

مطالعه تجربی جریان هوا در یک دیفیوزر با مقطع ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی در حالت‌های دمنده و مکند

محمدعلی اردکانی^{۱*}، سید مرتضی پرپنچی^۲

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* تهران، صندوق پستی ۳۳۱۶۵-۱۱۵، ardekani@irost.org

چکیده- طرح تونل باد عمودی، که برای عملیات سقوط آزاد طراحی شده است، دارای دیفیوزر به شکل ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی می‌باشد. لذا زاویه صفحه‌های دیفیوزر فوق متقارن نبوده و دارای زاویه‌های ۳/۴۳ و ۱۰/۶۶ درجه می‌باشد. پیش‌بینی افت فشار و همچنین بررسی جدایش جریان هوا در این دیفیوزر برای طراحی تونل باد از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق مدل ۷/۸ درصد دیفیوزر اصلی ساخته شده و جریان هوا در دیفیوزر فوق در حالت‌های دمنده و مکند با استفاده از فشارسنج‌های الکترونیکی مورد بررسی قرار گرفته است. افت فشار دیفیوزر فوق اندازه‌گیری شده و با نتایج افت فشار دیفیوزر دایره به مربع، که نزدیک به دیفیوزر مورد آزمایش است، مقایسه شده است. برای پیش‌بینی افت فشار دیفیوزر فوق، باید زاویه صفحه بزرگ‌تر را در معادلات نیمه‌تجربی استفاده نمود و استفاده از زاویه معادل دیفیوزر مناسب نیست. همچنین، با بررسی ضریب بازیافت فشار، مشخص شد که جدایش قابل توجهی در دیفیوزر فوق اتفاق نیفتاده است. **کلیدواژه‌ها:** دیفیوزر، توزیع فشار استاتیکی، توزیع سرعت، افت فشار

Experimental investigation of airflow in an octagonal to square diffuser in blower and suction modes

M. A. Ardekani^{1*}, S. M. Parpanchi²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Iranian Organization for Science and Tech. (IROST), Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Islamic Azad Univ. South Tehran Branch, Tehran), Iran

* P. O. B. 33165-115 Tehran, ardekani@irost.org

Abstract- The vertical wind tunnel, which has been designed for sky-diving operations, consists of an octagonal to square diffuser. The diffuser configuration indicates that the wall angles in the diffuser are not symmetrical: the smaller and larger angles being 3.43 and 10.66 degrees, respectively. Estimation of pressure drop and study of flow separation in the diffuser is of great importance for the design of the vertical wind tunnel. In this research work, a 7.8 % model of the original diffuser has been constructed, and airflow, in both blower and suction modes, has been studied in the diffuser using electronic pressure gauges. Pressure drop in the test diffuser has been measured and compared with pressure drop in a circular to square diffuser, which is installed in the vicinity of the test diffuser. To estimate the pressure drop in the test diffuser, the larger diffuser angle from the above, namely 10.66 degrees should be used in the semi-empirical equations, and use of the equivalent diffuser angle is not recommended. In addition, study of the pressure recovery coefficient showed no significant flow separation in the tested diffuser.

Keywords: Diffuser, Static Pressure Distribution, Velocity Distribution, Pressure Drop

۱- مقدمه

دیفیوزر یکی از اجزای مهم سیستم‌های سیالاتی از جمله تونل باد می‌باشد. وظیفه اصلی دیفیوزر کاهش فشار دینامیکی و تبدیل آن به فشار استاتیکی و در نتیجه کاهش تلفات جریان هوا در پایین‌دست دیفیوزر می‌باشد. در تونل باد نیز برای کاهش تلفات جریان از دیفیوزر استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تلفات جریان هوا متناسب با مجذور سرعت می‌باشد، از این رو استفاده از دیفیوزر سرعت جریان هوا را کاهش داده و در نتیجه تلفات آن را نیز کاهش می‌دهد. 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. تخمین و تعیین افت فشار و یا تلفات در دیفیوزر (مشخص نمودن روابط نیمه تجربی برای تعیین افت فشار)، بررسی جدایش جریان در دیفیوزر و همچنین چگونگی کاهش جدایش جریان در دیفیوزر از بحث‌های حائز اهمیت در این موضوع می‌باشد.

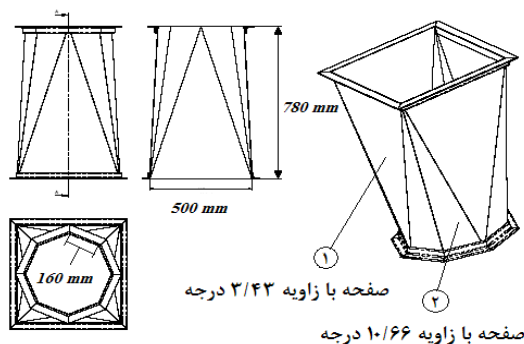
تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه دیفیوزر توسط محققان مختلف انجام گرفته است. اکرت و همکاران [۱] طراحی آیرودینامیکی و پیش‌بینی افت اجزای یک تونل باد مادون صوت را بررسی نموده و روابطی را برای به‌دست آوردن ضریب افت فشار در دیفیوزرهایی با شکل ورودی و خروجی مربعی، دایروی و مستطیلی و یا ترکیبی از این‌ها ارائه کردند. معادلات نیمه تجربی به‌دست آمده توسط آن‌ها در روابط (۵)، (۶) و (۷) ارائه شده است. ون دن هف و تروین [۲] برای بررسی جدایش جریان روش ضریب شکل را ارائه کردند. بدین صورت، هنگامی که جریان لایه مرزی از نوع آرام می‌باشد، مقدار ضریب شکل H برای شروع جدایش جریان برابر $3/5$ است و هنگامی که جریان لایه مرزی از نوع مغشوش می‌باشد، مقدار فوق برای شروع جدایش برابر $2/4$ است. از طرفی سنبرن و کلاین [۳] نشان دادند که معیار جدایش بر اساس دو پارامتر است؛ یکی ضریب شکل H و دیگری پارامتر گرادیان فشار که هریک از این معیارها محل نقطه جدایش را برای جریان‌های خارجی، تقریباً با صحت یکسانی، پیش‌بینی می‌کند. رنیو و همکاران [۴] تحقیقات گسترده‌ای بر روی دیفیوزرهای دوبعدی و مستقیم به صورت تجربی انجام دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اگر نسبت طول دیفیوزر به عرض ورودی آن ثابت نگه داشته

شود و بتوان تا حدودی از اغتشاشات جریان در ورودی چشم‌پوشی کرد، مطابق با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر، چهار رژیم جریان به ترتیب زیر ظاهر می‌شوند: رژیم جریان وامانده نامحسوس که در آن یک جریان لزج پایدار داریم و جدایش جریان در آن وجود ندارد؛ رژیم وامانده گذرا که در آن به غیر از یک لایه مرزی جدا شده بقیه به طور پیوسته باقی می‌ماند؛ رژیم وامانده کاملاً توسعه یافته که لایه مرزی در رژیم قبلی توسعه یافته و تبدیل به یک ناحیه گردابه‌ای بزرگ شده است. در این ناحیه ممکن است الگوی واماندگی از یک دیواره به دیواره دیگر منتقل شود؛ رژیم جریان جت که در آن جدایش از روی دیواره‌ها فراگیر می‌شود و جریان اصلی از روی دیواره‌ها کاملاً جدا می‌شود. در این ناحیه کاهش عملکرد دیفیوزر به حداکثر میزان خود می‌رسد. ویتمن و همکاران [۵] اثرات ضخامت لایه مرزی جریان در ورودی دیفیوزرهای دوبعدی با دیواره‌های تخت را بررسی کردند و متوجه شدند که افزایش ضخامت لایه مرزی اثراتی را روی رژیم‌های جریان می‌گذارد و سبب کاهش عملکرد دیفیوزرها می‌شود. کاکرن و کلاین [۶] از پره‌های تخت کوتاه برای به‌تاخیر انداختن نقطه جدایش جریان در دیفیوزرهای مادون صوت دوبعدی با زاویه باز استفاده کردند که با این کار توانستند عملکرد دیفیوزر را تا حدودی افزایش دهند. فوریه و همکاران [۷] از مکش لایه مرزی در ورودی دیفیوزر به عنوان روشی برای جلوگیری از جدایش جریان استفاده کردند. آزمایش‌های آن‌ها برای دیفیوزرهای مخروطی با زاویه واگرایی ۱۰ تا ۶۰ درجه و با نسبت سطح خروجی به ورودی ۴ انجام شد. نتایج نشان داد که ضریب افت فشار تا مقدار $0/2$ برای تمام زوایای واگرایی، وقتی که نرخ کمیت مکش تا ۲ درصد است، کاهش می‌یابد. راثو و راجو [۸] از صفحه‌های جداکننده برای کنترل جریان در دیفیوزرهای مخروطی با زاویه واگرایی ۳۸ درجه و نسبت سطح ۱۵ استفاده کردند. این صفحه‌ها سبب شده جریان هوا در دیفیوزر به چند قسمت تقسیم شده و زاویه دیفیوزر کاهش یابد و در نتیجه جریان هوا در خروجی دیفیوزر یکنواخت شود. بنابراین، برای یک جداکننده با موقعیت و شکل بهینه شده، افت فشار اندازه‌گیری شده نشان داد که عملکرد نزدیک به ۵۰ درصد، برای دیفیوزر مدل آزمایش شده با زاویه واگرایی ۳۸ درجه و نسبت سطح ۱۵، قابل دسترس است. سنو و همکاران [۹] توانستند، با استفاده از تیغه‌هایی که

حالت‌های دمنده و مکنده بررسی می‌شود. همچنین، نتایج مربوط به افت فشار دیفیوزر ۸ ضلعی به ۴ ضلعی در حالت‌های فوق ارائه شده و با روابط نیمه‌تجربی به‌دست آمده برای دیفیوزرهای دایره به مربع مقایسه شده است. نتایج مربوط به پدیده جدایش نیز در این دیفیوزر ارائه شده است.

۲- روش آزمایش

آزمایش‌های مورد نظر در آزمایشگاه مستقر در سایت تونل باد عمودی انجام گرفته است. ابعاد دیفیوزر مدل ۷/۸ درصد ابعاد دیفیوزر واقعی می‌باشد. مطابق شکل ۱ ورودی دیفیوزر به شکل ۸ ضلعی بوده و هر ضلع آن ۱۶۰ میلی‌متر است و خروجی آن به شکل مربع به ضلع ۵۰۰ میلی‌متر است. طول دیفیوزر ۷۸۰ میلی‌متر بوده که نسبت سطح خروجی به ورودی آن ۲/۰۲ می‌باشد. جریان هوا در این دیفیوزر در حالت‌های دمنده و مکنده مورد آزمایش قرار گرفته است.



شکل ۱ مدل ۷/۸ درصدی دیفیوزر اصلی

با توجه به شکل فوق، می‌توان دریافت که صفحه‌های دیفیوزر دارای دو نوع زاویه متفاوت می‌باشد که زاویه کوچک‌تر آن ۳/۴۳ درجه و زاویه بزرگ‌تر آن ۱۰/۶۶ درجه است. با توجه به زاویه‌های فوق در صورتی که ورودی دیفیوزر دایروی و خروجی آن مربع در نظر گرفته شوند، زاویه معادل برابر ۵/۷۹ درجه خواهد بود.

شکل ۲ تونل باد مدار باز دمنده را نشان می‌دهد که با استفاده از آن دیفیوزر در حالت دمنده مورد آزمایش قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تونل باد فوق دارای یک فن سانتریفیوژ بوده که با استفاده از کنترل دور،

در جریان تولید گردابه می‌کنند، کارایی دیفیوزر را افزایش دهند. آزمایش‌های آن‌ها برای دیفیوزرهایی با زاویه واگرایی ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۳۰ درجه و با نسبت سطح ۴ انجام شد. نتایج نشان داد که این تیغه‌های تولیدکننده گردابه از جدایش جریان تا زاویه واگرایی ۱۶ درجه جلوگیری می‌کنند و ضریب بازیافت فشار در این حالت به اندازه ضریب بازیافت فشار دیفیوزر ۸ درجه است. همچنین این تیغه‌ها به شکل موفقیت‌آمیزی در دیواره واگرای یک تونل باد، جهت جلوگیری از جدایش جریان، توسط تیلور [۱۰] استفاده شدند. مچا [۱۱] عملکرد و طراحی اجزای تونل بادهای دمنده با دیفیوزرهای زاویه باز را بررسی نمود. دیفیوزر زاویه باز قبل از اتاق آرامش قرار گرفته و با توجه به زاویه واگرایی آن جدایش جریان در آن اتفاق می‌افتد. لذا برای کاهش جدایش جریان در دیفیوزر زاویه باز از توری استفاده شد. تعداد توری و نوع آن با توجه به زاویه واگرایی دیفیوزر و نسبت سطح خروجی به ورودی مشخص گردید.

تحقیقات انجام‌گرفته نشان می‌دهند که اگر دیفیوزر به صورت مخروطی شکل با زاویه رأس مخروط ۵ درجه و با نسبت سطح خروجی به ورودی ۲ الی ۲/۵ طراحی شود، کمترین تلفات را خواهد داشت [۱۲]. با توجه به این که شرایط همواره در اختیار طراح نبوده و در بسیاری از موارد دیفیوزر به شکل‌های مختلف و سطوح غیردایروی و با زاویه‌های غیربهبهینه طراحی می‌شود، در نتیجه افت فشار دیفیوزر مورد طراحی با دیفیوزر طراحی‌شده در حالت بهینه تفاوت خواهد داشت.

در مراحل تونل باد عمودی، مقتضیات طراحی، از لحاظ اقتصادی و مباحث مربوط به ساخت، شرایطی را برای طراح ایجاد نمود که دیفیوزر پس از محوطه پرواز را به صورت ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی طراحی نماید. لذا دیفیوزر فوق دارای دو سری صفحه با زاویه‌های مختلف ۳/۴۳ و ۱۰/۶۶ درجه است. همان‌گونه که بیان شد، تحقیقات وسیعی در مورد دیفیوزرها انجام گرفته است، ولیکن اطلاعات مربوط به افت فشار چنین دیفیوزر خاصی وجود ندارد. همچنین جدایش جریان، که یکی از مهم‌ترین پدیده‌های حائز اهمیت در تونل باد است، نیز در چنین دیفیوزری نامشخص است؛ بنابراین نیاز است که تحقیقات لازم در این زمینه انجام شود.

در این تحقیق، که به صورت تجربی است، مدل ۷/۸ درصدی تونل باد واقعی ساخته شده و جریان هوا در آن در

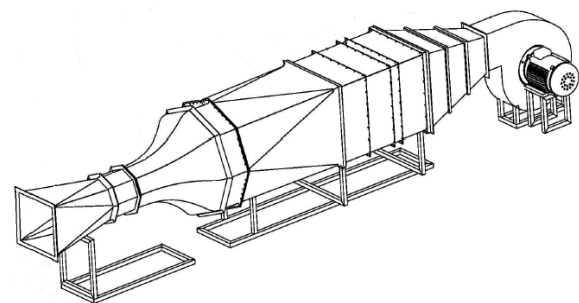
مطابق شکل ۴، با استفاده از سوراخ‌های فشار که بر روی بدنه دیفیوزر نصب شده است، می‌توان فشار استاتیک دیفیوزر را اندازه‌گیری نمود. فشار استاتیک در سوراخ‌های دیفیوزر با استفاده از شلنگ‌هایی به فشارسنج الکترونیک ۳۰ کاناله متصل شده و خروجی فشارسنج از طریق کارت A/D ۱۶ بیتی به رایانه ارسال می‌شود. داده‌های ارسال‌شده به رایانه توسط نرم‌افزار نوشته‌شده به مقادیر فشار تبدیل شده و توزیع فشار استاتیک بر روی دیفیوزر به‌دست می‌آید. فاصله سوراخ‌ها بر روی بدنه دیفیوزر ۳ سانتی‌متر می‌باشد. فشارسنج مورد استفاده از نوع دیفرانسیلی مربوط به شرکت هانیول^۱ بوده و بازه عملکرد فشارسنج فوق ۱۲۵۰ پاسکال و دقت اندازه‌گیری آن ۰/۲۵ درصد نسبت به خط راست می‌باشد. لذا دقت اندازه‌گیری در فشار ۱۲۵۰ پاسکال معادل ۳/۱ پاسکال و برای فشار ۵۰۰ پاسکال این مقدار ۱/۲۵ پاسکال خواهد بود. همچنین، خطای کلی که ناشی از تاثیر دما، هیستریزیس^۲ سنسور، غیرخطی بودن سنسور، کالیبراسیون نقطه صفر و غیره است حدود ۱ درصد فشار اندازه‌گیری می‌باشد. تغییرات فشار در دیفیوزر بستگی به سرعت جریان هوا داشته و این مقدار برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه حدود ۱۶۵ پاسکال و برای سرعت‌های ۲۰، ۱۵ و ۱۰ متر بر ثانیه به‌ترتیب برابر ۹۵، ۵۵ و ۲۵ پاسکال است. بنابراین، با استفاده از فشارسنج فوق برای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه دقت اندازه‌گیری حدود ۱ پاسکال می‌باشد. همچنین، با توجه به این که A/D مورد استفاده ۱۶ بیتی می‌باشد، خطای ناشی از گردشدن توسط A/D قابل صرف‌نظر است.



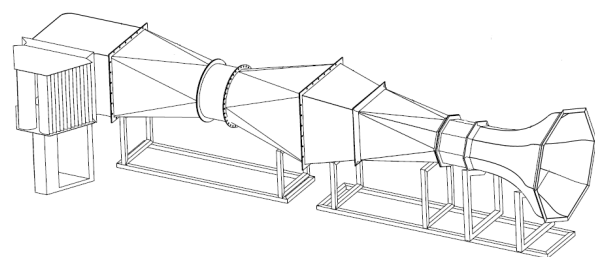
شکل ۴ اتصال شلنگ‌ها به سوراخ‌های فشار در دیفیوزر

سرعت دورانی فن آن کنترل شده و در نتیجه سرعت جریان هوا در آن تنظیم می‌شود. تونل باد فوق دارای یک عدد دیفیوزر زاویه باز و اتاق آرامش می‌باشد. به منظور جلوگیری از جدایش جریان در دیفیوزر زاویه باز، در آن دو عدد توری تعبیه‌شده و همچنین در اتاق آرامش آن، علاوه بر لانه زنبوری، دو عدد توری دیگر نیز جهت کاهش شدت اغتشاشات و یکنواخت نمودن جریان هوا در آن قرار داده شده است. پس از اتاق آرامش، مبدل ۴ ضلعی به ۸ ضلعی قرار داشته و پس از آن، نازل ۸ ضلعی مشابه نازل تونل باد عمودی و پس از نازل، اتاق آزمون و پس از آن، دیفیوزر مورد آزمایش قرار گرفته است.

شکل ۳ تونل باد مدار باز مکنده را نشان می‌دهد که با استفاده از آن دیفیوزر در حالتی که جریان هوا مکنده است مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این تونل باد مشابه تونل باد عمودی بوده که ابعاد آن ۷/۸ درصد تونل باد واقعی می‌باشد.



شکل ۲ تونل باد مدار باز دمنده



شکل ۳ تونل باد مدار باز مکنده

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تونل باد فوق دارای یک فن جریان محوری است و اجزای آن شامل نازل، اتاق آزمون، دیفیوزر اول، دیفیوزر دوم، مبدل بین دیفیوزر دوم و فن، دیفیوزر سوم، گوشه و خروجی مثلی شکل است که با استفاده از کنترل دور، سرعت دورانی فن جریان محوری را کنترل نموده و در نتیجه سرعت جریان هوا را می‌توان تنظیم نمود.

1. Honeywell
2. Hysteresis

$$P_s = P_{s|Bernouli} - K_d \times \left(\frac{1}{2} \rho U_1^2 \right) \quad (1)$$

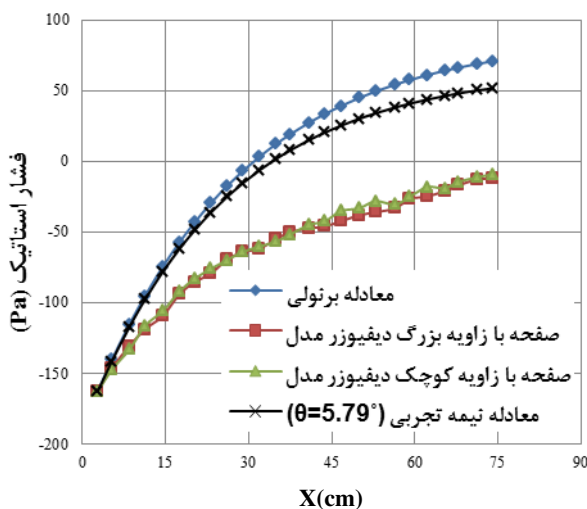
K_d در رابطه فوق ضریب افت فشار در دیفیوزر است. این ضریب طبق رابطه (۲) به صورت مجموع ضریب افت اصطکاکی و ضریب افت انبساطی نوشته می‌شود که ضریب افت اصطکاکی طبق رابطه (۳) و ضریب افت انبساطی طبق رابطه (۴) به‌دست می‌آیند [۱۴].

$$K_d = K_f + K_{ex} \quad (2)$$

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2} \right) \frac{f}{8 \sin \theta} \quad (3)$$

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2 \quad (4)$$

ضریب $K_e(\theta)$ در رابطه (۴) به طور قابل توجهی به شکل سطح مقطع دیفیوزر بستگی دارد که بر اساس داده‌های تجربی توسط اکرت [۱] برای سطح مقطع‌های مختلف به‌دست آمده است که در روابط (۵) و (۶) و (۷) به‌ترتیب برای دایره، مربع و دایره به مربع بیان شده است.



شکل ۵ توزیع فشار استاتیک در امتداد دیفیوزر در حالت دمنده برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه

$$\begin{cases} 0.1033 - 0.02389 \theta & \text{for } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1709 - 0.1170 \theta + 0.0326 \theta^2 + 0.001078 \theta^3 \\ - 0.0009076 \theta^4 - 0.0000133 \theta^5 + 0.00001345 \theta^6 & \text{for } 1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ - 0.09661 + 0.04672 \theta & \text{for } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (5)$$

باتوجه به اینکه اثر غیریکنواختی بر روی افت فشار تاثیرگذار است و نیز احتمال دارد جریان در دیفیوزر غیریکنواخت باشد، بنابراین نیاز است که غیریکنواختی جریان هوا در دیفیوزر فوق بررسی شود. بدین منظور توزیع سرعت جریان هوا با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. پراب جریان‌سنج سیم داغ از نوع یک‌بعدی بوده و سنسور آن از نوع تنگستن ۵ میکرونی می‌باشد و داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله جریان‌سنج سیم داغ از طریق کارت ۱۶ A/D بیتی به رایانه ارسال شده و توسط نرم‌افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. به منظور جابه‌جایی پراب برای اندازه‌گیری توزیع جریان هوا از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت ۰/۱ میلی‌متر در جهت محورهای مختصات می‌باشد که با استفاده از رایانه حرکت آن کنترل می‌شود. جزئیات بیشتر در مورد جریان‌سنج سیم داغ و نحوه کار با آن در مرجع [۱۳] ارائه شده است. دیفیوزر فوق در سرعت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه در حالت‌های دمنده و مکند مورد آزمایش قرار گرفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع فشار استاتیک در دیفیوزر

شکل ۵ توزیع فشار استاتیک را در امتداد دیفیوزر برای حالت دمنده برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه برای دو صفحه با زاویه‌های بزرگ و کوچک نشان می‌دهد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر دو صفحه فشار استاتیک از ۱۶۲- پاسکال در ورودی به ۱۰- پاسکال در خروجی می‌رسد و بر یکدیگر منطبق هستند. توزیع فشار استاتیک، به منظور بررسی عملکرد دیفیوزر برای حالتی که افت فشار در دیفیوزر وجود ندارد (حالت ایدئال)، به‌دست آمده و در شکل فوق نشان داده شده است. اختلاف منحنی توزیع فشار استاتیک برای حالت‌های ایدئال و واقعی بیانگر افت فشار در دیفیوزر است.

همان‌گونه که بیان شد، تحقیقات گوناگونی برای اندازه‌گیری افت فشار برای انواع دیفیوزرها انجام شده است. دیفیوزر با مقطع ورودی دایره و مقطع خروجی مربع نزدیک‌ترین دیفیوزر از لحاظ هندسی به دیفیوزر مورد آزمایش می‌باشد. فشار استاتیک بر روی دیفیوزر دایره به مربع را می‌توان طبق رابطه (۱) به‌دست آورد:

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶، می توان تشخیص داد که ملاک برای محاسبه افت فشار در دیفیوزر، با استفاده از روابط نیمه تجربی، زاویه بزرگ تر می باشد.

عامل دیگر اختلاف بین افت فشار ناشی از آزمایش و روابط نیمه تجربی، غیریکنواخت بودن سرعت جریان در دیفیوزر مورد آزمایش است. به منظور به دست آوردن افت فشار واقعی، نیاز است که ضریب تصحیح انرژی جنبشی را با اندازه گیری توزیع سرعت در ورودی و خروجی دیفیوزر به دست آورد. ضریب تصحیح انرژی جنبشی سرعت از رابطه زیر به دست می آید [۱۵]:

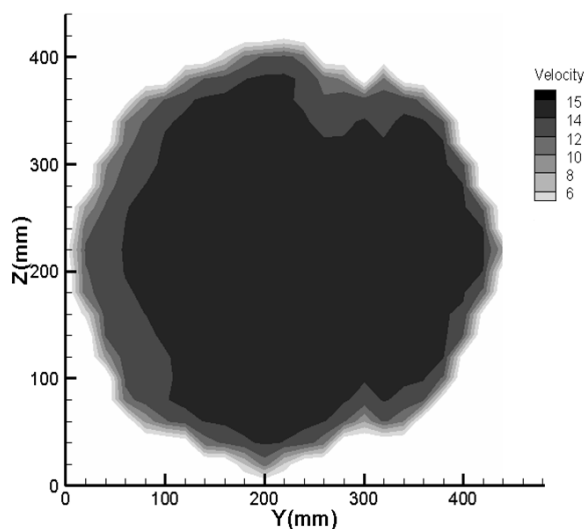
$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{u}{U} \right)^3 dA \quad (8)$$

با به کار بردن ضریب تصحیح انرژی جنبشی برای جریان غیریکنواخت، افت فشار کل واقعی به صورت زیر بیان می شود [۱۵]:

$$\Delta P_{Total} = (P_{s1} - P_{s2}) + \frac{1}{2} \rho (\alpha_1 U_1^2 - \alpha_2 U_2^2) \quad (9)$$

در رابطه فوق P_{s1} و P_{s2} فشار استاتیک و U_1 و U_2 سرعت متوسط جریان، به ترتیب در مقاطع ورودی و خروجی دیفیوزر، می باشند.

توزیع دوبعدی سرعت جریان هوا در ورودی و خروجی دیفیوزر مورد آزمایش به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ برای سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است.



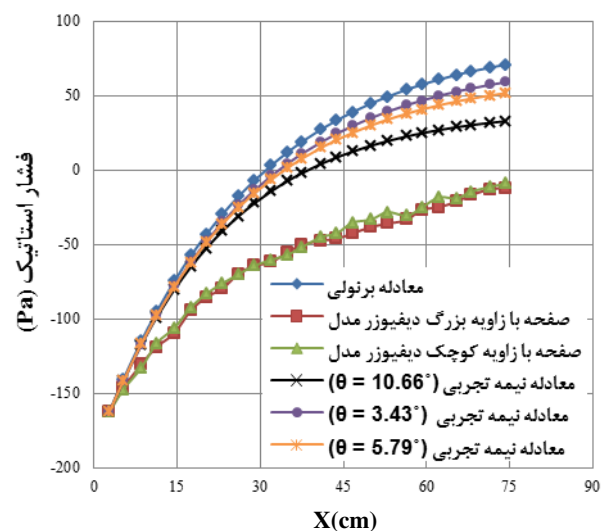
شکل ۷ توزیع دوبعدی سرعت در دهانه ورودی دیفیوزر برای سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

$$\begin{cases} 0.09623 - 0.004152 \theta & \text{for } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1222 - 0.04590 \theta + 0.02203 \theta^2 + 0.003269 \theta^3 \\ - 0.0006145 \theta^4 - 0.0000128 \theta^5 + 0.0000234 \theta^6 & \text{for } 1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ - 0.01322 + 0.05866 \theta & \text{for } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (6)$$

$$K_e(\text{Circle} - \text{Square}) = \frac{K_e(\text{Circle}) + K_e(\text{Square})}{2} \quad (7)$$

با توجه به روابط نیمه تجربی ارائه شده، توزیع فشار استاتیک در زاویه معادل ۵/۷۹ درجه برای دیفیوزر فوق به دست آمده و در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، افت فشار حدود ۱۹ پاسکال می باشد که این مقدار نسبت به افت فشار اندازه گیری شده برای دیفیوزر مورد آزمایش نسبتاً کم می باشد که احتمالاً دلایل این اختلاف غیریکنواخت بودن سرعت جریان هوا و نامناسب انتخاب نمودن زاویه معادل متوسط در معادلات نیمه تجربی است.

با توجه به مطالب فوق، در صورتی که از روابط نیمه تجربی و معادلات (۵) تا (۷) استفاده شود، افت فشار برای زاویه های ۳/۴۳ درجه، ۵/۷۹ درجه و ۱۰/۶۶ درجه در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه به ترتیب حدود ۱۱، ۱۹ و ۳۸ پاسکال می باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، افت فشار برای زاویه ۱۰/۶۶ درجه بر حسب معادلات نیمه تجربی به مقادیر افت فشار اندازه گیری شده در دیفیوزر مورد آزمایش نزدیک تر است.



شکل ۶ توزیع فشار استاتیک بر اساس زوایای مختلف در حالت دمیده برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه

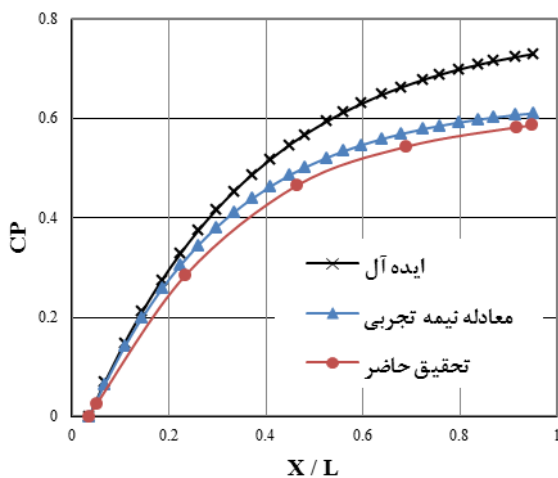
اختلاف فشار بازیافتی برای حالت‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده برابر ۳۷ پاسکال و یا به عبارت دیگر برابر ۱۸/۵ درصد است. همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، داده‌های اندازه‌گیری شده در دیفیوزر با نتایج نیمه‌تجربی به‌دست آمده هم‌خوانی قابل قبولی دارد. نکته حائز اهمیت این است که در صورتی که بخواهیم با استفاده از روابط نیمه‌تجربی افت فشار را تقریب بزیم، حتماً نیاز است که بر مبنای زاویه بزرگ‌تر صفحه‌های دیفیوزر محاسبات انجام شود و در این حالت زاویه متوسط مهم نیست. همچنین، این آزمایش برای حالتی که دیفیوزر به صورت مکند است نیز انجام شد و نتایج توزیع فشار مشابه حالت دمنده است، با این تفاوت که در حالت مکند افت فشار کمتری داریم.

ضریب بازیافت فشار، معیار سنجش عملکرد دیفیوزر می‌باشد؛ بدین معنی که هر چه ضریب بازیافت بیشتر باشد، عملکرد دیفیوزر بالاتر است که مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۲].

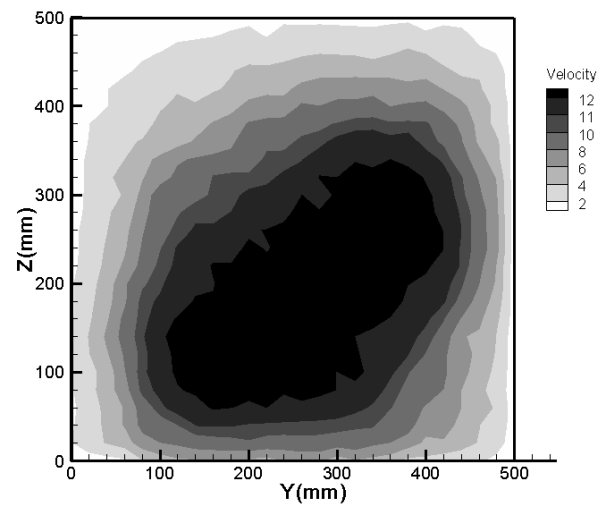
$$C_P = \frac{P_{s2} - P_{s1}}{\frac{1}{2} \rho U_1^2} \quad (10)$$

در رابطه فوق، U_1 سرعت جریان هوا در ورودی و P_{s1} و P_{s2} به ترتیب فشار استاتیک در مقطع ورودی و خروجی دیفیوزر می‌باشند.

شکل ۱۰ توزیع ضریب بازیافت فشار بر روی سطوح دیفیوزر را بر حسب فاصله از ورودی در حالت دمنده نشان می‌دهد.

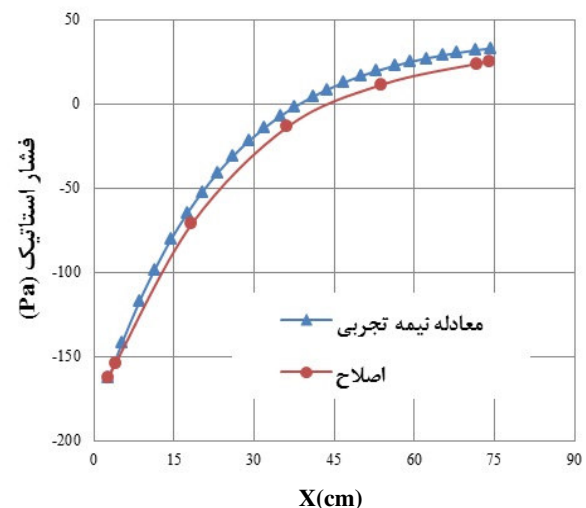


شکل ۱۰ توزیع ضریب بازیافت فشار در امتداد دیفیوزر در حالت دمنده



شکل ۸ توزیع دوبعدی سرعت در دهانه خروجی دیفیوزر برای سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه

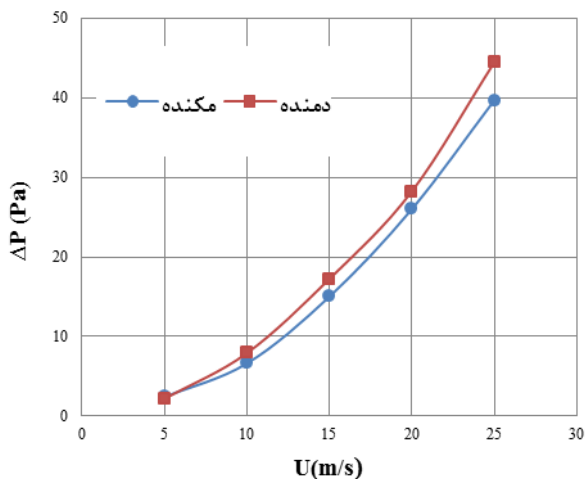
با در نظر گرفتن غیریکنواختی جریان در خروجی دیفیوزر، فشار استاتیک در امتداد دیفیوزر برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه اصلاح شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین، توزیع فشار استاتیک با استفاده از معادلات نیمه‌تجربی بر اساس زاویه ۱۰/۶۶ درجه نیز در شکل فوق نشان داده شده است.



شکل ۹ توزیع فشار استاتیک در حالت دمنده برای سرعت ۲۵ متر بر ثانیه پس از انجام اصلاحات

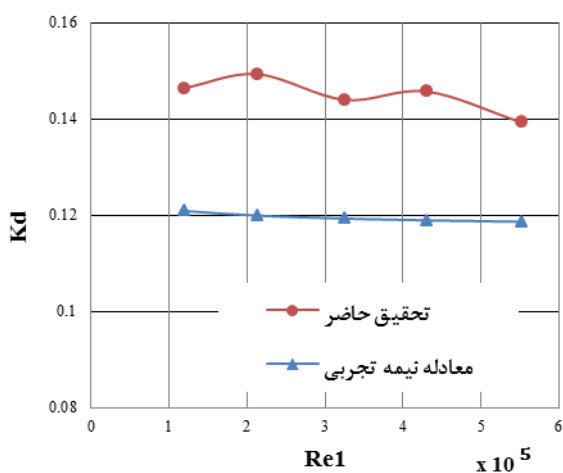
با مقایسه شکل‌های ۵ و ۹ می‌توان دریافت که بازیافت فشار در حالت اصلاح‌نشده ۱۶۲ پاسکال است. با اصلاح غیریکنواختی توزیع سرعت، بازیافت فشار برابر ۱۹۹ پاسکال خواهد بود.

است. بنابراین، با توجه به این که دیفیوزر تونل باد عمودی از نوع مکنده می‌باشد، لذا افت فشار کمتری در حالت واقعی خواهیم داشت.



شکل ۱۲ مقایسه افت فشار دیفیوزر مورد آزمایش در دو حالت دمنده و مکنده

شکل ۱۳ ضریب افت فشار دیفیوزر مورد آزمایش را در مقابل عدد رینولدز در حالت دمنده نشان می‌دهد. همچنین، در شکل فوق ضریب افت فشار برای دیفیوزر با ورودی دایروی و خروجی مربعی شکل بر اساس روابط نیمه تجربی نشان داده شده و مقدار آن حدود ۰/۱۲ است. با توجه به شکل فوق، ضریب افت فشار تقریباً مستقل از عدد رینولدز بوده و برای دیفیوزر فوق حدود ۰/۱۴ است.

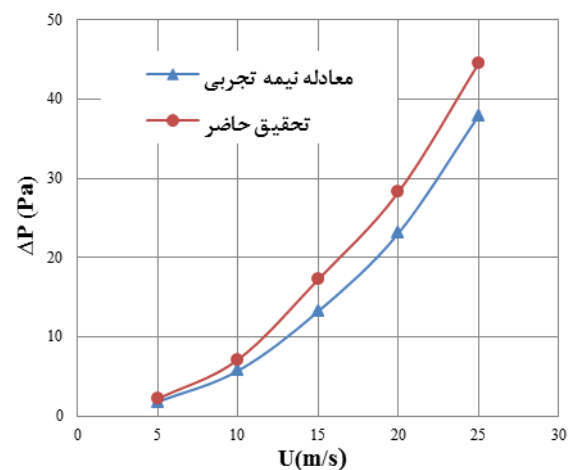


شکل ۱۳ ضریب افت فشار بر حسب رینولدز ورودی در حالت دمنده

همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، با افزایش فاصله از ورودی دیفیوزر، ضریب بازیافت فشار افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به عدم وجود گرادیان فشار صفر و یا ضریب بازیافت فشار منفی در شکل فوق، می‌توان دریافت که جدایش شدیدی در جریان هوا در دیفیوزر فوق وجود ندارد.

۲-۳- افت فشار

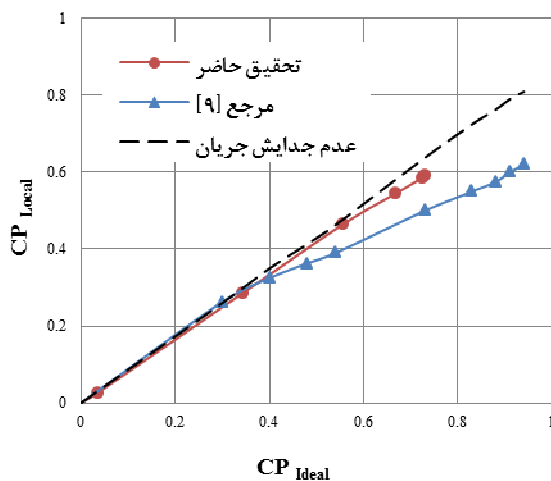
شکل ۱۱ افت فشار دیفیوزر مورد آزمایش را در مقابل سرعت جریان هوا در ورودی آن در حالت دمنده نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، این افت فشار می‌تواند با منحنی درجه ۲ برازش شود. همچنین، در شکل فوق افت فشار برای دیفیوزر با ورودی دایروی و خروجی مربع شکل بر اساس روابط نیمه تجربی نشان داده شده است. افت فشار اندازه‌گیری شده هم‌خوانی قابل قبولی با افت فشار نتایج نیمه تجربی دارد که بر اساس زاویه صفحه بزرگ‌تر محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، در سرعت‌های ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه افت فشار به ترتیب برابر ۲۸ و ۴۵ پاسکال است و در صورتی که سرعت در تونل باد واقعی حدود ۷۰ متر بر ثانیه باشد، با استفاده از برازش منحنی افت فشار حدود ۳۳۶ پاسکال تقریب زده می‌شود.



شکل ۱۱ افت فشار در برابر سرعت ورودی در حالت دمنده

در شکل ۱۲ افت فشار دیفیوزر در حالت‌های دمنده و مکنده بر حسب سرعت جریان هوای ورودی مقایسه شده‌اند و همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، افت فشار در حالت مکنده پایین‌تر از افت فشار دیفیوزر در حالت دمنده

نشان داده شده است، مقدار انحراف ضریب بازیافت فشار محلی نسبت به خط راست در خروجی حدود 0.75 است، در حالی که این مقدار برای دیفیوزر مورد آزمایش برابر 0.95 است. با توجه به مرجع [۹]، می‌توان تشخیص داد که جدایش قوی برای دیفیوزر مورد آزمایش اتفاق نیفتاده است.



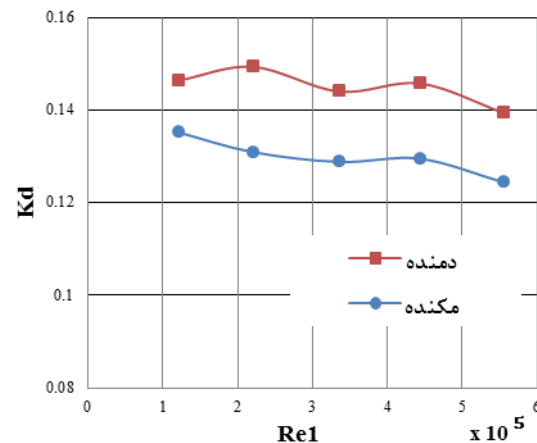
شکل ۱۵ تغییرات ضرایب بازیافت فشار محلی در برابر ضریب بازیافت فشار ایدئال

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مقاله بررسی دیفیوزر تونل باد عمودی است. این دیفیوزر دارای ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی می‌باشد. صفحه‌های دیفیوزر نسبت به محور مرکزی آن دارای دو زاویه $3/43$ و $10/66$ درجه می‌باشد. از این تونل باد عمودی برای عملیات سقوط آزاد استفاده می‌شود و در صورتی که افت فشار در آن بالا باشد، سرعت جریان هوا در محوطه پرواز آن به حد مطلوب نرسیده و در نتیجه طرح موفق نخواهد بود؛ لذا تحقیقات تجربی بر روی مدل دیفیوزر فوق انجام شده است. با توجه به نتایج تجربی ارائه‌شده در این مقاله، می‌توان نتایج زیر را به‌اختصار بیان نمود:

- توزیع فشار استاتیک بر روی صفحه‌های دیفیوزر با زاویه‌های کوچک و بزرگ یکسان می‌باشد که این موضوع بیانگر صحت داده‌هاست. همچنین، اختلاف فشار استاتیک بازیافت‌شده با حالت ایدئال (برنولی)، افت فشار می‌باشد. برای به‌دست آوردن افت فشار واقعی، پارامتر غیریکنواختی جریان در دیفیوزر از اهمیت بالایی برخوردار است. هنگامی که ضریب تصحیح انرژی

شکل ۱۴ ضریب افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی را در حالت‌های دمنده و مکنده مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل فوق نشان داده شده است، در حالت مکنده ضریب افت فشار حدود 0.13 می‌باشد که نسبت به حالت دمنده کمتر است.



شکل ۱۴ مقایسه ضریب افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی در حالت‌های دمنده و مکنده

۳-۳- بررسی پدیده جدایش

در این تحقیق بررسی پدیده جدایش از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به این که گرادیان فشار صفر یا منفی در توزیع فشار استاتیک در امتداد دیفیوزر مورد آزمایش وجود ندارد، لذا احتمال جدایش شدید کم می‌باشد.

روشی دیگر این است که نمودار ضریب بازیافت فشار محلی، C_p ، را بر حسب ضریب بازیافت فشار ایدئال، $C_{p|Ideal}$ ، رسم کنیم. در صورت عدم وجود جدایش، مقادیر C_p بر روی یک خط راست از مبدا می‌گذرند، در غیر این صورت، مقادیر C_p دچار انحراف از خط راست شده و جدایش اتفاق می‌افتد [۹].

شکل ۱۵ تغییرات ضریب بازیافت فشار محلی را در برابر ضریب بازیافت فشار ایدئال برای دیفیوزر مورد آزمایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر C_p بر روی یک خط راست از مبدا می‌گذرند و دچار انحراف نشده است. همچنین، در شکل فوق، نتایج تغییرات ضریب بازیافت فشار محلی در برابر ضریب بازیافت فشار ایدئال، طبق داده‌های به‌دست آمده از مرجع [۹] برای دیفیوزر با ورودی و خروجی دایروی شکل، نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل فوق

- [2] Von Den hoff A. E., Tetervin N., *Determination of General Relation for the Behavior of Turbulent Boundary Layer*, NACA, 1943.
- [3] Sanborn V. A., Kline S. J., "Flow Models in Boundary Layer Stall Inception", New York, ASME, Vol. 83, No. 3, 1961, pp. 317-328.
- [4] Reneau L. R., Johnston J. P. Kline S. J., "Performance and Design of Straight, Two Dimensional Diffuser", New York, ASME, No. 66, 1967, pp. 141-150.
- [5] Waitman B. A., Reneau L. R., Kline S. J., "Effect of Inlet Condition on Performance of Two-Dimensional Diffusers", New York, ASME, Series D, Vol. 83, 1961, pp. 349-360.
- [6] Cochran D. L., Kline S. J., *The Use of Short Flat Vanes for Producing Efficient Wide-Angle Two-Dimensional Subsonic Diffusers*, Washington, NACA, TN 4309, 1985.
- [7] Furuya Y., Sato T., Kushada T., "The Loss of Flow in the Conical Diffusers with Suction at the Entrance", *Bulletin of JSME*, Vol. 9, No. 33, 1966, pp. 532-556.
- [8] Rao D. M., Raju K. N., *The Use of Splitters for Flow Control in Wide Angle Conical Diffusers*, Bangalore, National Aeronautical Laboratory, No. TN-AE, 1964, pp. 26-64.
- [9] Senoo Y., Nishi M., "Improvement of the Performance of the Conical Diffusers by Vortex Generators", ASME, New York, No. 73, 1974, pp. 4-10.
- [10] Taylor H. D., "Fluid Mixing by Vortex Generators", Symposium on Stall, ASME, New York, 1958.
- [11] Mehta R. D., "The Aerodynamic Design of Blower Wind Tunnels with Wide Angle Diffusers", *Prog Aerospace Sci*, London, Vol. 18, pp. 59-120.
- [۱۲] اردکانی محمدعلی، *تونل باد با سرعت پایین (اصول طراحی و کاربرد)*، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [۱۳] اردکانی محمدعلی، "جریان سنج سیم داغ"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۵.
- [14] Barlow J. B., Rate W. H., Pope A., *Low Speed Wind Tunnel Testing*, New York, Wiley, 1999.
- [15] Dixon S. L., *Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbo machinery*, 5th ed., London, British Library Cataloguing in Publication Data, 2005.
- [16] Bradshaw P., Mehta R. D., "Design rules for small low speed wind tunnels", *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, Vol. 83, 1979, pp. 443-449.

جنبشی برای جریان غیریکنواخت در خروجی دیفیوزر برابر ۱/۵۴ می باشد، افت فشار واقعی ۱۸/۵ درصد کمتر از افت فشار اندازه گیری شده است.

• دیفیوزر دایره به مربع، دیفیوزر نزدیک به دیفیوزر مورد آزمایش می باشد که افت فشار آن توسط محققان به صورت روابط نیمه تجربی ارائه شده است. در صورتی که بخواهیم افت فشار دیفیوزرهایی که دارای صفحات با زاویه مختلف می باشند را با استفاده از روابط نیمه تجربی محاسبه کنیم، نیاز است که زاویه صفحه بزرگتر را نسبت به محور مرکزی دیفیوزر در نظر گرفته و بر مبنای آن محاسبات افت فشار به دست آید و استفاده از زاویه معادل مناسب نمی باشد.

• با توجه به این که ضریب افت فشار با عدد رینولدز با شیب بسیار کم کاهش پیدا می کند، می توان با استفاده از داده های به دست آمده از این آزمایش افت فشار دیفیوزر واقعی را با دقت مناسب تخمین زد.

• تغییرات ضریب بازیافت فشار در برابر ضریب بازیافت فشار ایدئال در حالت های دمنده و مکنده به صورت خطی می باشد و انحراف از خط راست آن مقدار کمی است. مقدار ضریب بازیافت فشار محلی نسبت به خط راست در خروجی دیفیوزر مورد آزمایش ۰/۹۵ است. این مقدار برای دیفیوزری که دچار جدایش شدید شده [۹] برابر ۰/۷۵ می باشد، لذا این موضوع بیانگر عدم وجود جدایش شدید در دیفیوزر مورد آزمایش می باشد. همچنین، با بررسی منحنی فشار استاتیکی (ضریب بازیافت فشار)، می توان تشخیص داد که جدایش قابل ملاحظه ای در دیفیوزر اتفاق نیفتاده است.

• با توجه به این که جدایش قابل توجهی در دیفیوزر مورد آزمایش وجود ندارد، ضریب افت فشار، برای حالتی که جریان در دیفیوزر به شکل مکنده می باشد، مقدار کمی (حدود ۱۰ درصد) کمتر از ضریب بازیافت فشار در حالت دمنده می باشد.

۵- مراجع

- [1] Eckert T., Mort W., 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.