

# بهبود توزیع فشار منقبض‌کننده برای کاهش آشفتگی تونل باد

محمد رضا سلطانی (استاد)

کاوه قربانیان (استاد)

محسن میرزایی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مجتبی دهقان منشادی (استادیار)

مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

یکی از اهداف اصلی در تونل باد، ایجاد جریان قابل کنترل و پایا با حداقل آشفتگی (توربولانس) در مقطع کاری است. یکی از عوامل افزایش شدت آشفتگی در مقطع کاری ناپایداری‌ها و جدایش جریان در ابتدا و انتهای منقبض‌کننده تونل است. از میان روش‌های متعدد کاهش شدت آشفتگی در مقطع کاری، انتقال اجباری جریان با استفاده از نصب سیم نازک در قسمت خروجی منقبض‌کننده، یکی از جدیدترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها است. در این پژوهش تأثیر نصب سیم نازک در چهار موقعیت در قسمت محدب منقبض‌کننده، بر توزیع فشار جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار جریان در منقبض‌کننده برای سرعت‌های پایین و بالا متفاوت است. با نصب سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.79$ ، ۵۴ سانتی‌متر از شروع مقطع کاری، گرادیان نامطلوب فشار نسبت به موقعیت‌های دیگر ضعیف‌تر و در نتیجه ناپایداری جریان کم‌تر می‌شود. برای این حالت کم‌ترین شدت آشفتگی در مقطع کاری تونل باد نیز حاصل شده است.

msoltani@sharif.edu  
ghorbanian@sharif.edu  
mihsen.mirzaei.a@gmail.com  
mdmanshadi@alum.sharif.edu

واژگان کلیدی: تونل باد، منقبض‌کننده، گرادیان فشار، آشفتگی، سیم نازک.

## مقدمه

کم‌شدن اغتشاشات شود. منقبض‌کننده از دو منحنی محدب و مقعر تشکیل شده است. به منظور پرهیز از جدایی و افزایش فرصت انتشار جریان، همواره باید طول منقبض‌کننده بیشتر باشد، اما مسئله‌ی افزایش هزینه‌ی ساخت و افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی همراه با احتمال جدایش آن از جمله عوامل محدودکننده‌ی این پارامترند.<sup>[۱،۲]</sup> فیزیک جریان داخل منقبض‌کننده‌ی تونل دارای پیچیدگی‌های زیادی است. در مطالعات تجربی و عددی انجام‌شده پیرامون جریان داخل منقبض‌کننده‌ی تونل، توزیع سرعت در مقاطع عرضی و توزیع فشار در راستای طولی منقبض‌کننده به دست آمد.<sup>[۳]</sup> در مطالعه‌ی رفتار لایه‌ی مرزی داخل منقبض‌کننده<sup>[۴]</sup> تأثیر پارامترهای مؤثر در طراحی منقبض‌کننده، در حالتی که جدایش لایه‌ی مرزی وجود نداشته باشد، بررسی شده است. این مطالعات نشان داد که به دلیل مسطح‌شدن انحنای دیواره در ابتدای منقبض‌کننده و در خروجی آن، امکان وجود گرادیان فشار نامطلوب وجود دارد که این امر می‌تواند باعث جدایش جریان شود.

در شکل ۱ محدودیه‌ی که امکان جدایش جریان در داخل منقبض‌کننده را دارد، نشان داده شده است. بررسی رفتار جریان نشان می‌دهد که امکان جدایش سه‌بعدی جریان در قسمت مقعر منقبض‌کننده وجود دارد. یک مدل پیشنهادی برای توجیه این پدیده این است که فرایند جدایش، با غیریکنواختی‌های کوچک جریان لایه‌ی مرزی که به‌واسطه‌ی حضور توری‌های در قسمت بالادست جریان شکل می‌گیرد،

در تونل باد هدف اساسی دستیابی به جریان قابل کنترل و پایا در مقطع کاری است. از پارامترهای مهم برای این هدف، پایین‌بودن شدت آشفتگی در مقطع کاری تونل است. آشفتگی تأثیرات نامطلوبی بر لایه‌ی مرزی دارد. شدت آشفتگی جریان باعث تسریع در آشفته‌سازی لایه‌ی مرزی تشکیل‌شده روی مدل می‌شود و نتیجتاً نیروی پسا به‌شدت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.<sup>[۱-۳]</sup> علاوه بر این آشفتگی در تونل اثرات محسوسی روی توزیع فشار در مقطع کاری و نتیجتاً روی مدل مورد آزمایش دارد. نیروی برا در زاویه‌ی حمله‌ی بالا، نزدیک به واماندگی، نیز وابستگی نسبتاً شدیدی با آشفتگی جریان دارد.<sup>[۴]</sup> روش‌های زیادی برای کاهش آشفتگی در تونل باد پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از نسبت منقبض‌کننده‌ی<sup>۲</sup> مناسب،<sup>[۵]</sup> نصب توری و لانه زنبوری در محفظه‌ی آرامش تونل<sup>[۶-۷]</sup> اشاره کرد. یکی از روش‌های جدید و کم‌هزینه برای کاهش شدت آشفتگی که یکنواختی جریان در مقطع کاری را به‌همراه خواهد داشت، قراردادن سیم نازک در داخل منقبض‌کننده‌ی تونل است.<sup>[۸،۹]</sup>

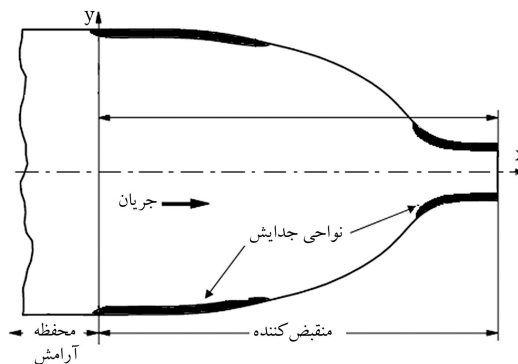
یکی از مهم‌ترین بخش‌های تونل، منقبض‌کننده‌ی آن است که باید در فاصله‌ی کوتاهی، خطوط جریان را شدیداً هم‌گرا و متراکم کند و نیز باعث کاهش غیریکنواختی و

و دیگری در نزدیکی سطح بالایی جفت گردابه‌ی قارچی گورتار قرار دارد. این بررسی‌ها نشان داد که گردادین فشار مطلوب موجب از بین بردن رشد اغتشاشات سرعت و به تأخیر انداختن ناپایداری‌های ثانویه می‌شود. اثر اصلی گردادین فشار نامطلوب حرکت دادن لایه‌ی تنش زیاد (سطح بالایی) به سمت خارج از سطح دیواره است و اثر کمی بر لایه‌ی تنش بالای نزدیک سطح می‌گذارد. این افزایش فاصله‌ی لایه‌های تنش از هم، با دور شدن جفت گردابه‌ها از سطح توجیه می‌شود. در منقبض‌کننده‌ی تونل باد گردادین فشار منفی باعث بلند شدن گردابه‌ها از سطح منقبض‌کننده می‌شود.

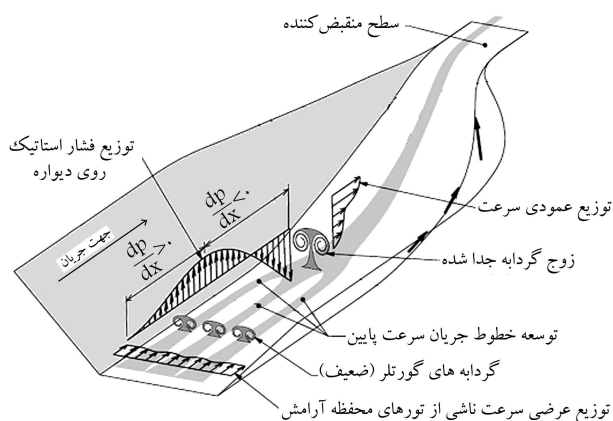
ج) گردادین فشار عرضی: بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که هم‌گرایی جریان بر اثر گردادین فشار عرضی، ممکن است به تولید جفت‌گردابه‌هایی بینجامد که سبب جدایی جریان می‌شوند.<sup>[۱۲۰]</sup> در نتیجه‌ی تولید این جفت‌گردابه‌ها یک لایه‌ی مرزی اریب تشکیل می‌شود که مؤلفه‌ی عرضی آن دارای بیشینه‌ی در داخل لایه‌ی مرزی است. هم‌گرایی جریان عرضی نزدیک سطح باعث به وجود آمدن سازوکاری برای تقویت گردابه‌های ضعیفی می‌شود که به وسیله‌ی ناپایداری‌های گورتار به وجود آمده‌اند.

محققین مشاهده کردند که در قسمت مقعر منقبض‌کننده یک ردیف از گردابه‌های گورتار توسعه پیدا می‌کند و در نهایت می‌شکند و باعث افزایش آشفتگی می‌شود.<sup>[۱۲۱]</sup> در واقع گردابه‌های گورتار، عامل اصلی انتقال جریان آرام به آشفته است. شتاب زیاد جریان باعث جلوگیری از توسعه‌ی آشفتگی جریان، و در نتیجه انتقال معکوس جریان در قسمت محدب منقبض‌کننده می‌شود. همچنین نشانه‌های غیرمنتظره‌ی از آشفتگی در قسمت محدب منقبض‌کننده، بعد از آرام شدن جریان، مشاهده شد. نتایج تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که لایه‌ی مرزی آشفته در قسمت مقعر منقبض‌کننده، با ضریبی که مرتبط با ناپایداری گورتار است، در حال ضخیم شدن است اگرچه شتاب جریان به آرام شدن جریان در قسمت محدب منقبض‌کننده می‌انجامد.<sup>[۱۲۲]</sup> به عبارت دیگر در این قسمت منقبض‌کننده، انتقال معکوس<sup>۴</sup> لایه‌ی مرزی از حالت آشفته به آرام روی می‌دهد. اثرات انتقال معکوس لایه‌ی مرزی در منقبض‌کننده‌ی تونل باد با استفاده از سیم داغ و به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۱۲۳]</sup> اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان می‌دهد که در رینولدز پایین لایه‌ی مرزی آرام توسط گردابه‌های طولی بزرگی که به واسطه‌ی ناپایداری‌های گورتار در قسمت مقعر منقبض‌کننده تولید شده، تغییر شکل می‌دهد و در نهایت این لایه‌ی مرزی آشفته در قسمت محدب منقبض‌کننده به دلیل شتاب جریان، دوباره آرام می‌شود. در رینولدز بالاتر لایه‌ی مرزی در ورودی منقبض‌کننده آشفته است و اغتشاشات بزرگ عرضی در قسمت مقعر منقبض‌کننده دیده می‌شود. این لایه‌ی مرزی آشفته در قسمت محدب منقبض‌کننده بر اثر شتاب زیاد، آرام می‌شود. محققین نشان داده‌اند که برای انتقال معکوس در منقبض‌کننده، در مقایسه با صفحه‌ی تخت، شتاب بیشتری مورد نیاز است.<sup>[۱۲۴]</sup>

در قسمت محدب منقبض‌کننده‌ی تونل نیز ناپایداری‌هایی دیده می‌شود که باعث جدایش جریان می‌شود که در واقع محل تغییر جریان گذرا به آشفته است. کمی جلوتر و قبل از مقطع کاری، لایه‌ی مرزی آرام شده، با ناپایداری<sup>۵</sup> خمشی ناشی از انحنای سطح مواجه می‌شود که این نیز باعث جدایش جریان خواهد شد. در قسمت محدب و در خروجی منقبض‌کننده، این ناپایداری به‌طور ناگهانی باعث جلو انداختن تغییر جریان از آرام به معشوش می‌شود. با توجه به تحقیقاتی که بین سه تونل باد متفاوت، بدون توجه به شکل منقبض‌کننده‌شان انجام شد، مشاهده شد که این پدیده تقریباً در  $Re_x \approx 4 \times 10^6$  اتفاق می‌افتد.<sup>[۱۲۲]</sup> (x فاصله از ورودی منقبض‌کننده و  $U_e$  سرعت موضعی<sup>۶</sup> در همان نقطه‌ی داخل منقبض‌کننده است). بدیهی است بر اثر



شکل ۱. ناحیه‌ی جدایش در منقبض‌کننده.



شکل ۲. مدل مفهومی جدایش سه بعدی جریان برای منقبض‌کننده با سطح مقطع مربع شکل.<sup>[۱۲۶]</sup>

آغاز می‌شود. این اغتشاشات در ابتدای منقبض‌کننده با افزایش ناپایداری‌های گورتار، گردادین فشار عرضی و گردادین فشار نامطلوب طولی تقویت می‌شود و در نهایت به تولید یک جفت گردابه‌های جدا شده از سطح می‌انجامد.<sup>[۱۲۷]</sup> شکل ۲ نشان‌گر رفتار جریان داخل منقبض‌کننده با سطح مقطع مربع است. این رفتار در سرعت‌های پایین مشهودتر است. به‌طور خلاصه می‌توان عوامل موجب جدایش جریان را چنین معرفی کرد:

الف) اغتشاشات اولیه: وجود توری در قسمت محفظة‌ی آرامش تونل بر یکنواختی جریان تأثیر بسیار دارد. محققین نشان داده‌اند که تغییری اندک در شبکه‌ی توری ممکن است منبع غیر یکنواختی کم‌دامنه در جریان پایین دست توری باشد.<sup>[۱۲۸]</sup> این غیر یکنواختی عامل تغییر عرضی ضخامت لایه‌ی مرزی در ورودی منقبض‌کننده است. مرحله‌ی بعدی که به جدایش قوی در منقبض‌کننده می‌انجامد عبارت است از تغییر شکل لایه‌ی مرزی به چند لایه‌ی مجزا که در سطح منقبض‌کننده به وجود می‌آیند. این لایه‌های مجزا، با انباشتگی جریان سرعت کم در نزدیکی دیواره -- ناحیه‌ی مکش جریان -- گردابه‌های گورتار را ایجاد می‌کنند. یادآور می‌شود که عدد گورتار<sup>۳</sup>  $(Go = 2Re^{0.5}\delta)$  در قسمت مقعر منقبض‌کننده و در محدوده‌ی ایجاد ناپایداری‌های گورتار قرار دارد.

ب) گردادین فشار طولی: در بررسی‌های به عمل آمده پیرامون اثرات گردادین فشار طولی در تشکیل ناپایداری‌های ثانویه‌ی گورتار،<sup>[۱۲۹]</sup> آزمایش‌های انجام شده نشان داد که منحنی پروفیل سرعت در جهت عمودی مایل است و دو نقطه با انحنای زیاد (تنش زیاد) دارد. این دو نقطه یکی در نزدیک سطح دیواره‌ی منقبض‌کننده

تغییر سرعت مقطع کاری، محل این ناپایداری که در واقع همان محل تغییر جریان گذرا به آشفته است، تغییر می‌کند. با توجه به طول منقبض‌کننده و سرعت مقطع کاری، این ناپایداری می‌تواند از قسمت محدب منقبض‌کننده تا داخل مقطع کاری جابه‌جا شود. اگر محل این ناپایداری داخل مقطع کاری یا خیلی نزدیک به آن باشد، شدت آشفته‌گی در مقطع کاری زیاد می‌شود. برای رفع این مشکل می‌توان موقعیت این ناپایداری را در محلی ثابت نگه داشت که این کار با انتقال اجباری به‌وسیله نصب سیم نازک در قسمت انتهایی منقبض‌کننده انجام می‌شود.<sup>[۱۶، ۱۷]</sup> تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با نصب سیم نازک در خروجی منقبض‌کننده، شدت آشفته‌گی در مقطع کاری کاهش قابل توجهی داشته است. بررسی‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد یکی از بهترین محل‌های نصب سیم نازک، دهانه‌ی خروجی منقبض‌کننده‌ی تونل است.

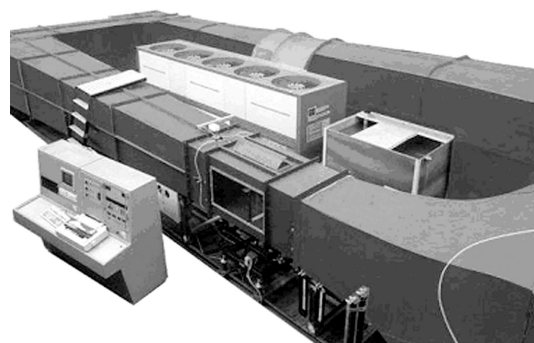
در این پژوهش ابتدا توزیع فشار داخل منقبض‌کننده در سرعت‌های مختلف، و در راستای طول منقبض‌کننده بررسی شده است. در حالات بعدی سیم نازک در چهار موقعیت در قسمت محدب منقبض‌کننده نصب شده و با اندازه‌گیری و مقایسه‌ی توزیع فشار، موقعیت مناسب برای نصب سیم نازک به‌منظور کاهش اثرات جدایش و در نتیجه کاهش شدت آشفته‌گی در مقطع کاری مشخص شده است. اندازه‌گیری شدت آشفته‌گی در مقطع کاری مؤید این موقعیت برای کم‌ترین مقدار شدت آشفته‌گی در تونل باد است.

در این پژوهش ابتدا توزیع فشار داخل منقبض‌کننده در سرعت‌های مختلف، و در راستای طول منقبض‌کننده بررسی شده است. در حالات بعدی سیم نازک در چهار موقعیت در قسمت محدب منقبض‌کننده نصب شده و با اندازه‌گیری و مقایسه‌ی توزیع فشار، موقعیت مناسب برای نصب سیم نازک به‌منظور کاهش اثرات جدایش و در نتیجه کاهش شدت آشفته‌گی در مقطع کاری مشخص شده است. اندازه‌گیری شدت آشفته‌گی در مقطع کاری مؤید این موقعیت برای کم‌ترین مقدار شدت آشفته‌گی در تونل باد است.

## تجهیزات

برای بررسی توزیع فشار منقبض‌کننده و تأثیر انتقال اجباری بر آن، از تونل باد، مبدل‌های فشاری، سیم نازک، سیستم داده‌برداری و سیم داغ برای اندازه‌گیری شدت آشفته‌گی استفاده شده است. در شکل ۳ شماتیک تونل باد شیراز که از نوع مدار بسته است، نشان داده شده است. ابعاد کلی این تونل  $18 \times 67.5 \times 37.8$  متر است. ابعاد محفظه‌ی آزمایش این تونل  $200 \times 80 \times 80$  سانتی‌متر و بیشترین سرعت در محفظه‌ی آزمایش  $100$  متر بر ثانیه است. نسبت هم‌گرایی منقبض‌کننده تقریباً  $7$  است. دامنه‌ی تغییرات دمای داخل محفظه‌ی آزمایش قابل تنظیم است و عدد رینولدز در محفظه‌ی آزمایش از  $10^5 \times 5729$  تا  $10^6 \times 5726$  بر متر قابل تغییر است. ویژگی‌ها و رفتار جریان در مقطع کاری تونل در برخی مراجع مورد بررسی قرار گرفته است.<sup>[۲۶، ۲۵]</sup>

برای اندازه‌گیری تغییرات فشار استاتیک در منقبض‌کننده از مبدل‌های فشاری مناسب استفاده شده است. این مبدل‌ها از نوع تفاضلی‌اند و اختلاف فشار نسبی را اندازه‌گیری می‌کنند. ولتاژ تغذیه‌ی ورودی این مبدل‌ها  $8 \pm 0.05$  ولت جریان



شکل ۳. نمایی از تونل باد مورد استفاده در این پژوهش.

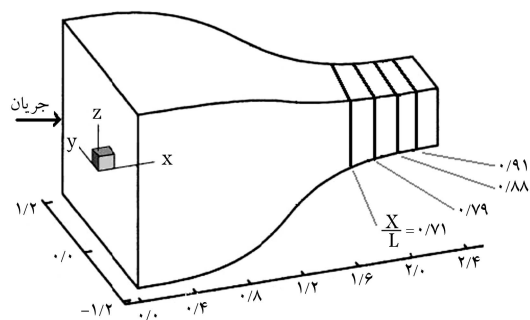
سیم  $0.91$  میلی‌متر است. شدت آشفته‌گی و توزیع آن در مقطع کاری با استفاده از سیم داغ دو مؤلفه و متعلقات آن اندازه‌گیری شده است. به‌منظور اخذ و پردازش اطلاعات، نرم‌افزاری تهیه شده که از یک برد آنالوگ به دیجیتال  $16$  کاناله استفاده می‌کند. برای محاسبه‌ی شدت آشفته‌گی در گام نخست پراب‌های سیم داغ به‌صورت دینامیکی و استاتیکی کالیبره شده است. سپس ولتاژهای خروجی بعد از فیلتر شدن و استفاده از روابط کالیبراسیون به مؤلفه‌های نوسانی سرعت تبدیل می‌شوند که می‌توان بعد از محاسبه‌ی مجذور میانگین مربعات، و طبق رابطه‌ی ۱ مؤلفه‌ی کلی شدت آشفته‌گی را اندازه‌گیری کرد.

$$TI = 100 \times \frac{((u_{rms}^2 + v_{rms}^2)/2)^{1/2}}{(U_{mean}^2 + V_{mean}^2)^{1/2}} \quad (1)$$

جزئیات بیشتر در مورد نحوه‌ی اندازه‌گیری شدت آشفته‌گی -- شامل کالیبراسیون استاتیکی، دینامیکی و غیره -- قابل دسترس است.<sup>[۲۷-۲۹]</sup>

## مراحل انجام آزمایش

برای اندازه‌گیری توزیع فشار از مبدل‌های فشاری استفاده شده، فرکانس اخذ اطلاعات برابر  $1 \text{ KHz}$  و تعداد نمونه برای هر نقطه  $2500$  عدد بوده است. میزان فشار در طول منقبض‌کننده‌ی تونل و در سرعت‌های  $20$  تا  $80$  متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. به‌منظور به دست آوردن توزیع فشار استاتیک، از  $27$  مبدل فشاری استفاده شده است. قابل ذکر است که نقاط اندازه‌گیری فشار با فاصله‌ی  $10$  سانتی‌متر از هم، از شروع محفظه‌ی آرامش تا انتهای منقبض‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. در ابتدا بدون نصب سیم نازک در منقبض‌کننده (حالت تمیز) داده‌ها در سرعت‌های مختلف اخذ شده است. در حالات بعدی سیم نازک در چهار نقطه در انتهای قسمت محدب منقبض‌کننده نصب شده (شکل ۴) و برای هر حالت نصب سیم نازک، توزیع فشار اندازه‌گیری شده است. در حالت اول سیم نازک در فاصله‌ی  $10$  سانتی‌متر از خروجی منقبض‌کننده ( $\frac{x}{L} = 0.91$ ) نصب شده و سپس به ترتیب سیم نازک در فواصل  $30$  سانتی‌متری ( $\frac{x}{L} = 0.88$ )،  $54$  سانتی‌متری ( $\frac{x}{L} = 0.79$ ) و  $76$  سانتی‌متری ( $\frac{x}{L} = 0.71$ ) از شروع مقطع کاری نصب شده است. برای تمامی حالات، توزیع فشار اندازه‌گیری شد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. نمودار مربوط به منحنی منقبض‌کننده در شکل ۴ آورده شده است. برای حالات فوق تغییرات شدت آشفته‌گی با سرعت در وسط مقطع کاری،  $100$  سانتی‌متر از شروع مقطع کاری اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴. موقعیت‌های نصب سیم نازک در تونل باد.

## نتایج

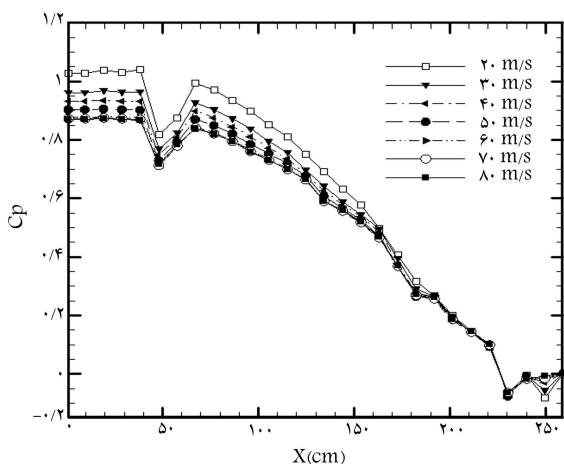
ابتدا بدون نصب سیم نازک در منقبض‌کننده (تونل خالی و تمیز) داده‌ها اخذ شده است. در شکل ۵ توزیع فشار برای سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین‌تر از  $50 \text{ m/s}$  در ابتدای منقبض‌کننده، گرادیان فشار نامطلوب وجود دارد؛ با افزایش سرعت (افزایش عدد رینولدز) این گرادیان کم‌تر می‌شود و نهایتاً در سرعت  $50 \text{ m/s}$  در قسمت مقعر منقبض‌کننده کاملاً از بین می‌رود. اگر گرادیان فشار نامطلوب زیاد باشد ممکن است منجر به جدایش جریان شود. مشخص است که در سرعت‌های کم‌تر از  $50 \text{ m/s}$  امکان جدایش جریان زیاد است و با کاهش سرعت امکان جدایش در این قسمت نیز بیشتر می‌شود. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که در کمی جلوتر و در قسمت محدب منقبض‌کننده، در فاصله‌ی  $190$  سانتی‌متری از محفظه‌ی آرامش ( $\frac{x}{L} = 0.73$ )، رفتار جریان دچار تغییر می‌شود. دلیل این تغییر رفتار انتقال معکوس لایه‌ی مرزی جریان است. علت فیزیکی وقوع گرادیان فشار مثبت در ابتدای منقبض‌کننده را می‌توان چنین بیان کرد: در ابتدای منقبض‌کننده به علت تغییر ناگهانی سطح مقطع، خطوط جریان در نقاط نزدیک دیواره انباشته می‌شود و به افزایش نسبی فشار در این منطقه می‌انجامد. این گرادیان فشار نامطلوب، می‌تواند باعث جدایش جریان شود.

در قسمت خروجی منقبض‌کننده نیز، به دلیل ناپایداری خمشی گرادیان‌های فشار نامطلوبی مشاهده می‌شود. برخی از محققین نیز در آزمایشات خود گرادیان فشار نامطلوبی در خروجی منقبض‌کننده مشاهده کردند.<sup>[۲۲]</sup> دلیل فیزیکی این پدیده این

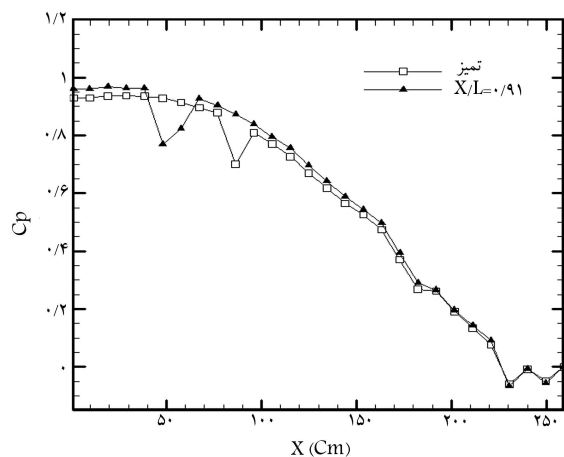
است که در خروجی منقبض‌کننده و نزدیک مقطع ثابت انتهایی آن، خطوط جریان پس از رسیدن به مقطع ثابت مقداری باز شده که منجر به افزایش فشار نسبی ذرات بر روی دیواره‌های منقبض‌کننده می‌شود و در این ناحیه نیز گرادیان فشار مثبت رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، در ناحیه‌ی خروجی منقبض‌کننده که منحنی آن محدب است، سرعت در نزدیکی دیواره‌ها از سرعت روی محور تقارن بیشتر است. هنگامی که این ناحیه‌ی محدب به انتهای خود و به ناحیه‌ی با مقطع ثابت می‌رسد باید این توزیع غیریکنواخت تبدیل به توزیع یکنواخت شود؛ این مسئله با کاهش سرعت روی دیواره‌ها محقق می‌شود. این کاهش سرعت باعث افزایش فشار نزدیک دیواره و ایجاد گرادیان فشار مثبت می‌شود. رفتار این ناپایداری‌ها برعکس ناپایداری‌هایی است که در ابتدای منقبض‌کننده به وجود می‌آید، یعنی با افزایش سرعت این ناپایداری‌های بیشتر می‌شوند. شکل ۵ این رفتار را به‌وضوح نشان می‌دهد.

در حالات بعدی با نصب سیم نازک در منقبض‌کننده اطلاعات در سرعت‌های مذکور اخذ شده است. در حالت اول سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.91$  نصب شده است. شکل‌های ۶ و ۷ مربوط به این حالت است.

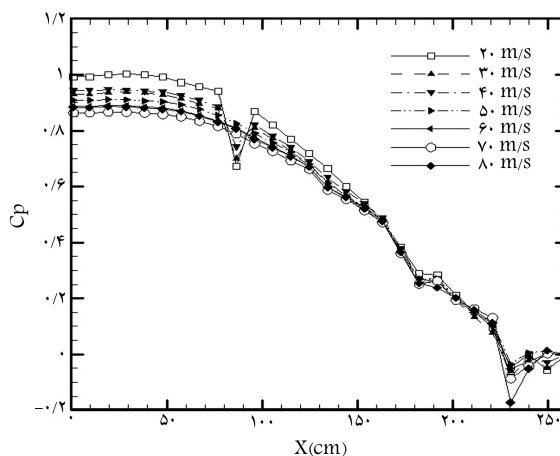
در این حالت مشاهده می‌شود که در تمامی سرعت‌ها گرادیان فشار در ابتدا و انتهای منقبض‌کننده وجود دارد. در سرعت‌های بالا (بیشتر از  $50 \text{ m/s}$ ) مقدار  $C_p$  ثابت می‌شود. نکته‌ی جالب در این مشاهدات (شکل ۷) این است که در سرعت‌های پایین مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده، در مقایسه با حالت بدون سیم



شکل ۶. بررسی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار.



شکل ۷. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت  $30 \text{ m/s}$ .



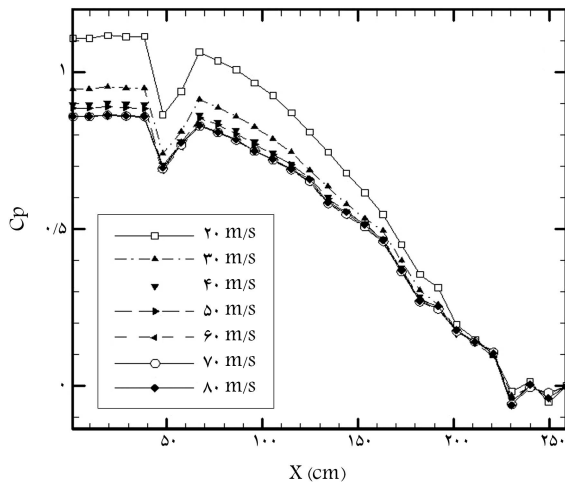
شکل ۵. توزیع فشار برای حالت تمیز.

استفاده از این اطلاعات می‌توان نتیجه گرفت که ناپایداری‌های ابتدای منقبض‌کننده نسبت به حالت تمیز ضعیف‌تر و نسبت به حالت قبلی (سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.91$ )، اندکی قوی‌تر شده‌اند. در سرعت‌های بالاتر، نصب سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.88$  باعث تضعیف گردان فشار نامطلوب و در نتیجه کاهش ناپایداری جریان در خروجی منقبض‌کننده می‌شود. از طرفی مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده نسبت به حالت تمیز و حالت قبل،  $\frac{x}{L} = 0.91$ ، کم‌تر می‌شود. نصب سیم نازک در این موقعیت،  $\frac{x}{L} = 0.88$ ، در سرعت‌های بالا باعث تقویت ناپایداری‌های در ابتدای منقبض‌کننده و تضعیف ناپایداری‌های در خروجی منقبض‌کننده می‌شود و در سرعت‌های پایین بیشتر روی ناپایداری‌های ابتدای منقبض‌کننده اثر می‌گذارد و باعث تضعیف آن می‌شود. برای حالت سوم سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.79$  نصب شده است که نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

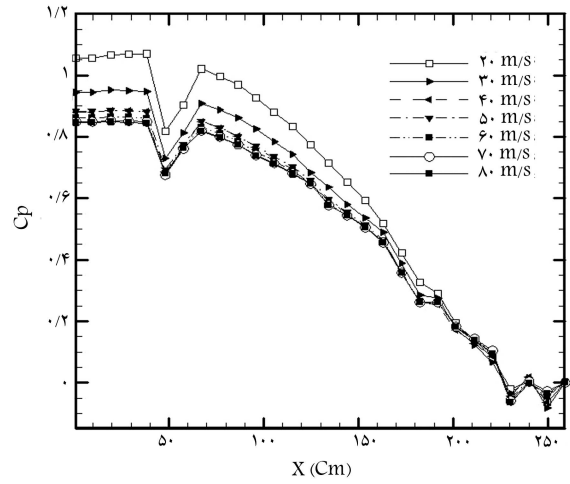
در این حالت نیز مانند حالت قبل، در تمامی سرعت‌ها گردان فشار نامطلوب در ابتدا و انتهای منقبض‌کننده وجود دارد و گردان فشار ابتدای منقبض‌کننده به سمت ورودی آن حرکت کرده، اما شدت آن نسبت به دو حالت قبل کم‌تر است. همچنین نصب سیم نازک خصوصاً در سرعت‌های بالاتر باعث تضعیف گردان فشار نامطلوب خروجی منقبض‌کننده و در نتیجه کاهش ناپایداری جریان در آن ناحیه می‌شود. مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده، در سرعت‌های پایین، در مقایسه با

نازک افزایش یافته و همچنین محل تشکیل ناپایداری‌ها به سمت ورودی منقبض‌کننده نزدیک شده است. حرکت ناپایداری‌های به سمت ورودی منقبض‌کننده به دلیل تأثیر سیم نازک در جریان مادون صوت است. به عبارت دیگر حرکت گردان فشار نامطلوب به دلیل تأثیر جریان پایین دست بر روی جریان بالادست در جریان مادون صوت است. ناپایداری‌های جریان باعث می‌شود که افت انرژی یا به عبارتی افت فشار جریان بیشتر باشد، در نتیجه مقدار  $C_p$  در حالتی که ناپایداری بیشتری وجود دارد کم‌تر است. با توجه به این نکته که با نصب سیم نازک مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده و در سرعت‌های کم بیشتر شده، می‌توان نتیجه گرفت که ناپایداری‌های ابتدای منقبض‌کننده ضعیف‌تر شده است. در سرعت‌های بالاتر با نصب سیم نازک مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده نسبت به حالت بدون سیم، کمی کم‌تر می‌شود. در حالت دوم سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.88$  نصب شده است. شکل‌های ۸ و ۹ مربوط به این حالت است.

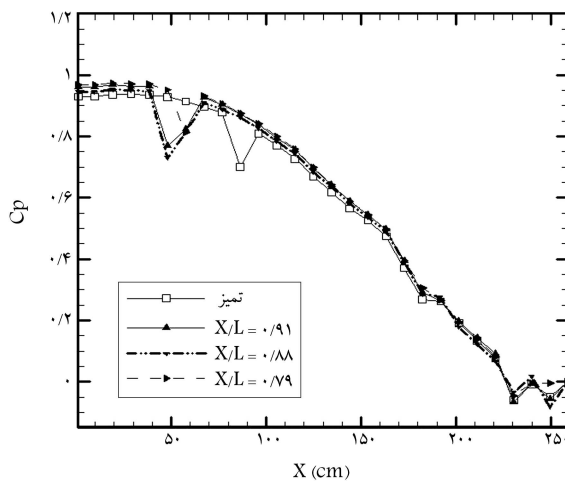
در این موقعیت مشاهده می‌شود که مانند حالت قبل، در تمامی سرعت‌ها گردان فشار در ابتدا و انتهای منقبض‌کننده وجود دارد و محل تشکیل ناپایداری‌های نیز به سمت ورودی منقبض‌کننده نزدیک شده است و همچنین در سرعت‌های پایین مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده، در مقایسه با حالت بدون سیم افزایش و نسبت به حالت وجود سیم نازک در موقعیت  $\frac{x}{L} = 0.91$ ، اندکی کاهش یافته است. با



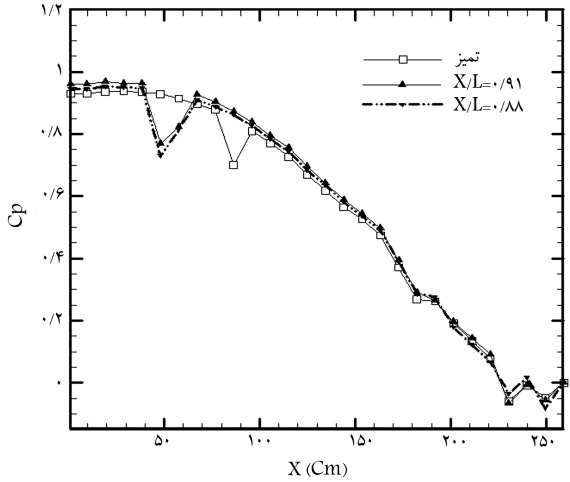
شکل ۱۰. بررسی اثر سیم نازک بر توزیع فشار.



شکل ۸. بررسی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار.

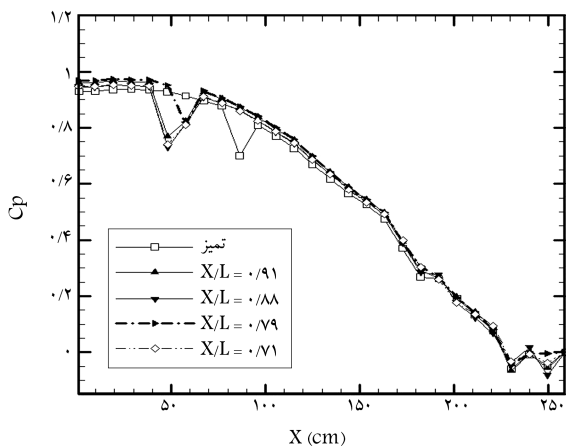


شکل ۱۱. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۳۰ m/s.

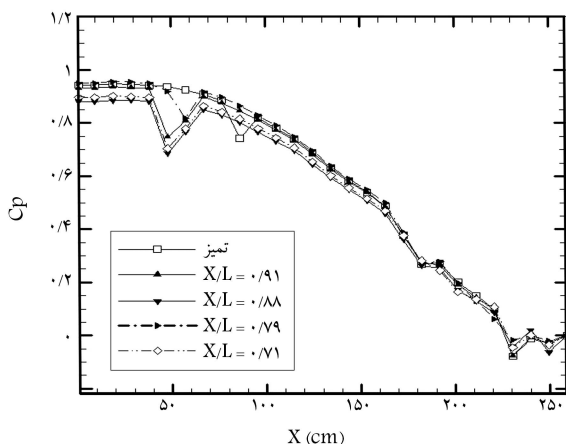


شکل ۹. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۳۰ m/s.

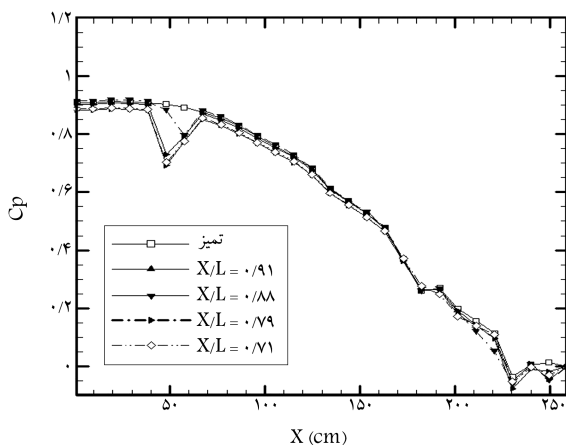
این مسئله به جریان اجازه می‌دهد تا قبل از ورود به مقطع کاری زمان بیشتری برای جبران این گرادیان فشار داشته باشد و در نهایت باعث بهبود کیفیت جریان در داخل مقطع کاری شود. لذا مشخص است که نصب سیم نازک به خصوص در  $\frac{x}{L} = 0,79$  باعث کاهش نوسانات موجود در توزیع فشار در منقبض‌کننده در نزدیک مقطع کاری شده است. همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند که در تمام سرعت‌ها، سیم نازک در این موقعیت، مقدار اوج فشار را نسبت به سایر موقعیت‌های سیم نازک بیشتر کاهش



شکل ۱۴. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۳۰ m/s.



شکل ۱۵. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۴۰ m/s.

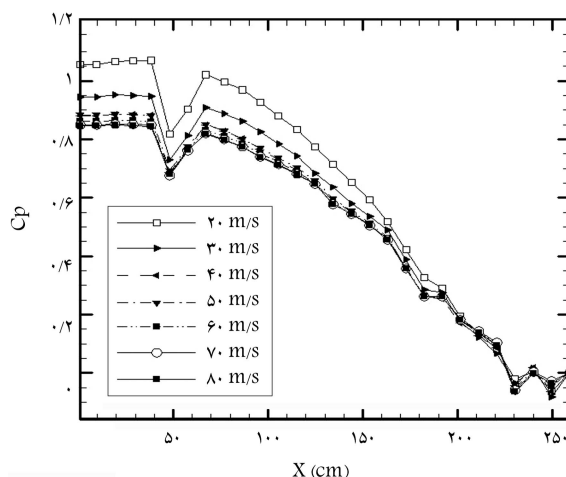


شکل ۱۶. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۵۰ m/s.

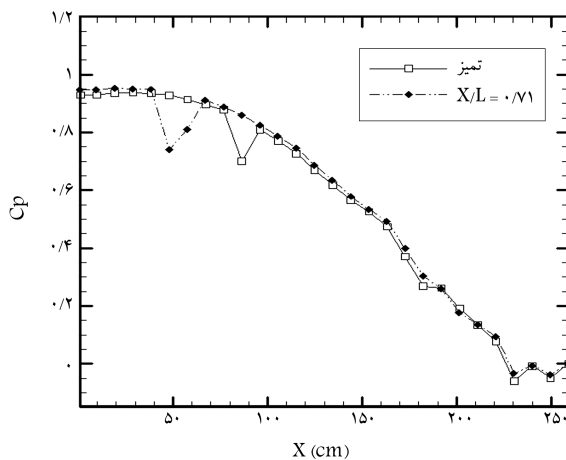
حالت تمیز و حالات قبلی (شکل ۱۰ و ۱۱)، افزایش یافته است و در سرعت‌های بالاتر مقدار Cp در ابتدای منقبض‌کننده نسبت به حالت تمیز کم‌تر و از حالات قبلی بیشتر است. این رفتار حاکی از آن است که قدرت ناپایداری‌های در ورودی منقبض‌کننده برای این محل نصب، نسبت به نقاط قبلی نصب سیم نازک، کم‌تر است. دلیل کم‌تر بودن Cp حالت تمیز در سرعت‌های بالا این است که در حالت تمیز، در ابتدای منقبض‌کننده گرادیان فشار نامطلوبی (ناپایداری) وجود ندارد. برای حالت چهارم سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0,71$  نصب شده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).

با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که توزیع فشار برای این موقعیت سیم نازک، باعث می‌شود که گرادیان فشار مطلوب در محل نصب سیم نازک بیشتر شود، که علت آن انتقال اجباری جریان در این ناحیه است. توزیع فشار در ورودی و خروجی منقبض‌کننده برای این حالت، تقریباً شبیه حالت قبلی، سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0,88$  است با این تفاوت که در سرعت‌های بالا، ناپایداری‌های خروجی منقبض‌کننده را ضعیف‌تر می‌کند.

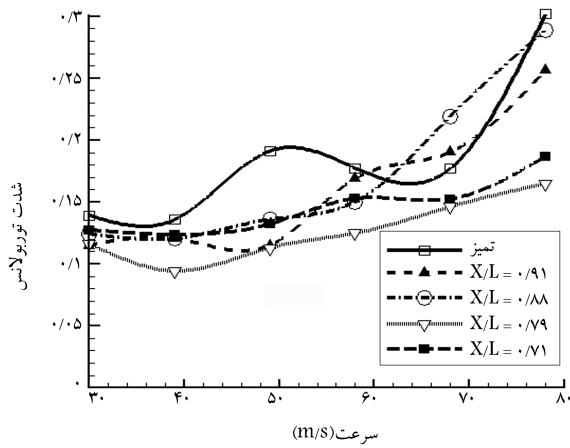
در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ توزیع فشار برای حالات مختلف (تمیز و سه نقطه‌ی نصب) و در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که برای سرعت‌های ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه، سیم نازک گرادیان فشار موجود در ابتدای منقبض‌کننده را برای همه‌ی موقعیت‌ها به سمت محفظه‌ی آرامش متمایل می‌سازد.



شکل ۱۲. بررسی اثر سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت‌های مختلف.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۳۰ m/s.

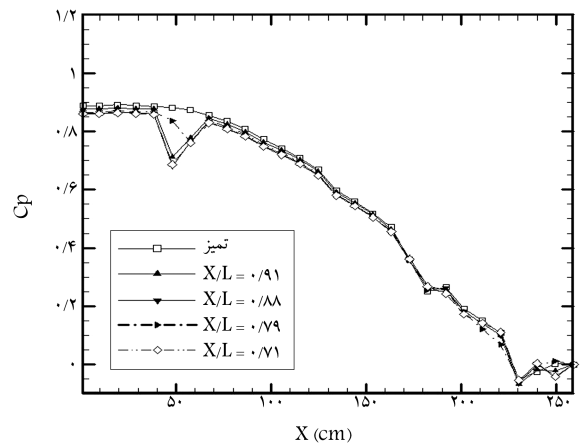


شکل ۲۰. تغییرات شدت آشفتگی در مرکز تونل باد برای ۴ موقعیت نصب سیم نازک.

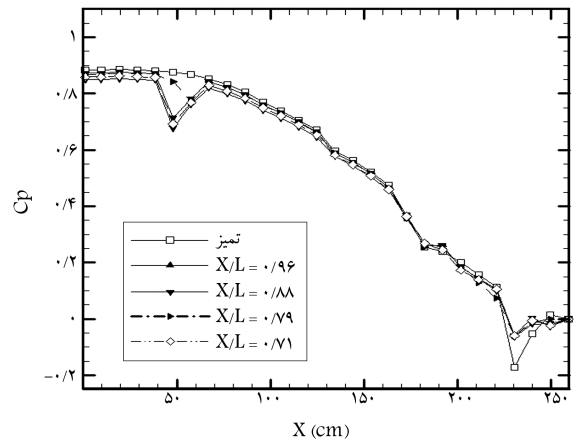
بررسی این شکل نشان می‌دهد که با نصب سیم نازک در موقعیت  $\frac{x}{L} = 0.79$ ، شدت آشفتگی کاهش قابل توجهی یافته و با ثابت کردن نقطه‌ی گذار در منقبض‌کننده، تغییرات شدت آشفتگی در این حالت یکنواخت شده است. اما در موقعیت‌های دیگر آشفتگی در سرعت پایین کاهش یافته ولی در سرعت‌های بالا اثر چشمگیری در کاهش آشفتگی نداشته و حتی در بعضی سرعت‌ها آن را افزایش داده که این پدیده با مباحث مطرح شده به خوبی مطابقت دارد.

### نتیجه‌گیری

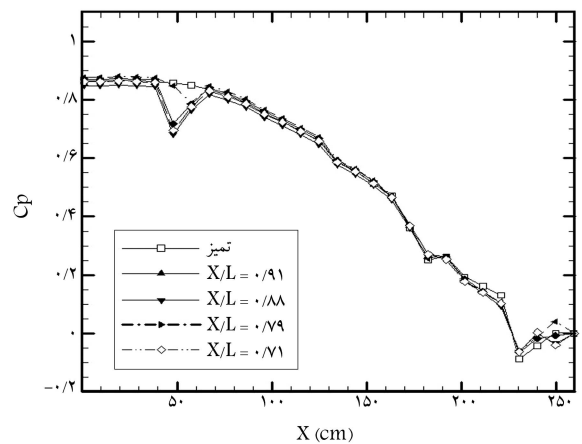
توزیع فشار در منقبض‌کننده‌ی یک تونل باد زیر صوت موجود در کشور برای سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری شده و تغییر توزیع فشار در اثر نصب سیم نازک در قسمت محدب منقبض‌کننده بررسی شده است. این آزمایشات نشان می‌دهد که توزیع فشار در حالت تمیز، در طول منقبض‌کننده همواره مطلوب نیست و همچنین مقدار آن با سرعت تغییر می‌کند که این تغییر در سرعت‌های پایین کاملاً محسوس است. در ابتدا و انتهای منقبض‌کننده گرادیان‌های فشار نامطلوبی که معرف ناپایداری جریان است وجود دارد. در سرعت‌های پایین گرادیان فشار نامطلوبی در ابتدای منقبض‌کننده وجود دارد و با افزایش سرعت این گرادیان نامطلوب کم‌تر و نهایتاً از بین می‌رود. این بدان معناست که در سرعت‌های پایین امکان جدایش جریان زیاد است و با کاهش سرعت جدایش قوی‌تری در این قسمت رخ می‌دهد. در قسمت محدب خروجی منقبض‌کننده نیز گرادیان‌های فشار نامطلوبی مشاهده می‌شود که دلیل آن ناپایداری نوع خمشی است. این گرادیان نامطلوب در تمامی سرعت‌ها مشاهده می‌شود و با افزایش سرعت شدیدتر می‌شود؛ از آنجا که این ناپایداری‌های به مقطع کاری نزدیک‌تر است، اثر بیشتری بر شدت آشفتگی جریان داخل منقبض‌کننده می‌گذارد. لذا برای تضعیف این ناپایداری‌ها، با سیم نازک که در چهار موقعیت در قسمت محدب نازک نصب شده، انتقال اجباری ایجاد شده است. بررسی نتایج مؤید این مطلب است که در سرعت‌های پایین نصب سیم نازک باعث شده که محل تشکیل گرادیان نامطلوب فشار به سمت ورودی منقبض‌کننده نزدیک شود. این پدیده باعث می‌شود جریان فرصت بیشتری برای از بین بردن اغتشاشات ناشی از این ناپایداری جریان داشته باشد. همچنین موجب می‌شود مقدار و شدت گرادیان فشار تغییر کند که موقعیت نصب سیم در  $\frac{x}{L} = 0.79$ ، ضعیف‌ترین گرادیان فشار را دارد.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۶۰ m/s.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۷۰ m/s.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی اثرات سیم نازک بر توزیع فشار در سرعت ۸۰ m/s.

داده است. پیش‌تر گفته شد که در سرعت‌های پایین جریان دارای پیچیدگی‌های بیشتری است و گردابه‌ها و ناپایداری‌های به‌وضوح دیده می‌شوند. از طرف دیگر کم‌ترین ناپایداری‌های برای حالت سیم نازک در  $\frac{x}{L} = 0.79$  وجود دارد. در شکل ۲۰ تغییرات شدت آشفتگی در مقطع کاری برای حالت تونل خالی و زمانی که سیم نازک در چهار موقعیت  $\frac{x}{L} = 0.71, 0.79, 0.88, 0.91$  نصب شده، نمایش داده شده است.

منقبض‌کننده می‌توان آشفتگی را به مقدار قابل توجه کاهش داد، موقعیت نصب سیم نازک در این روش بسیار مهم است.

### فهرست علائم

- $X$ : فاصله‌ی طولی از ورودی منقبض‌کننده (cm)  
 $L$ : طول منقبض‌کننده (cm)  
 $P$ : فشار (Pa)  
 $\rho$ : چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\nu$ : لزجت سینماتیکی ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $U$ : سرعت در راستای طول (m/s)  
 $U_e$ : سرعت موضعی در منقبض‌کننده (m/s)  
 $C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$ : ضریب فشار  
 $GO = \sqrt{\text{Re}}^\delta$ : عدد گورتلر  
 $Re = \frac{U_e X}{\nu}$ : عدد رینولدز موضعی  
 $TI = 100 \times \frac{((v_{rms}^2 + v_{rms}^2)/l)^{1/2}}{(U_{mean}^2 + V_{mean}^2)^{1/2}}$ : شدت آشفتگی

نتایج نشان می‌دهد با نصب سیم نازک مقدار  $C_p$  ابتدای منقبض‌کننده افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده ضعیف شدن ناپایداری‌های در آن ناحیه است. موقعیت نصب سیم در  $\frac{x}{L} = 0.79$  بیشترین مقدار  $C_p$  را که معرف ضعیف‌تر بودن ناپایداری‌های است به خود اختصاص می‌دهد. در سرعت‌های بالاتر نصب سیم نازک باعث تضعیف گرادبان‌های نامطلوب فشاری در خروجی منقبض‌کننده و در نتیجه کم‌تر شدن ناپایداری‌های جریان در آن قسمت می‌شود. به عبارت دیگر با نصب سیم نازک نوسانات موجود در توزیع فشار در نزدیک مقطع کاری تقریباً حذف شده است. همچنین با نصب سیم نازک در سرعت‌های بالا در ابتدای منقبض‌کننده گرادبان فشار نامطلوب ایجاد شده که در حالت بدون سیم نازک، این گرادبان نامطلوب وجود نداشت. در حالت نصب سیم در  $\frac{x}{L} = 0.79$ ، گرادبان نامطلوب فشاری ضعیف‌تر و در نتیجه ناپایداری جریان کم‌تر است. در سرعت‌های بالا مقدار  $C_p$  در ابتدای منقبض‌کننده نسبت به حالت بدون سیم کمی کم‌تر می‌شود.

با توجه به نتایج بالا بهترین موقعیت نصب سیم نازک برای کم‌ترین ناپایداری، در محل  $\frac{x}{L} = 0.79$  است که این مهم در اندازه‌گیری شدت آشفتگی در تونل باد نیز به اثبات رسید. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه با نصب سیم نازک در داخل

### پانویس

1. turbulence
2. contraction
3. Gortler number
4. reverse transition
5. inflection-type
6. local velocity
7. transducer

### منابع

1. Saric, W.S. and Eli, R. "Review of flow quality issues in wind tunnel testing", AIAA-98-2613 (1998).
2. Barlow, J.B.; Rae, W.H. and Pope, A., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Third Edition, John Wiley and Sons (1999).
3. Loehrke, R.I., and Nagib, H.M. "Experiments on management of free-stream turbulence", AGARD-R-598 (Sept. 1972).
4. Owen, F.K. "Wind tunnel flow quality: Retrospect and prospect", 38th Aerospace sciences meeting and exhibits, AIAA 2000-0288 (2000).
5. Owen, F.K., Stainback, P.C. and Harvey, W.D. "Evaluation of flow quality in two NASA transonic wind tunnels", *Journal of aircraft*, **18**, (6) pp.451-457 (1981).
6. Derbunovich, G.I.; Zemskayam A.S.; Repikm E.U and Sosedko, P. "Effect of flow contraction on the level of turbulence", Translated from *Izvestiya Akademii Nauk SSSR*, (2), pp. 146-152 (March-April, 1987).
7. Schubauer, G.B. and Spangenberg, W.G. "Effect of screens in wide angle diffusers", National Advisory Committee for Aeronautics, Report 949 (1947).
8. Mikhailova, N.P.; Repik, E.U. and Sosedko, Y.P. "Optimal control of free stream turbulence intensity by means of honeycombs", *Fluid Dynamics*, **29**, (3), pp.429-437 (1994).
9. Scheiman, J. and Brooks, J.D. "Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb, and honeycomb-screen combinations", NASA Langley Research Center (1981).
10. Soltani, M.R.; Dehghan Manshadi, M. and Mirabdollahi, M.J. "Turbulent reduction in wind tunnel using a trip strip", 2004 ASME Heat Transfer / Fluids Engineering Summer Conference, North Carolina, USA (2004).
11. Ghorbanian, K.; Soltani, M.R. and Dehghan Manshadi, M. "Experimental investigation on turbulence intensity reduction in subsonic wind tunnels", *Achieve of Applied Mechanics*, *The Journal is under review* (October 2008).
12. Mikhail, M.N. "Optimum design of wind-tunnel contractions", *A.I.A.A. Journal*, **17**, (5), pp. 471-477 (1979).
13. Lindgren, B. and Johansson, A.V. "Design and evaluation of a low-speed wind-tunnel with expanding corners", Technical Reports from Royal Institute of Technology (October 2002).
14. Fang, F.M.; 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*, **89**, issues 3-4, pp. 247-262 (2001).



15. Chmielewski, G.E. "Boundary layer considerations in the design of aerodynamic contractions", *McDonnell Douglas Research Laboratories*, St. Louis, Mo, **11**(8) (August 1974).
16. Lanspeary, P.V. and Bull, M.K. "A mechanism for laminar three dimensional separation in duct contractions", 13th Australasian Fluid Mechanics Conference, Monash University, Melbourne, pp. 13-18 (December, 1998).
17. Mehta, R.D. "Turbulent boundary layer perturbed by a screen", *AIAA Journal*, **23**, (9), pp. 1335-1342 (1985).
18. Bottcher, J. and Wedemeyer, E. "The flow downstream of screens and its influence on the flow in the stagnation region of cylindrical bodies", *Journal of Fluid Mechanics*, **204**, pp. 501-522 (1989).
19. Sonada, T. and Aihara, Y. "Effects of pressure gradient on the secondary instability of Görtler Vortices", A.I.A.A. Paper 81-0197 (1981).
20. Bansod, P. and Bradshaw, P. "The flow in S-shaped ducts", *Aeronautical Quarterly*, **23**(2), pp. 131-140 (1972).
21. Takagi, S.; Nishizawa, A. and Tokugawa, N. "Observation of gortler vortices in wind-tunnel contraction boundary layer", Proc. 3rd Int. Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, pp. 275-282 (2000).
22. Takagi, S.; Tokugawa, N.; Shiomi, J. and Kohama, Y. "Laminar turbulent transition along the contraction nozzle in subsonic flow", 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and exhibit, Reno NV (1999).
23. Nishizawa, A.; Takagi, S.; Tokugawa, N. and Sobagaki, T. "Rebirth of turbulence in laminarized boundary layers along the wind tunnel contraction", 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and exhibit, Reno NV, AIAA 2001-0277 (2001).
24. Okamoto, T. and Misu, L. "Reverse transition of turbulent boundary layer flow on curved wall of two-dimensional symmetrical contraction", *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, **22**, pp. 128-138 (1979).
25. Soltani, M.R.; Dehghan Manshadi, M. and Mirabdollahi, M.J. "Flow quality study in a subsonic wind tunnel", ISME 2004 Conference, Tehran, IRAN (2004).
26. Soltani, M.R.; Dehghan Manshadi, M. and Mirabdollahi, M.J. "An experimental study of the flow characteristics in a subsonic wind tunnel", International Mechanical Engineering Conference, December 5-8, Kuwait (2004).
27. Perry, A.E. "Hot-wire anemometry", Clarendon Press Oxford (1982).
28. Lomas, C.G. "Fundamentals of hot wire anemometry", Cambridge University Press (1993).
29. Jorgensen, F.E. "How to measure turbulence with hot wire anemometers", a practice guide, Dantec Dynamics (2005).

