت شدت اغتشاش‌های ورودی به خروجی در طرح نهایی نازل به حدود ۰/۳۳ درصد رسیده است که نشان دهنده عملکرد مناسب نازل نهایی موردنظر می‌باشد.
- منحنی‌های  $C_p$  برای مدل نازل‌های مختلف نشان می‌دهد در صورتی که نازل در حالت مکنده استفاده شود، ضروریست در مقطع ورودی آن، دهانه‌ای به شکل ربع دایره نصب شود تا جریان ورودی آن یکنواخت شود.
- با توجه به نتایج آزمون می‌توان دریافت که نازل کوتاه شده به روش فوق، دارای کیفیت مناسب برای استفاده در تونل باد عمودی است.

## مراجع

- [1] Pope, A. and Goin, K.L., "Low Speed Wind Tunnel Testing", 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley and Sons, Inc., (1984).
- [۲] اردکانی محمدعلی، "تونل باد با سرعت پایین، اصول طراحی و کاربرد"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اردیبهشت (۱۳۸۸).
- [3] Morel, T., "Comprehensive Design of Axi-symmetric Wind Tunnel Contractions", ASME J. Fluids Eng. Vol. 97, pp. 225-233, (1975).
- [4] Morel, T., "Design of Two-dimensional Wind Tunnel Contractions", ASME J. Fluids Eng. Vol. 119, pp. 371-378, (1997).
- [5] Fang, F., "A Design Method for Contractions with Square end Sections", ASME J. Fluids Eng. Vol. 99, pp. 454-458, (1997).
- [6] Fang, F., Chen, J.C., and 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).
- [7] Callan, J., and Marusic, I., "The Effect of a Changing Aspect Ratio through a Wind Tunnel Contraction", AIAA Journal, Vol. 39, No. 9, 1800-1803, (2001).
- [8] Dehghan, D., Mirzaei, M., Soltani, M. R., and Ghorbanian, K., "Control of Pressure Gradient in the Contraction of a Wind Tunnel", World Academi of Science, Engineering and Technology J. 40, (2008).
- [9] Rouse, H. and Hassan, M. M., "Cavitation-free Inlets and Contractions", Mech. Eng., Vol. 71, pp. 213-216, (1949).
- [۱۰] اردکانی محمدعلی، "جریان سنج سیم داغ"، انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی، (۱۳۸۵).

- [۱۱] اردکانی محمدعلی، "گزارش طرح نیمه صنعتی جریان سنج سیم داغ"، سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، (۱۳۸۴).
- [12] Shindo, S., "Low Speed Wind Tunnel Testing Techniques", Corna Publication Co. Ltd., Japan, (In Japanese), (1992).
- [13] Batchelor, G.K., "The Theory of Homogeneous", Vol. 74, Cambridge, (1956).
- [14] Prandtl, L., "Herstellung Einwandfreier luftstrome, Handbuch der Experimentalphysik", Bd. 4, 2, S. 65-106, Teil, Akademische Verlagsgesellschaft, (1932).

### فهرست نمادهای انگلیسی

- C : نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی نازل
- $C_p$  : ضریب توزیع فشار بی بعد شده
- D : قطر خروجی نازل
- $D_i$  : قطر ورودی نازل
- L : طول نازل
- P : فشار استاتیک در طول نازل
- $P_e$  : فشار استاتیک در مقطع خروجی نازل
- R : فاصله عمودی دیواره نازل
- u : سرعت لحظه‌ای در محور مرکزی نازل
- $u'$  : اغتشاش سرعت در خروجی نازل
- $u'_s$  : اغتشاش سرعت در ورودی نازل
- $U_0$  : سرعت متوسط در سطح مقطع خروجی نازل
- X : مختصه افقی نسبت به مقطع ورودی نازل
- $X_i$  : نقطه عطف دو منحنی دیواره نازل
- $\mu_c$  : نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در جهت محور X
- $\nu_c$  : نسبت مجذور اغتشاش‌های سرعت در جهت عمود بر جریان

## Abstract

Nozzle is one of the major components of a wind tunnel. The main task of a nozzle, is converting potential energy into kinetic energy as well as reduction of fluid flow turbulences. Using conventional methods in designing a nozzle, results in increased length of nozzle and therefore in increased length of the wind tunnel, so long that the increased length can cause several problems in construction of long wind tunnels especially in vertical wind tunnels. One of the most important of these problems may be viewed as the increase in the overall construction costs. In this article, various methods for reduction of the length of the nozzle have been suggested. Also empirical analysis of the flow quality has been presented. In order to study the phenomenon of separation in the nozzle, Pressure distribution on the nozzle walls is measured and analyzed. Also the velocity profiles and airflow turbulence intensities in the desired nozzles have been measured using hot wire anemometer. The test results for the model nozzles did not present any sign of separation due to inverse pressure gradient. Therefore According to the test results, for the purpose of application in a vertical wind tunnel there may be a 63% reduction in the total length of nozzle. Measurements of velocity changes and airflow turbulence intensities have shown that the reduction of turbulence intensities at desired nozzles have compatibility with the results obtained by other researchers.

Archive of SID