

بررسی تجربی تأثیر دیفیوزر بر عملکرد فن

در تونل بادهای مدار باز مکنده، فن‌های جریان محوری جریان هوا را به محیط اتمسفر تخلیه می‌کنند. این تخلیه جریان هوا سبب می‌شود که انرژی بسیار زیادی تلف شود که متناسب با توان سوم سرعت جریان هوا می‌باشد. به منظور کاهش تلفات می‌توان از دیفیوزر در پایین دست فن استفاده نمود. لذا نیاز است که تأثیر دیفیوزر بر عملکرد فن مشخص شود. در این تحقیقات تجربی با استفاده از بستر آزمون فن که طبق استاندارد ISO 5801 ساخته شده، منحنی مشخصه فن با دیفیوزر و بدون آن اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از تونل باد، مدل Y/A دیفیوزر مورد ارزیابی قرار گرفته و توزیع فشار در امتداد آن و همچنین توزیع سرعت در خروجی آن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که پدیده جدایش در دیفیوزر فوق‌اتفاق نیافتاده است. هنگامیکه دیفیوزر با نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی ۲ در پایین دست فن قرار می‌گیرد، دبی جریان هوا حدود ۱۰٪ و فشار استاتیکی آن نیز حدود ۲۵٪ افزایش می‌یابد. توان مصرفی فن نیز تغییر قابل توجهی نداشته و در نتیجه عملکرد فن با دیفیوزر حدود ۳۵٪ بهبود می‌یابد.

محمدعلی اردکانی^۱

دانشیار

واژه‌های راهنما: فن، دیفیوزر، منحنی مشخصه، تونل باد

۱- مقدمه

فن یکی از اجزای اصلی سیستم‌های سیالاتی می‌باشد که برای جابه‌جایی جریان هوا از آن استفاده می‌شود. فن را به طور کلی می‌توان به دو گروه جریان محوری و جریان شعاعی تقسیم نمود. در مواردی که دبی مورد نیاز سیستم‌های سیالاتی بالا است، از فن‌های جریان محوری استفاده می‌شود [۱]. فن‌های جریان محوری در سیستم‌های تهویه و همچنین تونل باد از نوع مدار باز و بسته، کاربرد دارد. در اینگونه سیستم‌ها و تونل بادهای مدار باز، فن جریان هوا را از درون سیستم به محیط اتمسفر تخلیه می‌کند. با تخلیه جریان هوا به اتمسفر، انرژی زیادی از توان ایجاد شده توسط فن تلف می‌شود. این انرژی متناسب با توان سوم سرعت جریان هوا در خروجی فن می‌باشد [۲]. همچنین نویز ناشی از جریان هوای خروجی از فن به محیط اتمسفر نیز بالا خواهد بود [۳].

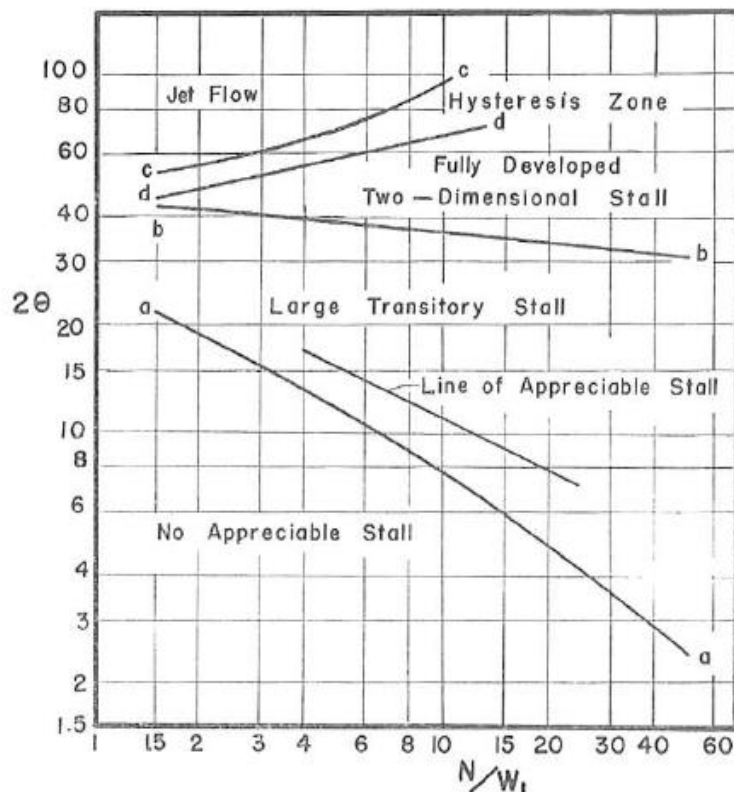
در سیستم‌های سیالاتی که دبی و یا توان مصرفی فن کم است، انرژی تلف شده ناشی از تخلیه جریان هوا به اتمسفر نیز قابل اهمیت نمی‌باشد. ولی برای سیستم‌هایی که افت فشار آن بالا بوده و همچنین دبی آن نیز

^۱ دانشیار، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ardekani@irost.org

بالا است، از جمله تونل بادهای مدار باز، تلفات انرژی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و در بسیاری از موارد سبب می‌شود که سیستم سیالاتی دارای عملکرد مناسب نباشد. به منظور کاهش تلفات انرژی، مناسب است که در پایین دست فن، سرعت جریان هوا را توسط دیفیوزر کاهش داد. اگرچه، کاهش سرعت جریان هوا سبب می‌شود، تلفات ناشی از انرژی تخلیه شده کم شود، ولی دیفیوزر نیز دارای تلفات می‌باشد. تلفات در دیفیوزر به دو صورت اصطکاکی و انبساطی می‌باشد که تلفات اصطکاکی ناشی از طول دیفیوزر و تلفات انبساطی ناشی از تغییرات گرادیان فشار است. بحث مهم در طراحی دیفیوزر، جلوگیری از جدایش جریان هوا در آن می‌باشد [۴]، اگر جدایش جریان در دیفیوزر اتفاق بیافتد، افت فشار و تلفات زیادی در آن رخ می‌دهد. در صورتی که دیفیوزر پایین دست فن به طور مناسب طراحی و انتخاب شود، اگرچه افت فشار استاتیکی سیستم سیالاتی افزایش می‌یابد، ولی با توجه به کاهش سرعت جریان هوا در خروجی دیفیوزر، کاهش افت فشار دینامیکی ناشی از تخلیه جریان هوا به اتمسفر، بیشتر از افت فشار استاتیکی بوده و در مجموع تلفات سیستم کاهش می‌یابد. هنگامی که تلفات سیستم کاهش می‌یابد، انرژی مصرفی فن نیز کاهش خواهد یافت. در ارتباط با دیفیوزر، تحقیقات بسیار زیادی توسط پژوهشگران انجام پذیرفته است. اکرت و همکاران [۵] ضریب افت فشار در دیفیوزرهایی با شکل ورودی و خروجی مربعی، دایروی و مستطیلی و یا ترکیبی از آن‌ها را بررسی کرده و معادلات نیمه تجربی را برای به دست آوردن ضریب افت فشار ارائه دادند. اردکانی و همکارش [۶] جریان در دیفیوزر هشت ضلعی به چهار ضلعی را بررسی نموده و افت فشار را برای دیفیوزرهایی که زاویه آن متفاوت است، ارائه نمود. همچنین اردکانی و همکارش [۷] به منظور بررسی جدایش یک دیفیوزر هشت ضلعی به چهار ضلعی، توزیع سرعت جریان هوا و اغتشاش‌های آن را اندازه‌گیری نمود.

همانگونه که بیان شد، انتخاب دیفیوزر از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد، به طوری که باید در آن جدایش اتفاق نیافتد. طبق مرجع [۴] برای اینکه تلفات در دیفیوزر کمترین مقدار را داشته باشد، زاویه مخروط دیفیوزر ۲۰ تا ۵۰ الی ۶۰ مناسب می‌باشد، همچنین نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی دیفیوزر حدود ۲ تا ۲/۵ نیز مناسب است. ولی شرایط طراحی و هزینه ساخت سیستم‌های سیالاتی به این گونه نمی‌باشد که بتوان دیفیوزر را مطابق مرجع [۴] طراحی و ساخت. لذا در بسیاری از طراحی‌ها محدودیت برای طراحی دیفیوزر وجود دارد. بنابراین احتمال جدایش در دیفیوزر طراحی شده، وجود دارد. شکل (۱) رژیم‌های جریان برای دیفیوزرهای دو بعدی و مستقیم را بر اساس زاویه واگرایی آن، طبق داده‌های مرجع [۸] نشان می‌دهد.

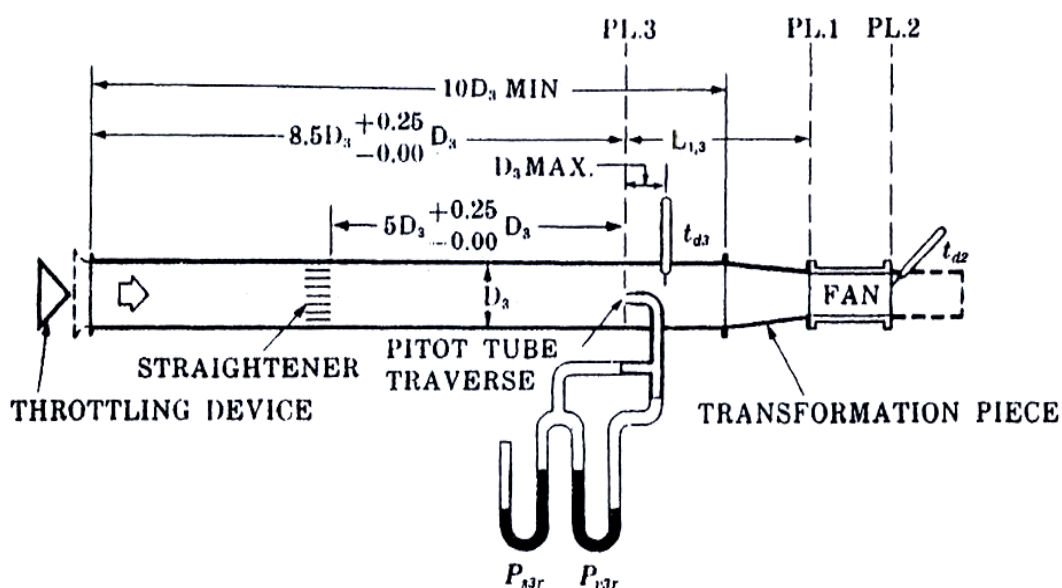
در این تحقیق تجربی که در راستای طراحی تونل باد عمودی انجام گرفته است، با استفاده از بستر تست فن، طبق استاندارد AMCA 210-99 [۱۲] و یا ISO 5801 [۱۳] منحنی مشخصه فن‌های تونل باد را به دست آورده، سپس دیفیوزر را در پایین دست فن نصب کرده و منحنی مشخصه فن و دیفیوزر را توأمأً به دست آورده و تأثیر دیفیوزر بر عملکرد فن مشخص می‌شود. همچنین به منظور بررسی عملکرد دیفیوزر و فن، مدل ۷/۸٪ آن ساخته شده، توزیع فشار و تلفات در آن نیز اندازه‌گیری شده است. در این مقاله نتایج تأثیر دیفیوزر بر عملکرد فن ارائه شده است.



شکل ۱- رژیم‌های جریان برای دیفیوزرهای دوبعدی و مستقیم بر اساس زاویه واگرایی کل [۸]

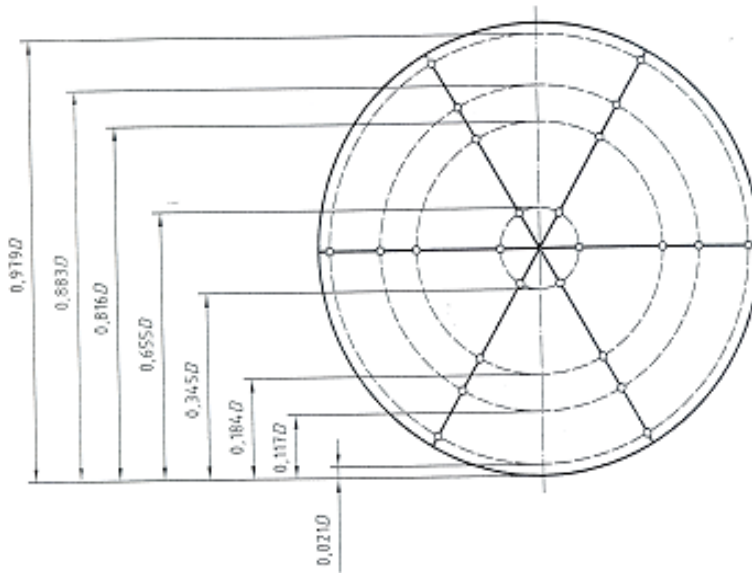
۲- روش آزمایش

آزمایش‌ها در دو بخش استفاده از بستر آزمون فن و تونل باد کوچک انجام گرفته است. شکل (۲) شماتیک بستر آزمون فن را که از نوع کانالی می‌باشد، نشان می‌دهد. این بستر طبق استاندارد ISO 5801 ساخته شده است.



شکل ۲- شماتیک بستر آزمون به صورت کانالی

مطابق شکل فوق بستر آزمون از کانالی به قطر نزدیک به قطر فن، D_3 ، و طول ده برابر قطر آن، L ، تشکیل شده است. فن در پایین دست بستر قرار گرفته و با اندازه گیری فشار استاتیکی (مکانی که خطوط جریان هوا موازی کانال است)، سرعت دورانی فن، فشار سکون، توان مصرفی فن و دبی جریان هوا می توان منحنی مشخصه فن که نشان دهنده عملکرد فن بوده و شامل منحنی های (فشار استاتیکی-دبی)، (توان مصرفی-دبی) و (راندمان-دبی) است، را به دست آورد. فشار استاتیکی با اندازه گیری فشار بر روی سطح کانال در مقطع PL.3 به دست می آید. فشار سکون نیز با استفاده از لوله های پیتوت در مقطع PL.3 اندازه گیری می شود. برای اندازه گیری دبی جریان هوا، سرعت متوسط جریان هوا را اندازه گیری نموده و در سطح مقطع کانال ضرب می کنیم. در فاصله $D_3/5$ از ورودی کانال، سرعت جریان هوا به طور کامل توسعه یافته است و می توان سرعت متوسط جریان هوا را طبق شکل (۳) اندازه گیری نمود. شکل (۳) روش خطی- لگاریتمی برای چهار نقطه را نشان می دهد که در هر شعاع شش نقطه قرار دارد.



شکل ۳- روش خطی- لگاریتمی در چهار نقطه در راستای شعاع برای اندازه گیری دبی

با اندازه گیری فشار کل در نقاط مذکور طبق شکل (۳)، و همچنین با اندازه گیری فشار استاتیکی بر روی بدنه بستر می توان فشار دینامیکی و در نتیجه با محاسبه چگالی جریان هوا ρ ، می توان سرعت متوسط جریان هوا و یا به عبارت دیگر دبی جریان هوا را مشخص نمود. با اندازه گیری اختلاف فشار خروجی در مقطع PL.2 و ورودی در مقطع PL.1 می توان فشار استاتیکی فن را به دست آورد. فشار استاتیکی در مقطع PL.2 برابر اتمسفر می باشد. با اندازه گیری فشار استاتیکی در مقطع PL.3 و استفاده از روابط زیر می توان فشار استاتیکی و فشار کل فن را به دست آورد.

$$P_{s1} = P_{s3} - kq \quad (1)$$

$$k = \frac{\Delta P}{q} = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \quad (2)$$



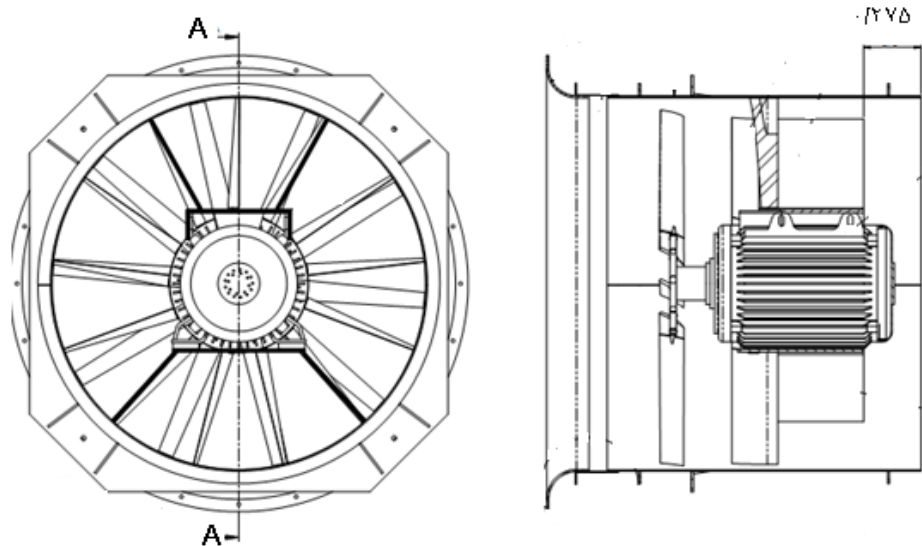
شکل ۴- تصویر بستر آزمایش فن

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \text{Log}_{10} (R_e \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (۳)$$

$$P_s = P_b - P_{s1} = -P_{s1} \quad (۴)$$

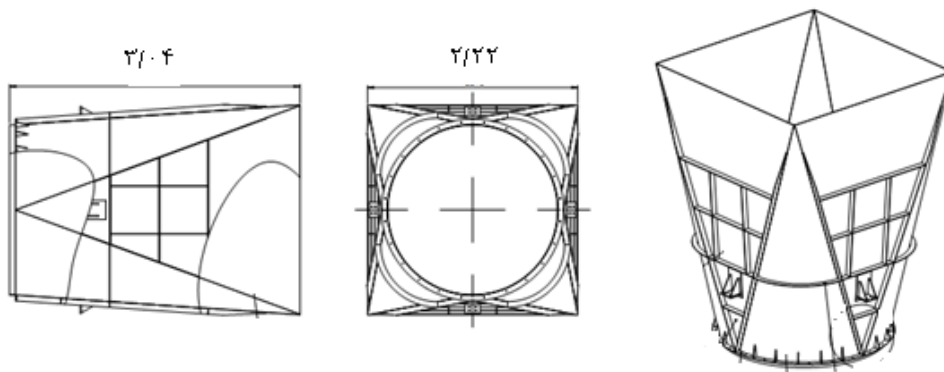
در رابطه فوق q فشار دینامیکی بوده و برابر $\frac{1}{2} \rho U^2$ است. L ، فاصله مقطع $PL.1$ از مقطع $PL.3$ ، D_3 قطر کانال بستر آزمون و Re عدد رینولدز بر مبنای قطر کانال است. هنگامی که دیفیوزر پایین دست فن قرار دارد، مشابه هنگامی که فن بدون دیفیوزر است، مکان اندازه‌گیری در مقطع $PL.3$ می‌باشد و طبق روابط ارائه شده اختلاف فشار استاتیکی فن به همراه دیفیوزر اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۴) تصویر بستر آزمون فن را نشان می‌دهد که برای کنترل دبی جریان هوا در دهانه ورودی آن از مکانیزم کنترل‌کننده دبی استفاده شده است. این مکانیزم به شکل مخروط می‌باشد که بر روی ریلی قرار داشته که با نزدیک نمودن مخروطی شکل به دهانه ورودی، افت فشار در کانال ایجاد می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار، از فشارسنج الکترونیکی با بازه ۱۲۵۰ پاسکال استفاده شده است. داده‌های دما، فشار استاتیکی و فشار کل از طریق کارت A/D ۱۲ بیتی به رایانه ارسال می‌شود. داده‌های دور فن و توان مصرفی، بوسیله کنترل دور اندازه‌گیری شده و از طریق درگاه سریال به رایانه ارسال می‌شود و توسط نرم‌افزار نوشته شده، تجزیه و تحلیل می‌شوند و منحنی‌های مشخصه فن به دست می‌آید.

شکل (۵) فن مورد آزمون را نشان می‌دهد، که قطر فن فوق $1/8$ متر و طول آن $1/5$ متر است. مطابق شکل فوق فن از نوع پره محوری می‌باشد که پره‌های راهنمای آن در پایین دست پروانه قرار دارد. فن دارای پروانه به قطر $1/78$ متر می‌باشد که دارای ده عدد پره از نوع ایرفیلی است. موتور الکتریکی فن 132 kW و سرعت دورانی آن نیز 980 rpm است. لقی بین پره و پوسته فن حدود 7 میلی‌متر است. تعداد 16 عدد از این نوع فن، در تونل باد عمودی به صورت موازی مورد استفاده قرار گرفته شده است.



شکل ۵- فن جریان محوری مورد آزمون

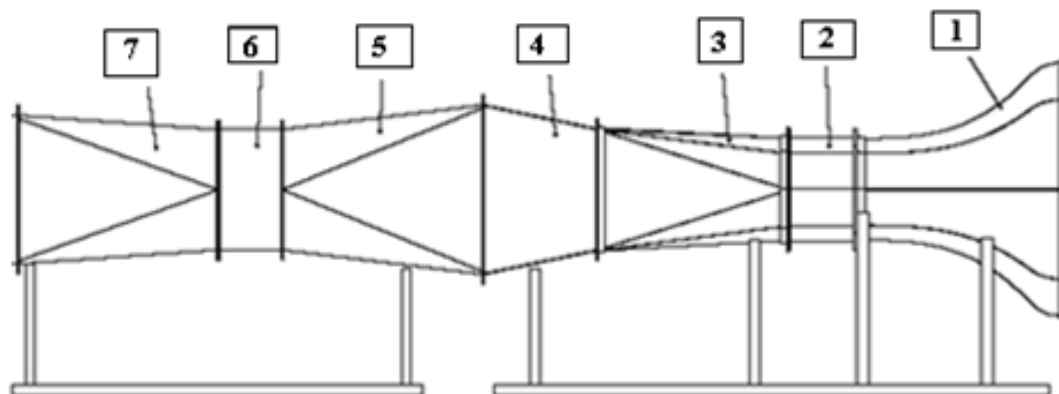
شکل (۶) دیفیوزر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق دیفیوزر دارای سطح مقطع ورودی به شکل دایره و به قطر $1/8$ بوده و سطح مقطع خروجی آن به شکل مربع و ضلع $2/22$ متر است، لذا نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی دیفیوزر حدود ۲ می‌باشد. از این نوع دیفیوزر در تونل باد عمودی استفاده شده است.



شکل ۶- دیفیوزر مورد استفاده پس از فن

به منظور بررسی عملکرد دیفیوزر، مدل $7/8$ آن ساخته شده و با استفاده از تونل باد مکنده مطابق شکل (۷) آزمایش‌های لازم انجام پذیرفت. در این تونل باد، فن از نوع جریان محوری بوده و در پایین دست اتاق آزمون قرار دارد، دیفیوزر مورد آزمایش نیز پس از فن قرار گرفته است. سرعت جریان هوا توسط کنترل دور فن، تنظیم می‌شود. در این آزمون‌ها، توزیع فشار استاتیکی در امتداد دیواره نازل توسط فشارسنج ۳۲ کاناله اندازه‌گیری شده است. بدین منظور بر روی دیفیوزر، اوریفیس‌های لازم نصب شده که با استفاده از شلنگ به فشارسنج الکتریکی متصل شده است. برای اندازه‌گیری سرعت و اغتشاش‌های جریان هوا در خروجی دیفیوزر از جریان‌سنج سیم داغ [۱۴]، ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شده است و پراب مورد استفاده یک

بعدی است. برای جابه‌جایی پراب جریان‌سنج سیم داغ نیز از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده که دقت جابه‌جایی آن حدود ۰/۱ mm است و توسط رایانه کنترل می‌شود.

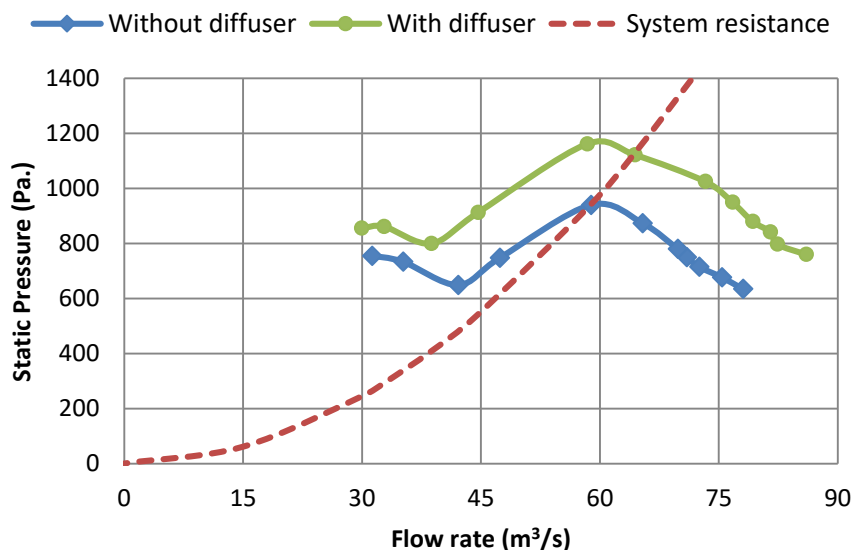


شکل ۷- تونل باد مکنده مورد استفاده در آزمایش

شامل اجزاء: ۱- نازل ۲- مقطع آزمون ۳- دیفیوزر اول ۴- دیفیوزر دوم ۵- قطعه تبدیل ۶- فن محوری ۷- دیفیوزر پس از فن

۳- بررسی نتایج

به منظور بررسی و مقایسه تأثیر دیفیوزر بر منحنی‌های مشخصه فن، از بستر آزمون مطابق شکل (۲) و یا (۴) استفاده شده است.



شکل ۸- مقایسه منحنی‌های فشار استاتیکی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن

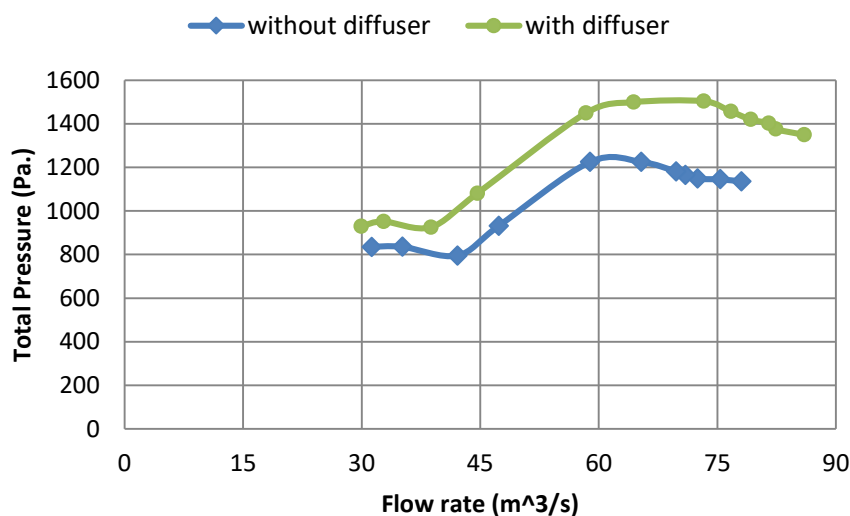
در سرعت دورانی ۹۸۰ rpm

شکل (۸) منحنی فشار استاتیکی برحسب دبی جریان هوای فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن، در سرعت دورانی ۹۸۰ rpm نشان می‌دهد. این فشار استاتیکی همان اختلاف فشار اتمسفر و ورودی فن می‌باشد، که طبق رابطه (۴) به دست می‌آید. هنگامی که دیفیوزر وجود ندارد، این فشار استاتیکی، همان فشار استاتیکی فن است. هنگامی که دیفیوزر وجود دارد، این فشار استاتیکی، اختلاف فشار خروجی دیفیوزر با ورودی فن می‌باشد. برای به دست آوردن منحنی‌های شکل (۸) با استفاده از کنترل دور فن، سرعت دورانی فن را برای ۹۸۰ rpm تنظیم نموده و با استفاده از مکانیزم کنترل دبی جریان هوا که در شکل (۴) نشان داده شده است، دبی جریان هوا تنظیم می‌شود. با تغییر موقعیت مخروط این مکانیزم، می‌توان دبی و مقاومت بستر آزمون را تنظیم نموده و منحنی فشار استاتیکی - دبی فن را به دست آورد. بیشترین دبی فن برای حالتی است که افت فشار فقط ناشی از بستر آزمون است، در این حالت دبی فن حدود $78 \text{ m}^3/\text{s}$ و فشار استاتیکی که فن ایجاد می‌کند، حدود ۶۳۵ پاسکال می‌باشد. در صورتیکه در امتداد و در خروجی فن دیفیوزر قرار گیرد، در سرعت دورانی ۹۸۰ rpm، دبی جریان هوا به حدود $86 \text{ m}^3/\text{s}$ و فشار استاتیکی به ۷۶۰ پاسکال افزایش می‌یابد. با ایجاد مقاومت در بستر آزمون، دبی جریان هوا کاهش یافته ولی فشار استاتیکی افزایش می‌یابد. این کاهش دبی جریان هوا که به همراه افزایش فشار استاتیکی است، تا مقدار $59 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش می‌یابد. در این نقطه فشار استاتیکی برای فن بدون دیفیوزر ۹۴۰ پاسکال و برای فن با دیفیوزر ۱۱۶۰ پاسکال می‌باشد. با افزایش مقاومت در بستر آزمون از نقطه $59 \text{ m}^3/\text{s}$ به بعد، نه تنها فشار استاتیکی افزایش نمی‌یابد، بلکه فشار استاتیکی کاهش می‌یابد. لذا مشخص می‌شود که در این نقطه پدیده واماندگی اتفاق افتاده و بر روی پره فن، جدایش ایجاد شده است. لازم به ذکر است که فن‌های جریان محوری نباید در این منطقه کار کنند. نقطه کارکرد فن‌ها نقطه تلاقی، منحنی مقاومت سیستم (نظیر تونل باد) و منحنی (فشار استاتیکی-دبی) می‌باشد. در شکل فوق افت فشار تونل باد نیز نشان داده شده است که به صورت رابطه $P_s = kQ^2$ بیان می‌شود. k ضریب افت فشار می‌باشد، هنگامی که k برابر 0.272 می‌باشد، نقطه تلاقی منحنی فن بدون دیفیوزر با افت فشار تونل باد بعد از نقطه واماندگی بوده که بیانگر عملکرد نادرست فن است. ولی نقطه تلاقی منحنی فن به همراه دیفیوزر با افت فشار تونل باد قبل از نقطه واماندگی بوده که بیانگر عملکرد صحیح و مناسب فن است.

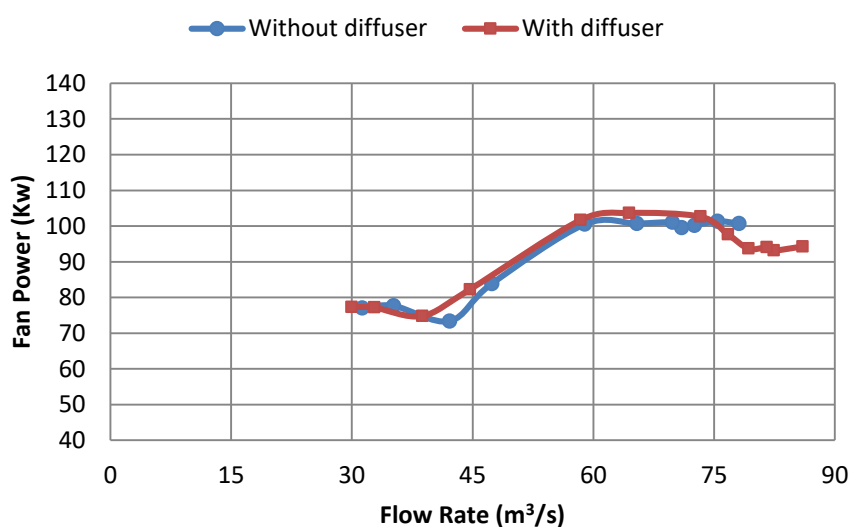
مطابق شکل (۸) روند کاهش همزمان دبی جریان هوا و فشار استاتیکی (ناحیه واماندگی) تا دبی حدود m^3/s ۴۲ کاهش می‌یابد. از این نقطه به بعد با کاهش دبی فشار استاتیکی افزایش می‌یابد.

در این مرحله مکانیزم انتقال انرژی از فن به جریان هوا تغییر کرده و انرژی به صورت ایجاد اختلاف فشار ناشی از پره‌های فن به سیال منتقل نمی‌شود، بلکه به صورت ضربه، انرژی از پروانه فن به جریان سیال منتقل می‌شود [۱]. در این حالت، راندمان فن بسیار پایین بوده و فن دارای نویز بسیار زیادی می‌باشد که احتمال آسیب دیدگی آن نیز بالا است. همچنین مطابق شکل (۸) هنگامی که دبی جریان هوا $65 \text{ m}^3/\text{s}$ است، اختلاف فشار ورودی فن با اتمسفر برای حالتی که فن بدون دیفیوزر است، برابر ۸۸۰ پاسکال می‌باشد. هنگامی که از دیفیوزر استفاده می‌شود این اختلاف فشار به حدود ۱۱۸۰ پاسکال می‌رسد. همچنین با توجه به منحنی فوق می‌توان دریافت، هنگامی که اختلاف فشار اتمسفر با ورودی فن حدود ۸۸۰ پاسکال است،

دبی جریان هوا برای فن بدون دیفیوزر $65 \text{ m}^3/\text{s}$ بوده و برای فن با دیفیوزر حدود $78 \text{ m}^3/\text{s}$ است. لذا برای حالتی که اختلاف فشار اتمسفر و ورودی فن ثابت است، دیفیوزر تأثیر بسیار زیادی بر افزایش دبی فن دارد.



شکل ۹- مقایسه منحنی های فشار کل فن های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن در سرعت دورانی 980 rpm

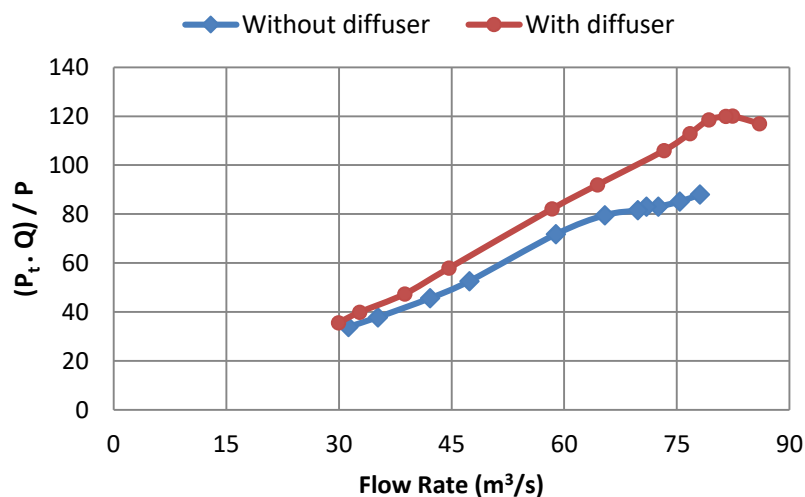


شکل ۱۰- مقایسه منحنی های توان مصرفی فن های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن در سرعت دورانی 980 rpm

شکل (۹) منحنی های فشار کل فن پره محوری با دیفیوزر و بدون آن را برحسب دبی جریان هوا نشان می دهد. فشار کل مجموع فشار استاتیکی و فشار دینامیکی $P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho U^2$ می باشد. همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است، هنگامی که دیفیوزر در پایین دست فن قرار دارد، در ناحیه ای که واماندگی اتفاق نیافتاده، فشار کل حدود ۲۰ تا ۲۵٪ بیشتر از حالتی است که فن بدون دیفیوزر است. شکل (۱۰)

مقایسه منحنی‌های توان مصرفی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن را در سرعت دورانی ۹۸۰ rpm نشان می‌دهد. توان مکانیکی فن‌ها با اندازه‌گیری توان الکتریکی و مشخص بودن راندمان مکانیکی موتور الکتریکی که برابر ۰/۹۵ (راندمان مکانیکی موتور الکتریکی توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود) است، به دست می‌آید. مطابق شکل فوق، قبل از اینکه واماندگی اتفاق بیافتد، دبی بیشتر از $59 \text{ m}^3/\text{s}$ ، تغییرات منحنی توان مصرفی فن، تقریباً ثابت بوده و پس از آن کاهش می‌یابد. مطابق شکل فوق، فن با دیفیوزر و بدون آن، دارای توان مصرفی نزدیک به هم می‌باشد. شکل (۱۱) منحنی $(P_t, Q)/P$ را برای فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن نشان می‌دهد. در رابطه فوق P توان مصرفی فن می‌باشد که در منحنی شکل (۱۰) نشان داده شده است.

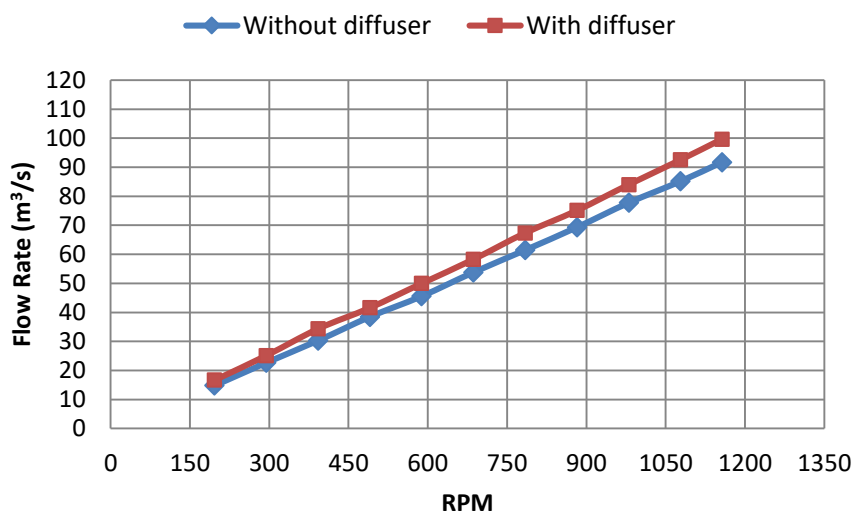
Q دبی جریان هوا و P_t فشار کل فن می‌باشد که در شکل (۹) تغییرات آن نشان داده شده است. مقدار فوق، برای فن‌های بدون دیفیوزر همان راندمان فن می‌باشد. روند تغییرات راندمان فن، مشابه فن‌های جریان محوری بوده، هنگامی که دبی جریان هوا کم است، راندمان فن کم می‌باشد. با افزایش دبی جریان هوا، راندمان فن نیز افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه خود رسیده و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین راندمان فن برای حالتی که دیفیوزر پایین دست آن قرار ندارد ۸۵٪ است. با قرار دادن دیفیوزر پایین دست فن، مقدار $\frac{P_t, Q}{P}$ افزایش یافته به طوری که در نزدیکی ناحیه واماندگی این مقدار حدود ۱۵٪ بیشتر بوده و با افزایش دبی جریان هوا این مقدار تا حدود ۳۵٪ افزایش می‌یابد. این بدان مفهوم است که هنگامی که از دیفیوزر در پایین دست فن استفاده می‌شود، برای توان الکتریکی ثابت، مقدار P_t, Q افزایش می‌یابد.



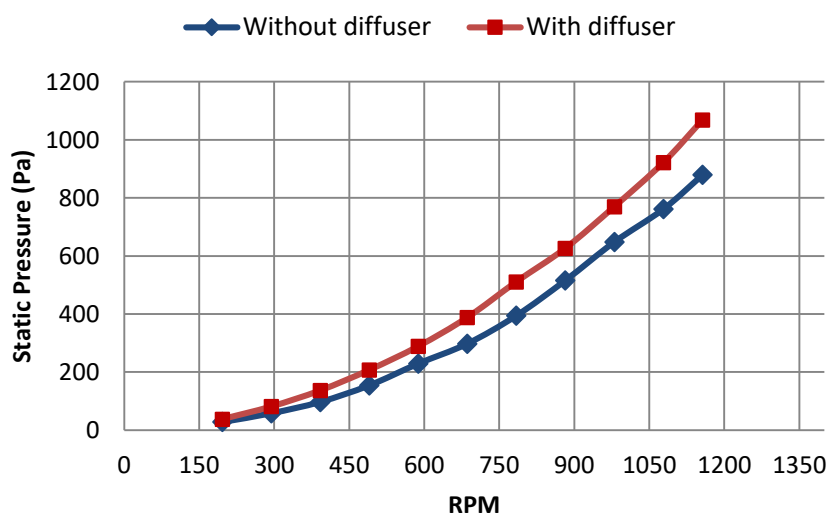
شکل ۱۱- مقایسه منحنی عملکرد $(P_t, Q)/P$ فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن در سرعت دورانی ۹۸۰ rpm

به منظور بررسی بهتر عملکرد فن با دیفیوزر و بدون آن، منحنی‌های دبی جریان هوا، فشار استاتیکی، توان مصرفی و بازدهی آن، برحسب سرعت دورانی به دست آورده شد. برای انجام آزمایش‌های فوق مخروط مکانیزم کنترل دبی جریان هوا را در موقعیت ثابتی قرار داده، با تغییر سرعت دورانی فن، منحنی‌های لازم به

دست می‌آید. با استفاده از این منحنی‌ها، می‌توان چگونگی کنترل دبی جریان هوا و در نتیجه کاهش تلفات انرژی را بررسی نمود. شکل (۱۲) منحنی‌های دبی جریان فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است، دبی جریان هوا با سرعت دورانی فن رابطه خطی داشته و هنگامی که از دیفیوزر استفاده می‌شود، در سرعت دورانی ثابت، دبی جریان هوا حدود ۸٪ تا ۱۰٪ بیشتر از حالتی است که از دیفیوزر استفاده نمی‌شود. با افزایش سرعت دورانی فن و یا به عبارت دیگر دبی جریان هوا، تأثیر دیفیوزر در پایین دست فن بیشتر می‌باشد.

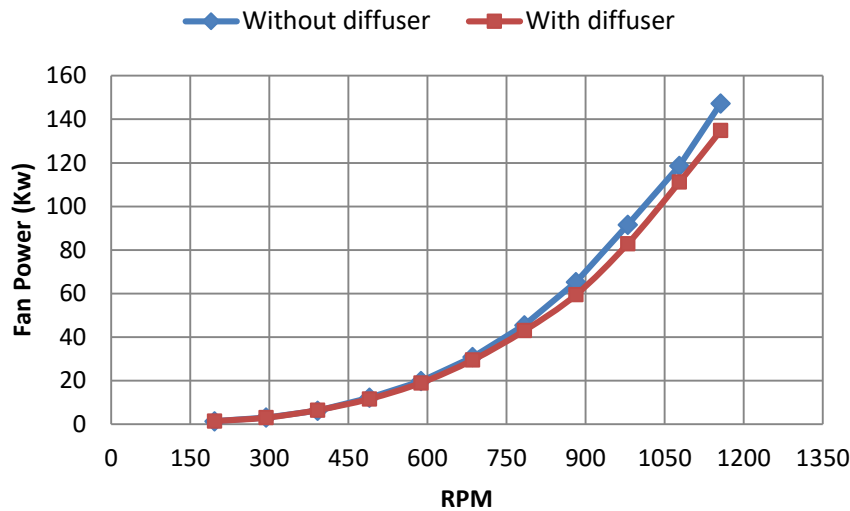


شکل ۱۲- مقایسه منحنی‌های دبی جریان فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن



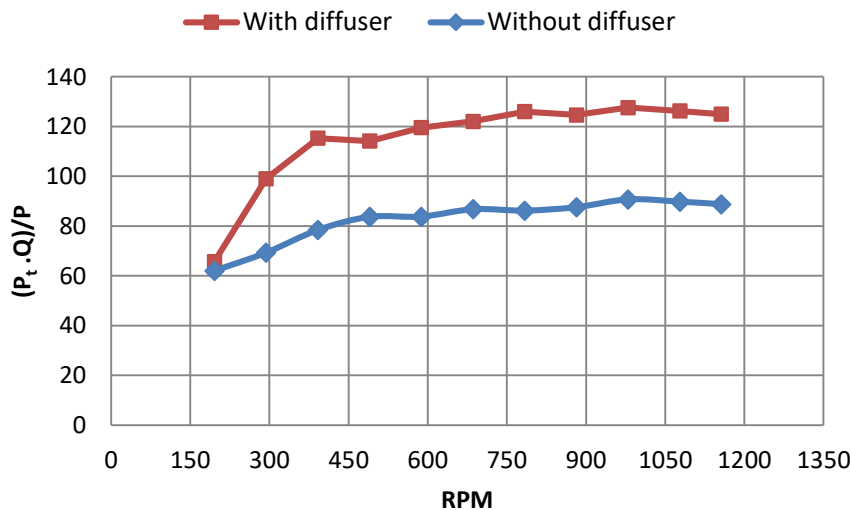
شکل ۱۳- مقایسه منحنی‌های فشار استاتیکی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن

شکل (۱۳) منحنی‌های فشار استاتیکی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن را برحسب دور فن نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت که فشار استاتیکی با دور فن رابطه توان دوم دارد که همان قانون فن‌ها می‌باشد [۱]. هنگامی که از دیفیوزر استفاده می‌شود، فشار استاتیکی فن بیشتر از حالتی است که از دیفیوزر استفاده نمی‌شود و فشار استاتیکی آن حدود ۲۵٪ بیشتر می‌باشد. شکل (۱۴) مقایسه توان مصرفی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن را بر حسب سرعت دورانی فن نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- مقایسه منحنی‌های توان مصرفی فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن

مطابق شکل فوق، توان مصرفی فن‌ها با سرعت دورانی فن، به صورت توان سوم رابطه داشته، لذا با قانون فن‌ها همخوانی دارد [۱].



شکل ۱۵- مقایسه منحنی‌های عملکرد $(P_t, Q)/P$ فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن

اختلاف توان مصرفی فن با دیفیوزر و بدون آن ناچیز است. مقایسه منحنی‌های عملکرد $(P_i, Q)/P$ فن‌های پره محوری با دیفیوزر و بدون آن بر حسب دور فن در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همانگونه که بیان شد، مقدار فوق برای فن، راندمان آن است. مطابق شکل فوق راندمان فن‌ها در سرعت‌های کمتر از ۴۰۰ rpm کم بوده و با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. هنگامی که از دیفیوزر استفاده می‌شود، مقدار $(P_i, Q)/P$ فن به همراه دیفیوزر افزایش می‌یابد. با توجه به بحث‌های انجام گرفته، مشخص شد که دیفیوزر تأثیر بسیار زیادی بر عملکرد فن داشته به طوری که فشار استاتیکی فن را حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪، دبی جریان هوا را حدود ۱۰٪ افزایش داده، در نتیجه راندمان سیستم را حدود ۳۰٪ الی ۳۵٪ افزایش می‌دهد.

به منظور بررسی تأثیر دیفیوزر بر منحنی‌های مشخصه فن، نیاز است که ضریب افت فشار دیفیوزر مورد استفاده، مشخص شود. همانگونه که بیان شد، با توجه به محدودیت‌های طرح تونل باد عمودی، دیفیوزر مطابق شکل (۶) انتخاب شد. ورودی این دیفیوزر دایروی شکل و خروجی آن نیز مربع شکل می‌باشد. دیفیوزر فوق دارای دو سری زاویه $8/78^\circ$ و $3/56^\circ$ می‌باشد. با استفاده از تونل باد از نوع مکنده، شکل (۷)، توزیع فشار استاتیکی در امتداد دیفیوزر فوق اندازه‌گیری شده و به صورت ضریب بازیافت فشار ارایه می‌شود. ضریب بازیافت فشار در دیفیوزر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_p = \frac{P - P_i}{\frac{1}{2} \rho U_i^2} \quad (5)$$

در رابطه فوق P_i و U_i فشار استاتیکی و سرعت متوسط جریان هوا در مقطع ورودی دیفیوزر بوده، P نیز چگالی جریان هوا می‌باشد. به منظور به دست آوردن افت فشار واقعی و یا به عبارت دیگر به دست آوردن فشار استاتیکی واقعی در رابطه (۵)، نیاز است که ضریب تصحیح انرژی جنبشی را با اندازه‌گیری توزیع سرعت در ورودی و خروجی دیفیوزر به دست آورد. ضریب تصحیح انرژی جنبشی سرعت از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \left(\frac{u}{U} \right)^3 dA \quad (6)$$

در رابطه فوق، u سرعت محلی و U سرعت متوسط جریان هوا در مقطع دیفیوزر است. با به کار بردن ضریب تصحیح انرژی جنبشی برای جریان غیر یکنواخت، افت فشار کل واقعی به صورت زیر بیان می‌شود:

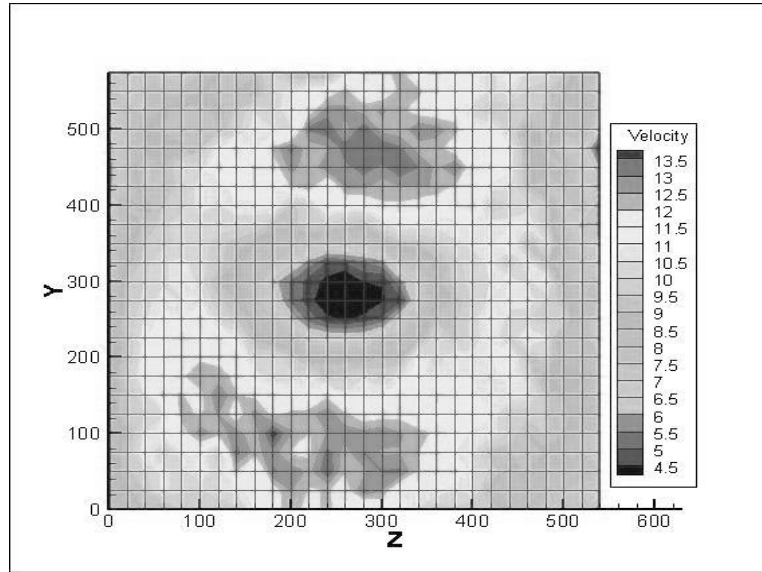
$$\Delta P_{Total} = (P_{s1} - P_{s2}) + \frac{1}{2} \rho (\alpha_1 U_1^2 - \alpha_2 U_2^2) \quad (7)$$

در رابطه فوق P_{s1} و P_{s2} فشار استاتیکی، U_1 و U_2 سرعت متوسط جریان هوا، به ترتیب در مقاطع ۱ و ۲ می‌باشند. لذا به منظور به دست آوردن فشار استاتیکی واقعی، نیاز است که غیر یکنواختی جریان هوا را به دست آورد. شکل (۱۶) توزیع دو بعدی سرعت در دهانه خروجی دیفیوزر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۶)، ضریب تصحیح انرژی جنبشی $1/117$ به دست می‌آید. با توجه به ضریب تصحیح انرژی به دست آمده، فشار استاتیکی اصلاح و توزیع ضریب بازیافت فشار در دیفیوزر فوق در شکل (۱۷) نشان داده می‌شود. با توجه به شکل فوق، مشخص می‌شود که جدایش اتفاق نیافتاده است. اختلاف ضریب بازیافت فشار دیفیوزر با

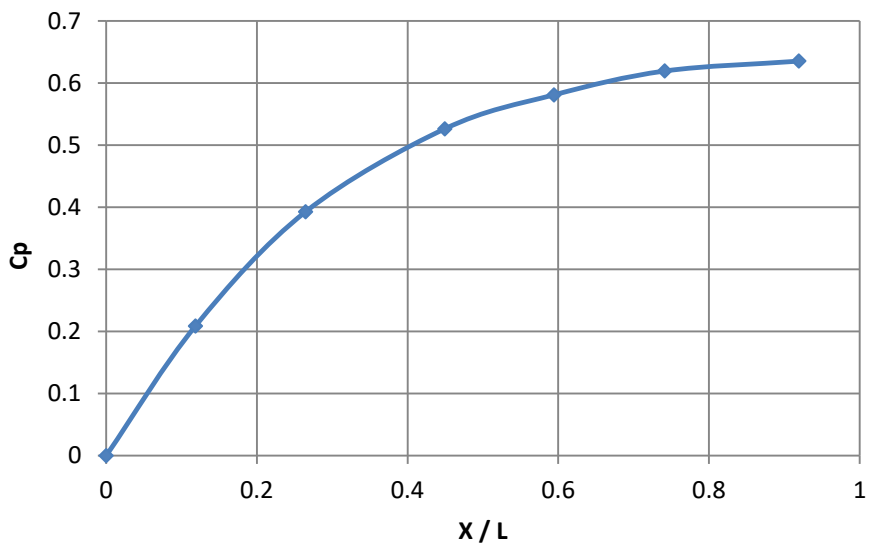
ضریب بازیافت فشار دیفیوزر در حالت ایده‌آل (برنولی) ضریب تلفات دیفیوزر می‌باشد، که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$k_d = Cp_i - Cp = 1 - \frac{A_i^2}{A_o^2} - Cp \quad (۸)$$

در رابطه فوق Cp_i ضریب بازیافت فشار در حالت ایده‌آل، A_i سطح مقطع ورودی دیفیوزر، A_o سطح مقطع خروجی دیفیوزر می‌باشد.

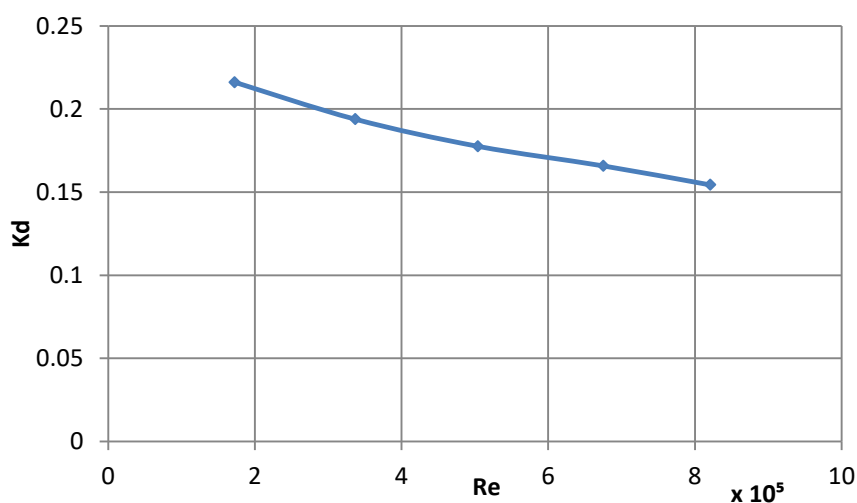


شکل ۱۶- توزیع دو بعدی سرعت در دهانه خروجی دیفیوزر هنگامی که سرعت ورودی دیفیوزر برابر ۲۵ m/s



شکل ۱۷- توزیع ضریب بازیافت فشار در امتداد دیفیوزر هنگامی که سرعت ورودی دیفیوزر برابر ۲۵ m/s

با توجه به شکل (۱۷) و رابطه (۴) ضریب افت فشار برای دیفیوزر فوق بر حسب عدد رینولدز به دست آمده و در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۸- ضریب افت فشار دیفیوزر بر حسب عدد رینولدز

با توجه به شکل فوق ضریب افت فشار برای دیفیوزر فوق تابعی از عدد رینولدز بوده، که با افزایش عدد رینولدز مقدار آن کاهش می‌یابد. مقدار ضریب افت فشار در عدد رینولدز 8×10^5 برابر 0.15 می‌باشد. هنگامی که فن فاقد دیفیوزر می‌باشد، افت فشار ناشی از تخلیه جریان هوا، همان فشار دینامیکی در خروجی فن می‌باشد و یا به عبارت دیگر $0.5 \rho \cdot Q^2 / A_f^2$ است که Q دبی جریان هوا و A_f سطح مقطع خروجی فن می‌باشد. هنگامی که فن دارای دیفیوزر می‌باشد، افت فشار شامل دو قسمت، افت فشار ناشی از تخلیه جریان هوا $0.5 \rho \cdot Q^2 / A_d^2$ و افت فشار ناشی از تلفات دیفیوزر $0.5 k_d \rho \cdot Q^2 / A_f^2$ می‌باشد، A_d سطح مقطع خروجی دیفیوزر و k_d نیز ضریب افت فشار دیفیوزر است. با توجه به شکل (۶) که $A_d = 2A_f$ بوده و همچنین $k_d = 0.15$ ، لذا اختلاف افت فشار در حالت‌هایی که فن بدون دیفیوزر و یا با دیفیوزر می‌باشد، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta P = 0.5 \rho \frac{Q^2}{A_f^2} - 0.075 \rho \frac{Q^2}{A_f^2} - 0.5 \rho \frac{Q^2}{(2A_f)^2} = 0.3 \rho \frac{Q^2}{A_f^2} \quad (9)$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان اختلاف فشار استاتیکی ایجاد شده درحالی که فن دارای دیفیوزر بوده و یا بدون آن، مشخص می‌شود. این اختلاف فشار بستگی به دبی و سطح مقطع خروجی فن و دیفیوزر دارد. هنگامی که دبی جریان هوا برابر $60 \text{ m}^3/\text{s}$ است، این اختلاف فشار حدود 175 پاسکال و برای دبی جریان هوا برابر $75 \text{ m}^3/\text{s}$ ، این اختلاف حدود 270 پاسکال است. این مقدار هم‌خوانی مناسبی با شکل (۸) داشته و شکل (۹) نیز اختلاف فوق را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه سرعت خروجی از سیستم، هنگامی که فن در بالادست دیفیوزر قرار دارد، کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن اندازه حرکت جریان هوای خروجی، لذا ضربه و یا نیروی اعمالی بر سیستم نیز کاهش می‌یابد. این کاهش نیرو و یا ضربه برای تونل بادهای عمودی از نوع مکند که

فن‌ها بر روی سازه فلزی نصب شده‌اند، بسیار با اهمیت می‌باشد. همچنین نصب دیفیوزر پس از فن، سبب کاهش نویز و صدای جریان هوا می‌شود. طبق مرجع [۳]، نویز ناشی از جریان هوای خروجی متناسب با توان ششم سرعت جریان هوا می‌باشد. لذا هنگامی که از دیفیوزر استفاده می‌شود مقدار نویز به ۰/۰۱۵ کاهش می‌یابد.

جمع بندی

همانگونه که بیان شد، در سیستم‌های سیالاتی که جریان هوا به اتمسفر تخلیه می‌شود، نظیر تونل بادهای مکنده، انرژی زیادی ناشی از تخلیه جریان هوا تلف می‌شود. با استفاده از دیفیوزر می‌توان این تلفات را کاهش داد. با بررسی نتایج تحقیقات انجام گرفته، می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

- هنگامی که فن فاقد دیفیوزر است، افت فشار تخلیه فن، همان فشار دینامیکی خروجی از فن می‌باشد، که با توان دوم دبی جریان هوا رابطه مستقیم دارد. در صورتی که از دیفیوزر استفاده شود، افت فشار شامل دو قسمت افت فشار تخلیه از دیفیوزر و افت فشار ناشی از تلفات دیفیوزر است. لذا طراحی دیفیوزر از اهمیت خاصی برخوردار بوده و نباید در آن جدایش اتفاق بیافتد. هرچقدر سطح مقطع خروجی به ورودی آن بزرگ‌تر باشد، و از جدایش نیز جلوگیری شود، مناسب‌تر است.
- با توجه به طرح تونل باد عمودی، دیفیوزر مورد استفاده دارای ورودی دایروی شکل و خروجی مربع شکل است، که دارای دو سری زاویه $8/78^\circ$ و $3/56^\circ$ می‌باشد و نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی آن نیز ۲ است. این دیفیوزر پایین دست فن به قطر ۱/۸ متر قرار می‌گیرد. نتایج تحقیقات تجربی بر روی مدل این دیفیوزر نشان می‌دهد که پدیده جدایش در آن اتفاق نیافتاده و ضریب افت فشار دیفیوزر فوق نیز ۰/۱۵ به دست آمده است.
- روند منحنی‌های مشخصه فن نظیر منحنی فشار استاتیکی - دبی، برای حالت‌هایی که فن دارای دیفیوزر بوده و یا بدون آن، مشابه است. دبی نقطه واماندگی در حالت‌های مختلف تغییر نکرده، ولی فشار استاتیکی آن افزایش یافته است. لذا احتمال وقوع واماندگی کمتر شده و حاشیه اطمینان استفاده از فن را در سیستم‌های سیالاتی افزایش می‌دهد.
- هنگامی که دیفیوزر فوق که نسبت سطوح خروجی به ورودی آن ۲ می‌باشد، در پایین دست فن استفاده می‌شود، دبی جریان هوا حدود ۱۰٪ افزایش و فشار استاتیکی نیز حدود ۲۵٪ افزایش می‌یابد. توان مصرفی فن نیز تغییر قابل توجهی نداشته و در نتیجه عملکرد فن با دیفیوزر حدود ۳۵٪ بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه سرعت هوای خروجی از سیستم، هنگامی که در پایین دست فن دیفیوزر قرار دارد، به حدود نصف کاهش می‌یابد، نیروی اعمالی بر سیستم نیز نصف می‌شود، که این موضوع در تونل بادهای عمودی از نوع مکنده از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین صدای ناشی از جریان هوای خروجی به ۰/۰۱۵ کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Frank, P., and Bleier, P. E., "*Fan handbook*", (Selection, Applications and Design), MC.Graw-Hill, (1997).
- [2] Barlow, J. B., Rae, W. H., and Pope, A., "*Low Speed Wind Tunnel Testing*", John Wiley & Sons, Inc, (1999).
- [3] Malcolm, J. Rucker., "*Handbook of Noise and Vibration Control*", John Wiley & Sons, Inc. New York, (2007).
- [۴] اردکانی، محمد علی؛ "تونل باد با سرعت پایین (اصول طراحی و کاربرد)"؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۸).
- [5] Eckert, T., Mort W., and Jope, J., "Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance", Washington DC, National Aeronautics and Space Administration, NT D-8243; (1976).
- [۶] اردکانی، محمد علی، پرینچی، سیدمرتضی، "مطالعه تجربی جریان هوا در یک دیفیوزر با مقطع ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی در حالت های دمنده و مکند"، مجله مدرس، (۱۳۹۱).
- [۷] اردکانی، محمد علی، پرینچی، سیدمرتضی، "بررسی تجربی توزیع سرعت جریان هوا و اغتشاش های آن در یک دیفیوزر با مقطع ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی"، نشریه علمی و پژوهشی هوانوردی، (۱۳۹۲).
- [8] Moore, C.A., and Kline, S.J., "Some Effects of Vanes and of Turbulence in Two Dimensional Wide-angle Subsonic Diffusers, " NACA TN 4080, Washington, (1958).
- [9] Senoo, Y., and Nishi, M., "Improvement of the Performance of the Conical Diffusers by Vortex Generators", New York, the American Society of Mechanical Engineers, No.73, pp. 4-10, (1974).
- [۱۰] ربیعی، علیرضا، قدک فرهاد، حقیری، عبدالعلی، "تحلیل تجربی تأثیر یک تولیدکننده گردابه بر عملکرد یک دیفیوزر مخروطی مادون صوت"، نشریه مکانیک و هوافضا، جلد ۴، بهار (۱۳۸۷).
- [11] Furuya, Y., Sato, T., and Kushada, T., "The Loss of Flow in the Conical Diffusers with Suction at the Entrance ", Bulletin of JSME, Vol. 9, No. 33, pp. 532-556, (1966).
- [12] AMCA Standard 210-99: "Laboratory Method of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating", AMCA, (1999).
- [13] ISO 5801, " Industrial Fans-performance Testing using Standardized Airways", (1997).

[۱۴] اردکانی، محمد علی؛ "جریان سنج سیم داغ"؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۵).

[15] Dixon, S.L., "*Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery*", 5th ed., British Library Cataloguing in Publication Dat, (2005).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A_d : سطح مقطع خروجی دیفیوزر
 A_f : سطح مقطع خروجی فن
 A_i : سطح مقطع ورودی دیفیوزر
 A_o : سطح مقطع خروجی دیفیوزر
 C_p : ضریب بازیافت فشار
 C_{p_i} : ضریب بازیافت فشار در حالت ایده‌آل
 D_3 : قطر کانال بستر آزمون فن
 k : ضریب افت فشار
 k_d : ضریب افت فشار دیفیوزر
 N : طول دیفیوزر
 L : طول کانال بستر آزمون
 P : توان مصرفی فن
 P_s : فشار استاتیکی
 P_t : فشار کل فن
 Q : دبی جریان هوا
 U_i : سرعت متوسط جریان هوا در مقطع ورودی دیفیوزر
 u : سرعت محلی
 W_1 : عرض دیفیوزر
 ρ : چگالی جریان هوا

Abstract

Axial flow fans, in open circuit suction wind tunnels, discharge air into the ambient. This discharge of air causes large energy dissipation, proportional to the third power of air flow velocity. In order to reduce this energy wastage, a diffuser at the fan downstream can be used. Consequently, it becomes necessary to determine the effect of diffuser on the fan's performance. In this experimental investigation, a fan test bed has been constructed on the basis of ISO 5801 Standard, and the fan's characteristic curve has been measured with and without the diffuser. In addition, a 7.8% model of the diffuser has been evaluated and pressure distribution along the diffuser and velocity distribution at the diffuser exit have been measured using a wind tunnel. Results show that separation phenomenon does not occur in the diffuser. For a diffuser, with an exit to inlet cross section area ratio of 2:1, installed at the fan's downstream, air flow rate and static pressure show 10% and 25% increase, respectively. The fan's power consumption does not show appreciable variation, and hence, fan's performance, with the diffuser installed, shows a 35% improvement.