

بررسی کیفی و کمی اثر لانه زنبوری و توری بر بهبود پارامترهای جریان در یک تونل باد زیر صوت

هادی حقوقی*

کارشناس، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

مهدی نیلی احمدآبادی

استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

مجتبی دهقان منشادی

استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا

چکیده

تونل باد، جریان هوای کنترل شده‌ای را ایجاد می‌کند که از اطراف مدل عبور کرده و بدین ترتیب اطلاعات مفیدی از چگونگی عبور جریان از اطراف مدل به دست می‌آید. هدف نهایی از طراحی تونل باد، ایجاد جریان هوای یکنواخت با حداقل شدت آشفتگی^۱ و بدون زاویه می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش شدت آشفتگی جریان نصب لانه‌زنبوری^۲ و توری^۳ در محفظه آرامش تونل باد است. در این پژوهش اثر نصب لانه‌زنبوری و توری با پارامترهای هندسی مشخص بر توزیع سرعت، شدت آشفتگی‌ها و دو پارامتر چولگی^۴ و صافی^۵ جریان در مقطع آزمون تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اندازه‌گیری شدت آشفتگی‌ها از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ^۶ استفاده شده است. این دستگاه سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که نصب لانه‌زنبوری و توری و همچنین جدا کردن فن از بدنه تونل باد باعث کاهش حدود ۷۵ درصدی شدت آشفتگی‌ها در مقطع آزمون تونل باد و همچنین نزدیک شدن پارامترهای چولگی و صافی جریان به مقادیر بهینه آن‌ها شده است. همچنین نتایج به دست آمده مؤید آن است که لانه زنبوری و توری توزیع احتمال نرمال داده‌های سرعت لحظه‌ای را به حالت نرمال نزدیک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، لانه‌زنبوری، توری، شدت آشفتگی، جریان سنج سیم داغ.

Qualitative and Quantitative Investigation of Honeycomb and Screens Effect in Improvement of Flow Characteristics in a Subsonic Wind Tunnel

H. Hoghooghi

B.Sc., student, Isfahan University of Technology, Department of Mechanical Engineering

M. Nili Ahmadabadi

Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Department of Mechanical Engineering

M. Dehghan Manshadi

Assistant Professor, Malek Ashtar University, Department of Mechanical & Aerospace Engineering

Abstract

Wind tunnels generate controlled air flow which passes through the model. Thus, a series of useful data related to air flow quality are obtained. The final goal of wind tunnel design is to generate a uniform air flow with minimum turbulence intensity and low flow angle. One of the methods for decreasing the turbulence intensity is to install honeycomb and screens in the settling chamber of the wind tunnel. In this research, the effects of honeycomb and screens with specified geometric parameters on velocity distribution, turbulence intensity, skewness and flatness are investigated. A set of hot-wire anemometer is used to measure turbulence intensities. It measures flow instantaneous velocity with high frequency. The results show that the installation of honeycomb and screens, and isolation of the test section from the fan decreases the turbulence intensity of the test section about 75% and, optimizes the skewness and flatness values. Moreover, normal probability distribution of instantaneous velocity approaches the normal distribution.

Keywords: Wind tunnel, Honeycomb, Screens, Turbulence Intensity, Hot-wire Anemometry.

¹ Turbulence intensity

² Honeycomb

³ Screen

⁴ Skewness (Kurtosis)

⁵ Flatness

⁶ Hot wire anemometers

۱- مقدمه

میزان شدت آشفته‌گی جریان هوا، در تونل بادهایی که برای آزمایش‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، پارامتر بسیار مهمی است که باید سعی کرد آن را به حداقل رساند. زیرا میزان شدت آشفته‌گی‌های جریان بر روی نقطه شروع لایه مرزی روی مدل اثر گذاشته و از این جهت نتایج حاصل از آزمایش از مقدار واقعی، منحرف می‌شود [۱]. علاوه بر این اغتشاش‌های جریان اثرات قابل توجهی بر روی توزیع فشار در مقطع آزمون و در نتیجه بر روی مدل دارد. همچنین نیروهای آیرودینامیکی در زوایای حمله بالا و نزدیک به واماندگی به شدت به آشفته‌گی جریان وابسته است [۲]. نتیجه این‌که توربولانس یا آشفته‌گی در بی‌ثباتی جریان‌های آرام نقشی اساسی دارد [۳].

تعاریف زیادی در مورد آشفته‌گی جریان بیان شده است. آشفته‌گی پارامتر سه بعدی و وابسته به زمان است که با کشیده شدن ورتکس‌ها سبب ایجاد نوسان‌های متغیر در سرعت سیال می‌شود [۴]. به عبارت دیگر، آشفته‌گی، شرایطی بی‌نظم و بی‌قانون از مؤلفه‌های جریان است که مقادیر مختلفی را به طور اتفاقی به خود می‌گیرد [۵].

از عوامل ایجاد آشفته‌گی در جریان می‌توان به گردابه‌های ناشی از جریان فن، لایه مرزی، تنش برشی، جریان ثانویه و همچنین نویزهای مکانیکی، لرزشی و آیرودینامیکی اشاره کرد [۴]. دستگاه جریان سنج سیم داغ^۱ ابزاری است که به وسیله آن می‌توان سرعت لحظه‌ای جریان سیال را با فرکانس بسیار بالا اندازه‌گیری نمود و با استفاده از سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط، اغتشاش‌های جریان سیال، تنش‌های رینولدز، جهت حرکت جریان (به‌خصوص در جریان‌های معکوس)، کمیت‌های جریان دوفازی و غیره را اندازه‌گیری کرد [۴].

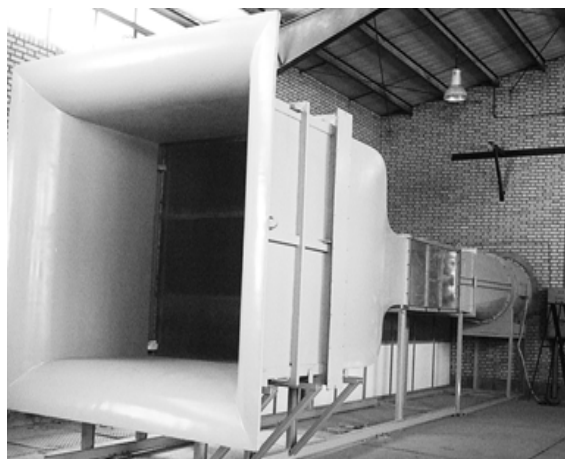
از جمله راه‌های کاهش شدت اغتشاش‌های جریان می‌توان به نصب لانه‌زنبوری و چند لایه توری در محفظه آرامش، جدایی فن تونل باد از بدنه آن برای کاهش انتقال نویزهای فن به مقطع آزمون، استفاده از نازل با نسبت تراکم بالا و استفاده از زبری‌های پیش‌انداز^۲ در ناحیه انقباض تونل باد اشاره کرد. محفظه آرامش بزرگ باعث ایجاد نسبت انقباض بزرگ شده و این امر اغتشاش‌های جریان را کاهش می‌دهد [۶]. سلطانی و همکاران در چند پژوهش اثر تعداد توری و همچنین اثر زبری پیش‌انداز و محل مناسب آن در نازل در کاهش شدت اغتشاش‌ها در مقطع آزمون را مورد بررسی قرار داده و ترکیب ۴ توری و استفاده از زبری پیش‌انداز در فاصله‌ی ۰٫۷۹ طول منقبض‌کننده از مقطع آزمون را پیشنهاد داده‌اند [۶ و ۷].

در این پژوهش، با اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای در مقطع آزمون تونل باد مدار باز دانشگاه صنعتی اصفهان به کمک دستگاه جریان سنج سیم داغ اثر جدایی فن از بدنه تونل باد، نصب لانه زنبوری و نصب دو لایه توری در محفظه آرامش بر شدت آشفته‌گی‌های جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، مقایسه تئوری و تجربی اثر لانه‌زنبوری و توری بر توزیع سرعت و کاهش شدت آشفته‌گی‌های جریان و پارامترهای آماری مثل چولگی و صافی جریان انجام می‌شود.

شایان ذکر است تونل باد مدار باز دانشگاه صنعتی اصفهان بازسازی شده است. هدف اصلی در این پژوهش، انتخاب صحیح و مناسب و نصب تجهیزات کاهنده شدت آشفته‌گی به منظور رساندن سطح اغتشاشات این تونل باد به سطح استاندارد برای پژوهش‌های آتی این تونل باد بوده است. ضمن آنکه از نتایج این تحقیق می‌توان برای ارتقای کیفیت جریان تونل‌بادهای مشابه بهره برد.

۲- تجهیزات اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان و در نتیجه محاسبه شدت اغتشاش‌ها و دیگر پارامترهای جریان سیال، از تونل باد، دستگاه جریان سنج سیم داغ، سیستم داده‌برداری، پایه نگه‌دارنده با قابلیت تنظیم ارتفاع، مانومتر و لوله پیتوت استفاده شده است. تونل باد مدار باز دانشگاه صنعتی اصفهان در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. این تونل باد که طرحواره آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از نوع مدار باز مکنده بوده و دارای مقطع آزمونی با ابعاد ۹۰×۹۰×۱۹۰ سانتی‌متر و حداکثر سرعت ۵۵ متر بر ثانیه در مقطع آزمون است. نسبت تراکم نازل این تونل باد در حدود ۶ می‌باشد. مقطع کاری مذکور امکان استفاده از این تونل‌باد برای کاربردهای صنعتی و پژوهشی را فراهم می‌سازد.



شکل ۱- نمایی از تونل باد مدار باز دانشگاه صنعتی اصفهان

¹ Hotwire Anemometry

² Trip strip

۴- تئوری آزمایش

۴-۱- تجزیه و تحلیل سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده

دستگاه جریان سنج سیم داغ سرعت جریان را به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. به منظور بررسی کمی و کیفی جریان سیال باید مقادیر آماری مشخص شود. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های آماری جریان سیال، سرعت متوسط است که طبق معادله (۱) تعریف می‌شود [۸].

$$U_{mean} = \frac{\sum_{n=1}^N U(n)}{N} \quad (1)$$

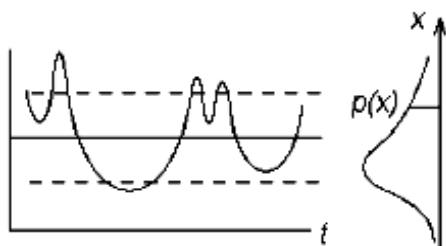
انحراف معیار سرعت جریان سیال که مشخص کننده شدت آشفتگی‌های جریان سیال است، طبق معادله (۲) تعریف می‌شود [۸].

$$u_{rms} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (U(n) - U_{mean})^2 \right)^{0.5} \quad (2)$$

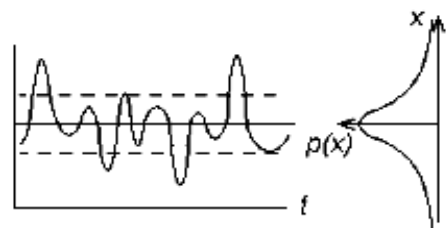
با استفاده از انحراف معیار سرعت جریان سیال، می‌توان شدت اغتشاش‌های جریان سیال را به صورت زیر تعریف نمود [۸].

$$T_u = \frac{u_{rms}}{U_{mean}} \times 100\% \quad (3)$$

دو پارامتر مهم دیگر که در بررسی کیفیت جریان سیال مورد استفاده است، چولگی و صافی است. مقدار چولگی بیان کننده میزان تقارن سرعت لحظه‌ای نسبت به میانگین سرعت جریان سیال است. درحالی که مقدار صافی بیان کننده میزان صافی لحظه‌ای و توزیع آن است. طرحواره این دو پارامتر را در شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان مشاهده کرد [۸].



شکل ۲- طرحواره مفهوم چولگی [۸]



شکل ۳- طرحواره مفهوم صافی [۸]

شدت اغتشاش‌های محوری در مقطع آزمون با استفاده از سیم داغ یک مؤلفه و متعلقات آن اندازه‌گیری می‌شود. نرم‌افزار مربوط به جریان سنج سیم داغ به منظور اخذ داده‌ها جهت پردازش، از کارت داده‌برداری آنالوگ به دیجیتال ۱۶ کانال استفاده می‌کند. همچنین، سرعت مرجع به کمک مانومتر و لوله پیتوت اندازه‌گیری می‌شود.

۳- روش انجام آزمایش

فرکانس اخذ داده برداری برای اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌های جریان توسط جریان سنج سیم داغ ۱ کیلوهرتز و تعداد نمونه برداری در نقطه مورد نظر ۲۵۰۰ عدد می‌باشد. قبل از داده برداری دستگاه سیم داغ به صورت استاتیکی و دینامیکی کالیبره شده است و فرکانس قطع برای اندازه‌گیری ۱۰ کیلوهرتز انتخاب شده است. اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای به منظور کالیبراسیون سیم داغ و همچنین اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در ۱۰ سرعت مختلف و از حدود سرعت ۱۱ تا ۴۵ متر بر ثانیه انجام گرفته است. کلیه اندازه‌گیری‌ها برای دو حالت قبل و بعد از ایزوله کردن فن از بدنه تونل باد، قبل و بعد از نصب لانه‌زنبوری و توری‌ها صورت گرفته و محل نصب سیم داغ که در مرکز یا نقاط دیگری از اتاق آزمون است، تغییری نکرده است. به منظور اندازه‌گیری توزیع سرعت در مقطع آزمون نیز سطح مقطع مرکزی، توسط سیستم تراورسینگ دو درجه آزادی و در بیش از ۷۰ نقطه جاروب شده است. شایان ذکر است اعدادی که به عنوان میانگین شدت آشفتگی محاسبه شده‌اند، در حقیقت میانگین شدت آشفتگی در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری شده و در نقطه مرکزی اتاق آزمون بوده است. البته به منظور بررسی دقیق کیفیت جریان در اتاق آزمون میزان شدت آشفتگی در نقاط دیگر سطح مرکزی نیز اندازه‌گیری شده‌اند و پس از اطمینان از مشابه بودن این مقادیر با مقادیر نقطه مرکزی، از اطلاعات این نقطه برای مقایسه استفاده شده است تا شرط تشابه در مقایسه در نظر گرفته شود.

همچنین قابل ذکر است که به دلیل اینکه در این پژوهش بحث انتخاب توری و لانه زنبوری مناسب و بررسی اثر آن‌ها بر کاهش شدت آشفتگی جریان در اتاق آزمون تونل باد مورد توجه بوده است، لذا اندازه‌گیری مقادیر آشفتگی در حالتی که تونل باد هیچ تجهیزاتی جهت کاهش شدت آشفتگی ندارد (تونل مرجع)، ضروری است چراکه باید بر اساس تجارب موجود و اندازه‌گیری‌های انجام شده حدود تعداد و نوع تجهیزات کاهش دهنده شدت آشفتگی مثل توری را محاسبه نمود.

طبق تعریف آماری این پارامترها را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد [۸].

$$S = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^3}{N \times u_{ms}^3} \quad (۴)$$

و

$$K = \sum_1^N \frac{(U(n) - U_{mean})^4}{N \times u_{ms}^4} \quad (۵)$$

چولگی همان ممان سوم مرکزی است که بیان کننده عدم تقارن در منحنی سرعت لحظه‌ای جریان سیال نسبت به میانگین می‌باشد. در صورتی که داده‌های به دست آمده مطابق با توزیع نرمال باشد، به دلیل تقارن، میزان چولگی برابر صفر است [۱].

میزان صافی را می‌توان همان ممان چهارم مرکزی دانست. میزان کشیدگی منحنی توزیع چگالی را نسبت به منحنی توزیع چگالی گوس، صافی می‌نامند. در اصل میزان پیک ناگهانی نمودار توزیع نسبت به توزیع نرمال توسط میزان صافی بیان می‌شود. این مقدار برای توزیع نرمال گوس برابر ۳ است [۱].

۴-۲- روابط تئوری حاکم بر تاثیر لانه زنبوری و توری روی کیفیت جریان

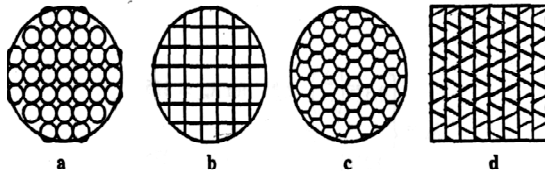
با توجه به این که توری‌ها قادر به کنترل و کاهش زاویه جریان نمی‌باشند، به همین دلیل، در محفظه آرامش علاوه بر توری، از لانه زنبوری نیز استفاده می‌شود. معمولاً لانه زنبوری‌ها دارای خانه‌هایی با مقاطع شش گوش است و از آلومینیوم ساخته می‌شود. برای لانه زنبوری شش گوش با اندازه استاندارد ضریب افت فشار k_h برابر ۰٫۲ در نظر گرفته می‌شود [۱]. شایان ذکر است برای محاسبه ضریب افت لانه زنبوری‌ها می‌توان از روابط زیر کمک گرفت [۱].

$$k_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (۶)$$

که در آن λ_h ضریب افت فشار در واحد طول سلول، D_h قطر هیدرولیکی سلول، L_h طول لانه زنبوری در جهت جریان و β_h نسبت سطح باز به سطح کل لانه زنبوری است. مقدار λ_h تابعی از قطر هیدرولیکی، زبری دیواره سلول و عدد رینولدز در سلول بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$\lambda_h = \begin{cases} 0.375 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} Re_{\Delta}^{-0.1} & Re_{\Delta} \leq 275 \\ 0.214 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} & Re_{\Delta} > 275 \end{cases} \quad (۷)$$

در این روابط Δ اندازه زبری دیواره سلول و سرعت در عدد رینولدز بر پایه زبری دیواره، سرعت ورودی به لانه زنبوری است. برای لانه زنبوری‌های شکل ۴ با نسبت طول به قطر هیدرولیکی برابر با ۶ و سطح مقطع هیدرولیکی یکسان، مقدار ضریب افت فشار به ترتیب برای نمونه‌های a و b و c برابر ۰٫۳ و ۰٫۲۲ و ۰٫۲ در نظر گرفته می‌شود [۱].



شکل ۴- انواع مختلف لانه زنبوری [۱]

میزان کاهش شدت اغتشاش‌ها توسط لانه زنبوری یا f_h را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱].

$$f_h = \frac{(T_u)_{after}}{(T_u)_{before}} = \frac{1 + \alpha - \alpha k_h}{1 + \alpha + k_h} \quad (۸)$$

که در آن α ضریب چرخش بوده و از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید [۱].

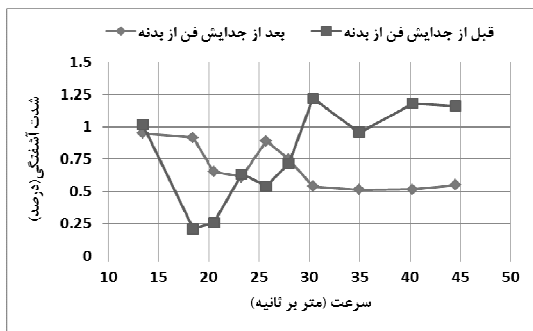
$$\alpha = \frac{1.1}{\sqrt{1 + k_h}} \quad (۹)$$

مکانیزم کار توری بدین صورت است که گردابه‌های موجود در جریان هوا که بزرگتر از سوراخ‌های توری هستند، پس از عبور از توری، خرد شده و به گردابه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شوند. این گردابه‌های کوچک نیز در پایین دست توری از بین می‌روند. توری‌ها اغتشاش‌های محوری جریان را بهتر از اغتشاش‌های جانبی کم می‌کنند. یک توری معمولاً با عددی به نام β و قطر سیمی که از آن بافته شده است، مشخص می‌شود. β به تعداد سوراخ‌های توری، در یک اینچ از طول آن گفته می‌شود. توری‌هایی که برای کاهش شدت اغتشاش‌ها استفاده می‌شوند، نسبت مساحت باز توری به مساحت کل توری یا همان ضریب (β) که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود، باید از ۰٫۵۷ بزرگتر باشد. در غیر این صورت برای نسبت‌های کوچکتر از ۰٫۵۷، مشکل ناپایداری جریان وجود دارد. همچنین عدد رینولدز بر پایه‌ی قطر سیم توری باید بیشتر از ۸۰ باشد. در این حالت دنباله‌های جریان هوا که ناشی از سیم است به صورت آشفته بوده و در پایین دست جریان از بین می‌رود [۱].

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{l} \right)^2 \quad (۱۰)$$

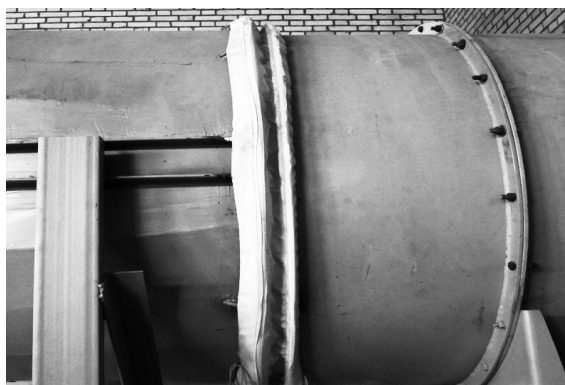
که d قطر سیم و l فاصله دو سیم توری از یکدیگر است و یا طبق تعریف مرجع [۱] برابر است با:

$$l = \frac{25.4}{Mesh} \quad (۱۱)$$



شکل ۴- اثر جدایش فن از بدنه بر شدت آشفته‌گی مقطع آزمون

مقایسه میانگین آشفته‌گی در دو حالت نشان می‌دهد که جدایش فن از بدنه این تونل باد حدود ۲۶ درصد شدت آشفته‌گی مقطع آزمون را کاهش داده است. البته در این دو حالت تونل باد بدون توری و لانه زنبوری بوده است. علت کاهش شدت آشفته‌گی در این حالت کاهش ارتعاشات بدنه و نویز مکانیکی تونل باد می‌باشد. قابل ذکر است نویز مکانیکی و نویز آیرودینامیکی همراه با گردابه‌ها منابع اصلی تشکیل دهنده شدت آشفته‌گی در یک تونل باد می‌باشند. لذا با جداکردن فن از بدنه تونل باد، ارتعاشات سیستم فن به تونل باد منتقل نشده و در نتیجه نویز مکانیکی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در نتیجه شدت آشفته‌گی تونل باد مورد مطالعه نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۵- نحوه جدایش فن از بدنه تونل باد این پژوهش

حال با توجه به استانداردهای موجود و متناسب با تونل باد مورد نظر، لانه زنبوری مناسب نصب گردید و پس از نصب آن بار دیگر در شرایطی کاملاً مشابه قبل، آشفته‌گی مقطع آزمون اندازه‌گیری شده تا بتوان اثر لانه زنبوری در کاهش شدت آشفته‌گی را مورد بررسی قرار داد. شکل ۶ نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهد.

رابطه محاسبه ضریب افت فشار توری به صورت رابطه (۱۲) است [۱]:

$$k = k_0 + \frac{55.2}{Re_d} \quad (12)$$

که در آن

$$k_0 = \left(\frac{1 - 0.95\beta}{0.95\beta} \right)^2 \quad (13)$$

شایان ذکر است Re_d عدد رینولدز بر پایه قطر سیم توری است. برای محاسبه کاهش شدت اغتشاش‌های سرعت با استفاده از توری‌ها، تئوری‌های فراوانی وجود دارد. در اکثر این تئوری‌ها محاسبه کاهش شدت اغتشاش‌ها بر پایه اغتشاش‌های همگن بوده و بنابراین ممکن است در جریان واقعی، میزان کاهش شدت اغتشاش‌ها با مقادیر تئوری همخوانی نداشته باشد. پراتل در سال ۱۹۳۳ معادله زیر را برای کاهش شدت اغتشاش‌های محوری هنگامی که از دو یا چند توری استفاده شود، ارائه نمود [۱].

$$f_u = \frac{1}{1+k} \quad (14)$$

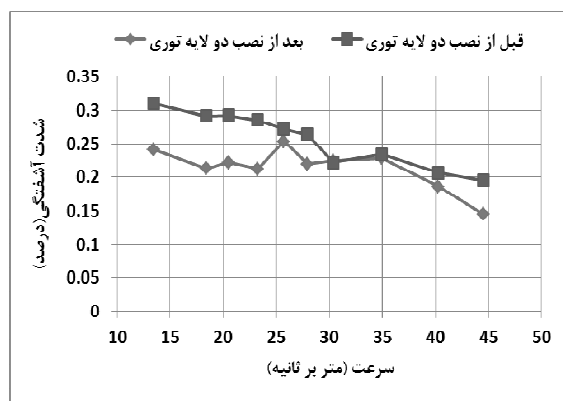
با توجه به معادله فوق برای n عدد توری مشروط بر این که ضریب افت فشار k ، برابر مجموع ضرایب افت فشار هر یک از توری‌ها باشد، کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$f_u = \left(\frac{1}{1+k} \right)^{n/2} \quad (15)$$

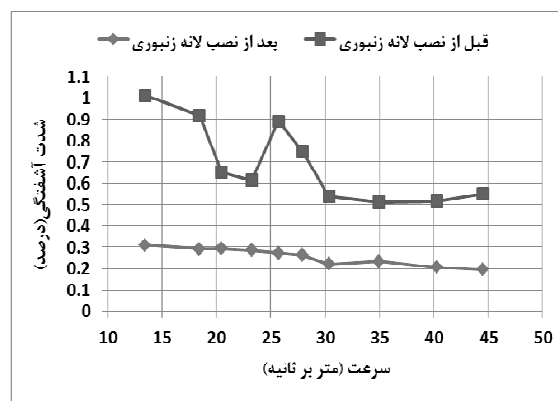
۵- نتایج

۵-۱- نتایج تجربی

ابتدا بدون نصب توری و لانه زنبوری یک‌بار قبل از جدایش فن از بدنه تونل باد و بار دیگر بعد از جدایش فن از بدنه تونل باد داده برداری انجام می‌شود که در شکل ۴ مقایسه نتایج آشفته‌گی مقطع آزمون برای این دو حالت نشان داده شده است. معمولاً برای تونل بادهایی که سازه بدنه مستحکم و میراکننده-های مناسبی ندارد و حتی برای آن‌هایی که از سازه قوی و میراکننده مناسب نیز برخوردار هستند، بهتر است فن تونل باد از بدنه آن جدا شود تا ارتعاشات ناشی از دوران فن به بدنه و در نتیجه مقطع آزمون منتقل نگردد. این کار همراه با تقویت سازه تونل باد مطابق شکل ۵ برای تونل باد این پژوهش انجام شده است.

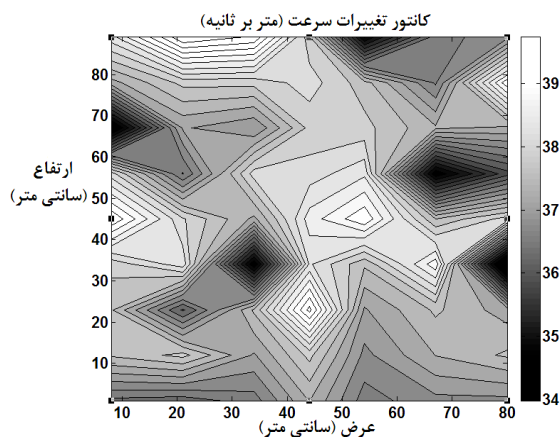


شکل ۷- اثر نصب دو لایه توری بر شدت آشفتهگی مقطع آزمون

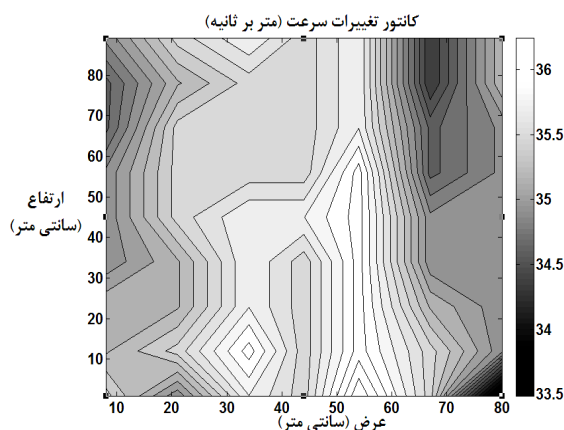


شکل ۶- اثر نصب لانه زنبوری بر شدت آشفتهگی مقطع آزمون

نتایج نشان می دهد که حضور توری و لانه زنبوری اثر مهمی در یکنواخت کردن کانتور سرعت دارد. ضمن آنکه اثر جریان های چرخشی و گردابه ای کاهش یافته است.



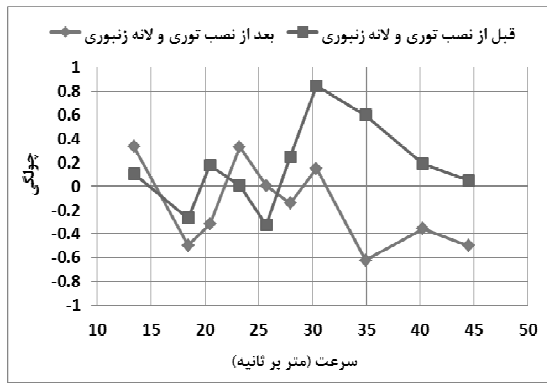
شکل ۸- کانتور تغییرات سرعت در صفحه مرکزی اتاق آزمون قبل از نصب لانه زنبوری و توری



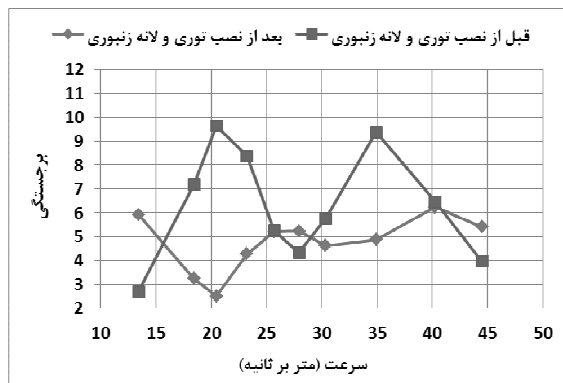
شکل ۹- کانتور تغییرات سرعت در صفحه مرکزی اتاق آزمون بعد از نصب لانه زنبوری و توری

میانگین نتایج شدت آشفتهگی نشان می دهد نصب لانه زنبوری حدود ۶۵٫۴ درصد شدت آشفتهگی را کاهش می دهد. این شکل به خوبی نشان می دهد که حضور لانه زنبوری نه تنها شدت آشفتهگی را در تمامی سرعت ها کاهش داده بلکه توزیع آنها را نیز یکنواخت کرده و تقریباً در دو بازه قبل و بعد از سرعت ۳۰ متر بر ثانیه شدت آشفتهگی مقدار ثابتی دارد که این مسئله برای یک تونل باد صنعتی دارای اهمیت می باشد. لانه زنبوری نقش اساسی در موازی کردن خطوط جریان در محفظه آرامش دارد. بررسی ها نشان می دهد که تنها با استفاده از لانه زنبوری نمی توان به کیفیت جریان قابل قبول در تونل باد رسید و در کنار آن استفاده از توری ها توسط محققین پیشنهاد شده است. لذا برای شکستن گردابه های بزرگتر و در نتیجه کاهش بیشتر شدت اغتشاشات در مقطع آزمون، دو توری مناسب در محفظه آرامش و در پایین دست لانه زنبوری نصب گردید و به طریق مشابه قبل، شدت آشفتهگی مقطع آزمون اندازه گیری شد. ملاحظه شد نصب دو لایه توری سبب کاهش ۱۳٫۱ درصدی شدت آشفتهگی شده است. نتیجه این مقایسه در شکل ۷ مشهود است.

نتایج حاضر نشان می دهد که نصب لانه زنبوری و توری علاوه بر کاهش شدت آشفتهگی در مقطع آزمون، سبب بهبود پروفیل سرعت در این مقطع و در حقیقت یکنواختی هرچه بیشتر سرعت شده است که این مهم تأثیر بسزایی در صحت تست های تونل باد دارد چراکه صحت نتایج تونل باد وابسته به یکنواختی جریان در مقطع کاری دارد. در ادامه به کمک جابجایی نقاط سطح مقطع میانی محفظه آزمون با لوله پیتوت و مانومتر مطابق شکل های ۸ و ۹ کانتور تغییرات سرعت در وسط مقطع کاری تونل باد قبل و بعد از نصب لانه زنبوری و توری ها به دست آمده است.



شکل ۱۲- تغییرات چولگی با سرعت

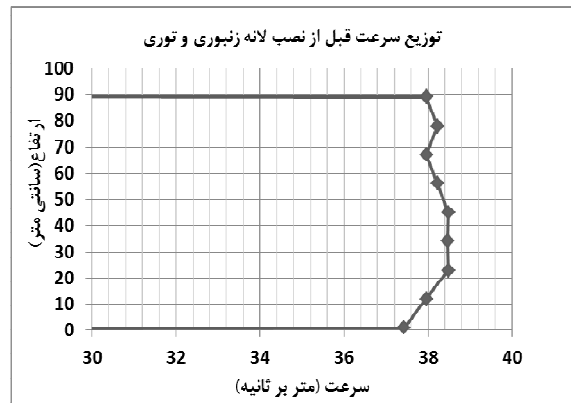


شکل ۱۳- تغییرات صافی با سرعت

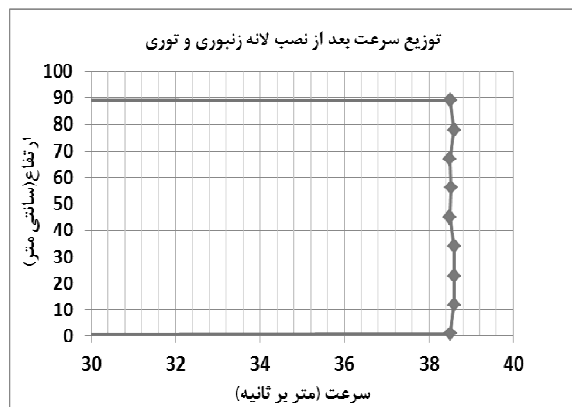
تغییرات پارامتر آماری چولگی مطابق شکل ۱۲ نشان می‌دهد نصب لانه زنبوری و توری تقارن داده‌ها نسبت به مقدار صفر را بیشتر کرده است و این می‌تواند مؤید اثر کاهشدهنده برای شدت آشفتگی باشد. همچنین با توجه به شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که پس از نصب لانه زنبوری و توری مقادیر صافی به مقدار بهینه نزدیک‌تر شده است و به عنوان نمونه در سرعت‌های نزدیک ۲۰ متر بر ثانیه این مقدار تقریباً برابر مقدار بهینه یعنی ۳ است. به بیان دیگر زمانی که کشیدگی منحنی توزیع چگالی نسبت به توزیع معیار کمتر شود، می‌توان تصور این را داشت که پراکندگی توزیع کمتر است و شدت آشفتگی کاهش خواهد یافت. همین تفاوت ایجاد شده در توزیع داده‌ها را می‌توان در نمودار ولتاژ-نمونه داده‌ها مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به وضوح مشاهده کرد.

دو نمودار اخیر نشان می‌دهد نصب توری و لانه زنبوری نه تنها باعث کاهش مقدار شدت آشفتگی می‌شود بلکه میزان قله‌های نمودار را نیز کاهش می‌دهد و توزیع داده‌ها را به توزیع گوس نزدیک می‌کند. علاوه بر این اگر توزیع احتمال نرمال^۲ برای این دو حالت رسم شود، می‌توان به خوبی تفاوت ایجاد شده در نحوه توزیع داده‌ها را مشاهده کرد. به منظور مقایسه بهتر نمودارهای توزیع احتمال نرمال و نزدیک شدن داده‌ها به توزیع نرمال ابتدا

برای مقایسه کمی اثر نصب لانه زنبوری و توری بر پروفیل سرعت، سرعت نقاط خط مرکزی در راستای قائم در دو حالت در دو شکل (۱۰) و (۱۱) رسم شده است. با توجه به این دو شکل یکنواخت شدن توزیع سرعت با حضور لانه زنبوری و توری‌ها کاملاً مشهود است.



شکل ۱۰- توزیع سرعت خط مرکزی قبل از نصب لانه زنبوری و توری



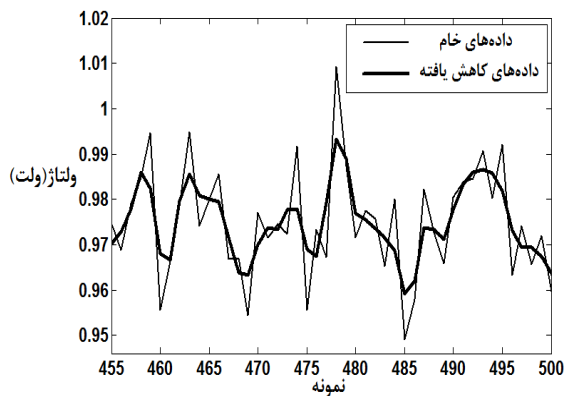
شکل ۱۱- توزیع سرعت خط مرکزی بعد از نصب لانه زنبوری و توری

۵-۲- تحلیل آماری

اساس کار تحلیل‌های آماری بررسی اعتبار یک مجموعه داده است. انحراف داده‌ها از توزیع گوسی^۱ را می‌توان با دو پارامتر صافی و چولگی بررسی کرد. چولگی بیان‌کننده عدم تقارن در منحنی سرعت لحظه‌ای جریان سیال نسبت به میانگین و صافی میزان کشیدگی منحنی توزیع چگالی را نسبت به منحنی توزیع چگالی گوس است. همان‌طور که گفته شده مقدار بهینه برای چولگی برابر صفر و برای صافی برابر ۳ است. شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات چولگی و صافی را نسبت به سرعت در دو حالت قبل و بعد از نصب لانه زنبوری و توری نشان می‌دهد.

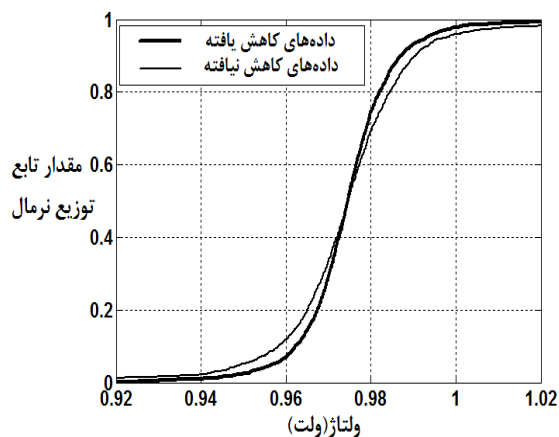
^۲ Normal Probability Plot

^۱ Gaussian distribution



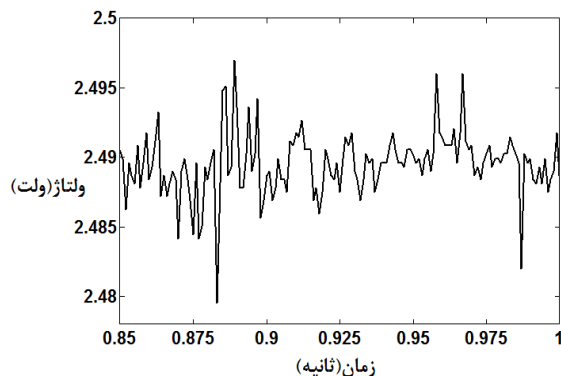
شکل ۱۶- اثر کاهش داده‌ها

شکل ۱۷ اثر کاهش داده‌ها را بر تابع توزیع نرمال آن‌ها نشان می‌دهد. بدین ترتیب با کاهش داده‌ها توزیع آن‌ها به حالت نرمال نزدیک‌تر شده است و می‌توان بهتر آن‌ها را مقایسه کرد. توزیع نرمال داده‌ها مطابق شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان می‌دهد نصب لانه زنبوری و توری سبب بهبود توزیع داده‌ها و نزدیک شدن آن به توزیع نرمال شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است در حالت بعد از نصب لانه زنبوری و توری، نقاط به خط نزدیک‌ترند و اختلاف آن‌ها با توزیع نرمال کاهش یافته است. گفتنی است برای بقیه سرعت‌ها نیز نمودارها دارای رفتار مشابهی هستند.

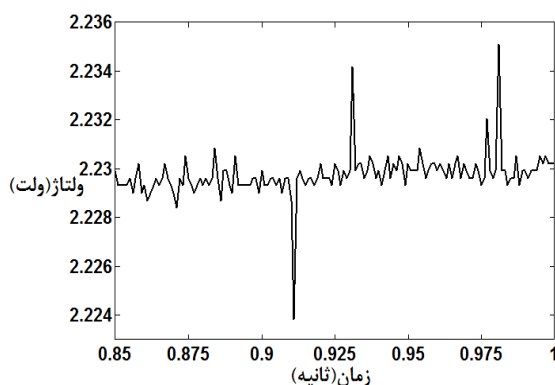


شکل ۱۷- اثر کاهش داده‌ها بر توزیع داده‌ها

بهتر است فرآیند کاهش داده‌ها^۱ انجام گیرد تا مطابق شکل ۱۶ پراش‌های موجود در داده‌ها فیلتر شود.



شکل ۱۴- نمودار ولتاژ-نمونه قبل از نصب توری و لانه زنبوری (سرعت ۳۰ متر برثانیه)



شکل ۱۵- نمودار ولتاژ-نمونه بعد از نصب توری و لانه زنبوری (سرعت ۳۰ متر برثانیه)

به این منظور از روش عددی انتگرال‌گیری سیمپسون^۲ استفاده گردیده، توزیع تیز و نقطه‌ای داده‌ها به حالت منحنی و پیوسته نزدیک شود. رابطه کلی روش سیمپسون برای تابع $f(x)$ به صورت زیر است.

$$f(x_i) = \frac{1}{4}(f(x_{i-1}) + 2f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (14)$$

¹ Data Reduction Process

² Simpson Numerical Integration

گفتنی است برای محاسبه عدد رینولدز بر پایه قطر سیم، سرعت در محفظه آرامش ۵ متر بر ثانیه و خواص هوا در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد (دمای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه جریان سنج سیم داغ) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- نتایج محاسبات ضریب کاهش شدت اغتشاش توری

مشخصات توری	توری اول	توری دوم
قطر سیم (میلی متر)	۰٫۲۲	۰٫۲۲
تعداد مش در هر اینچ M	۱۰	۲۰
ابعاد مش (میلی متر) I	۲٫۵	۱٫۲۷
ضریب افت فشار K	۰٫۸۵	۱٫۰۷
ضریب تئوری محاسبه شده	۰٫۳۴	
ضریب تجربی اندازه‌گیری شده	۰٫۸۷	

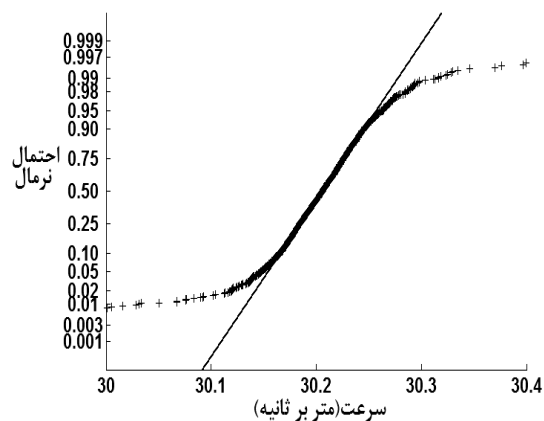
همان‌طور که برای لانه زنبوری اشاره شد، اختلاف دو مقدار تئوری و تجربی برای ضریب کاهش شدت آشفتگی توسط توری نیز به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بهترین روش، اندازه‌گیری برای محاسبه دقیق این ضریب می‌باشد.

۴-۵- منابع خطا و تکرارپذیری

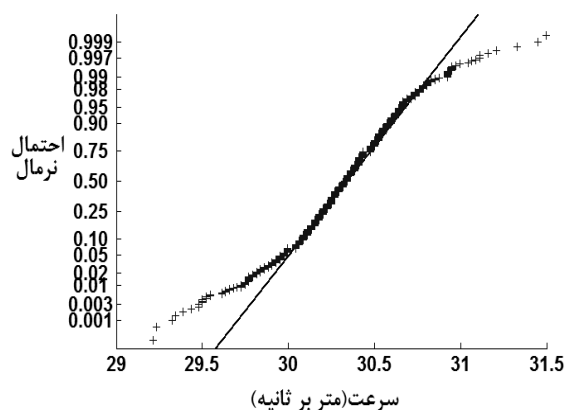
همواره در حین انجام اندازه‌گیری‌های تجربی خطاها وجود دارند که می‌توان آنها را به دو دسته تقسیم کرد: خطاهای ثابت (سیستماتیک) و خطاهای تصادفی (تکرارناپذیر). خطاهای ثابت در اندازه‌گیری‌های تکراری یکسان است و به همین دلیل با کالیبراسیون و تصحیحات مناسب قابل حذف شدن هستند. ولی خطاهای تصادفی برای هر بار خواندن متفاوتند بنابراین قابل حذف نیستند. هدف تحلیل عدم قطعیت، برآورد احتمال خطای تصادفی در نتایج تجربی است. از جمله منابع خطا در اندازه‌گیری به جریان‌سنج سیم داغ می‌توان به خطاهای انسانی، خطای کارت‌های داده‌برداری، منحنی کالیبراسیون، لرزش‌های اتفاقی، تغییر ناگهانی شرایط محیطی و خطاهای ناشی از تعیین سرعت با مانومتر و لوله پیتوت اشاره کرد. در این پژوهش ارزیابی از عدم قطعیت داده برداری‌ها صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عدم قطعیت در اندازه‌گیری شدت توربولانس حدود ۳ درصد و سرعت متوسط ۵ درصد می‌باشد. قابل ذکر است بیشترین عدم قطعیت در سرعت‌های پایین اتفاق می‌افتد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شدت آشفتگی در مقطع آزمون یک تونل باد زیر صوت اندازه‌گیری شد و اثر نصب لانه زنبوری و توری بر شدت آشفتگی و پارامترهای مختلف جریان در مقطع آزمون



شکل ۱۸- نمودار احتمال نرمال بعد از نصب توری و لانه‌زنبوری (سرعت ۳۰ متر برثانیه)



شکل ۱۹- نمودار احتمال نرمال قبل از نصب توری و لانه‌زنبوری (سرعت ۳۰ متر برثانیه)

۳-۵- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

اگر برای لانه زنبوری نصب شده در این تونل باد که از نوع شش گوش بوده و دارای قطر هیدرولیکی سلول برابر ۶٫۱ میلی‌متر و طول در جهت جریان حدود ۳۸٫۱ میلی‌متر است، محاسبات مربوط به ضریب کاهش شدت آشفتگی‌ها انجام شود، ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب کاهش شدت آشفتگی برابر ۰٫۸۱ به‌دست می‌آید و این در حالی است که از نتایج تجربی این ضریب برابر ۰٫۳۵ به‌دست آمد. بارلو^۱ و همکاران [۱] در متن مرجع یک به این اختلاف اشاره کرده و بیان می‌کنند این اختلاف برای توری و لانه زنبوری ممکن است تا ۵۰ درصد نیز برسد [۱].

برای توری نیز باید طبق روابط بیان شده ضریب کاهش شدت اغتشاشات را محاسبه کرد و سپس با مقدار تجربی مقایسه نمود. نتیجه این محاسبات با توجه به مشخصات توری در جدول ۱ آمده است.

¹ Barlow

صافی	K
ضریب افت فشار توری	k
ضریب افت فشار لانه زنبوری	k_h
ضریب کاهش شدت آشفتگی لانه زنبوری	f_h
ضریب کاهش شدت آشفتگی توری	f_u

مراجع

- [1] Barlow, J.B.; Rae, W.H. and Pope, "A Low-Speed Wind Tunnel Testing", Third Edition, John Wiley and Sons, 1999.
- [2] Owen, F.K., "Wind tunnel flow quality" retrospect and prospect, 38th Aerospace sciences meeting and exhibits, AIAA 2000-0288.
- [3] دهقان منشادی مجتبی، "ارائه روشی برای کاهش آشفتگی در تونل بادهای مادون صوت"، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا، پایان نامه دکتری به شماره ۳۹۸۵۸، ۱۳۸۸.
- [4] Dehghan Manshadi. M, "The Importance of Turbulence in Assessment of Wind Tunnel Flow Quality", Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, Edited by Jorge Colman Lerner and Ulfilas Boldes, Intech open access publisher, chapter 12, 2011.
- [5] Bradshaw.P, "The Understanding and Prediction of Turbulent Flow - 1996" (presented at Engineering Foundation Conference on Turbulent Heat Transfer, San Diego 1996), Int. J. Heat and Fluid Flow, vol. 18, pp. 45, 1997.
- [6] Soltani M.R., Ghorbanian K. and Manshadi M.D., "Application of Screens and Trips in Enhancement of Flow Characteristics in Subsonic Wind Tunnels", Mechanical Engineering Vol. 17, No. 1, pp. 1-12 Sharif University of Technology, 2010.
- [7] Finn E. Jorgensen, "How to measure turbulence with hot-wire anemometers", a practical guide, DANTEC Dynamic, 2002.
- [8] سلطانی محمدرضا، قربانیان کاوه، میرزایی محسن، دهقان منشادی مجتبی، "بهبود توزیع فشار منقبض کننده برای کاهش آشفتگی تونل باد"، مجله مهندسی مکانیک شریف، دوره ۳-۲۶، شماره ۱، ص ۱۱-۱۹، ۱۳۸۸.

مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که با جدا کردن فن از بدنه تونل باد و به کمک توری و لانه زنبوری می توان کیفیت جریان در مقطع آزمون را بهبود بخشید و جریان یکنواخت تری در مقطع کاری ایجاد کرد.

نتایج نشان می دهد جدا کردن فن از بدنه تونل باد و نصب لانه زنبوری و توری حدود ۷۵ درصد شدت آشفتگی جریان در مقطع آزمون را کاهش داده است. همچنین ملاحظه شد که روابط تئوری موجود برای اندازه گیری مقدار یا ضریب کاهش آشفتگی متناسب با یک نوع توری یا لانه زنبوری نسبت به مقدار اندازه گیری شده با جریان سنج سیم داغ در بعضی موارد تا ۵۰ درصد اختلاف دارد. بررسی نتایج مؤید این مطلب است که لانه زنبوری و توری علاوه بر کاهش شدت آشفتگی، پارامترهای آماری جریان سیال از جمله چولگی و صافی را نیز به مقدار بهینه نزدیک می کنند. به بیان دیگر پس از نصب توری و لانه زنبوری توزیع داده های سرعت لحظه ای سیال به حالت نرمال گوسی نزدیک می شود. نمودارهای توزیع احتمال نرمال به خوبی این نتایج را تصدیق می کند. از نتایج این تحقیق می توان در ارتقای کیفیت جریان تونل بادهای مشابه استفاده نمود.

۷- پیشنهادها

در تونل بادهای پژوهشی یا تحقیقاتی دقیق که آزمایش های حساسی را به کمک آن ها انجام می دهند، لازم است شدت آشفتگی جریان در مقطع آزمون بسیار پایین (کمتر از ۰٫۱ درصد) باشد. به همین منظور می توان علاوه بر افزودن تعداد توری ها (معمولاً حداکثر ۴ عدد) از روش هایی مثل استفاده از زبری پیش انداز در ناحیه محدب منقبض کننده و تغییر در توزیع فشار منقبض کننده شدت اغتشاشات را در مقطع آزمون کاهش داد [۷]. همچنین باید دانست نسبت انقباض بالا (معمولاً بیشتر از ۱۰) لازمه طراحی یک تونل باد با شدت آشفتگی بسیار پایین است.

سپاسگزاری ها

نویسندگان بر خود لازم می دانند از همکاری آقایان حمید مددکن، محمدحسن کریمی و هانی محمدی در انجام آزمایش ها سپاسگزاری کنند. همچنین شایسته است از مساعدت های ستاد توسعه هوافضا در حمایت های مادی از این پژوهش و ارتقای تونل باد دانشگاه صنعتی اصفهان تقدیر نمود.

نمادها

شدت آشفتگی	T_{II}
چولگی	S