



بررسی تجربی توزیع سرعت جریان هوا و اغتشاش های آن در یک دیفیوزر با مقطع ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی

اردکانی، محمد علی*^۱، پرپنچی، سید مرتضی^۲

۱- دانشیار پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۳/۲۲)

چکیده

دیفیوزر با مقطع ورودی هشت ضلعی و خروجی چهار ضلعی یکی از اجزای مهم تونل باد عمودی است که برای عملیات سقوط آزاد طراحی شده است. برای تعیین افت فشار واقعی دیفیوزر، نیاز به اندازه گیری توزیع سرعت می باشد. همچنین با بررسی توزیع سرعت می توان پدیده جدایش را در دیفیوزر فوق بررسی کرد. بدین منظور مدل ۷/۸٪ دیفیوزر اصلی ساخته شده و توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش های آن با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه گیری شده است. با بررسی توزیع سرعت و همچنین شدت اغتشاش های آن مشخص شد که دیفیوزر فوق دارای جدایش نمی باشد. همچنین در صورتی که تاثیر غیریکنواختی سرعت در اندازه گیری افت فشار لحاظ نشود، خطای تعیین ضریب افت فشار قابل ملاحظه خواهد بود.

واژه های کلیدی: دیفیوزر، توزیع سرعت، شدت اغتشاش های جریان، جریان سنج سیم داغ

۱- مقدمه

دیفیوزر یکی از اجزای مهم سیستم های سیالاتی از جمله تونل باد می باشد. وظیفه اصلی دیفیوزر کاهش فشار دینامیکی و تبدیل آن به فشار استاتیکی و در نتیجه کاهش تلفات جریان هوا در پایین دست دیفیوزر می باشد. تلفات در دیفیوزر به دو صورت اصطکاکی و انبساطی می باشد که تلفات اصطکاکی ناشی از طول دیفیوزر و تلفات انبساطی ناشی از تغییرات گرادیان فشار هوا 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 بحث های حائز اهمیت در این موضوع می باشد.

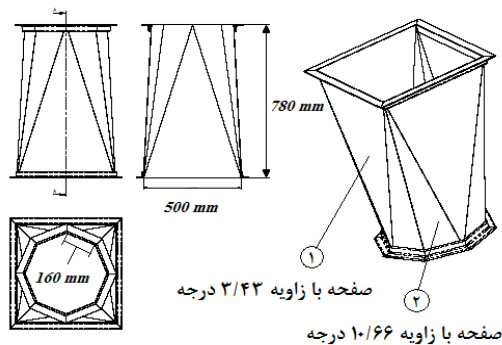
تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه دیفیوزر توسط محققان مختلفی انجام گرفته است. اکرت و همکاران [۱] طراحی آیرودینامیکی و پیش بینی افت اجزای یک تونل باد مادون صوت را بررسی نموده و روابطی را برای بدست آوردن ضریب افت فشار در دیفیوزرهایی با شکل ورودی و خروجی مربعی، دایروی و مستطیلی و یا ترکیبی از این ها ارائه کردند. ون دن هف و تتروین [۲] برای بررسی جدایش جریان روش ضریب شکل را ارائه کردند، بدین صورت هنگامی که جریان لایه مرزی از نوع آرام می باشد، مقدار ضریب شکل H برای شروع جدایش جریان برابر $۳/۵$ است و هنگامی که جریان لایه مرزی از نوع مغشوش می باشد، مقدار فوق برای شروع جدایش برابر $۲/۴$ 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 جریان های خارجی، تقریباً با صحت یکسانی پیش بینی می کند. رنیو و همکاران [۴]، تحقیقات گسترده ای بر روی دیفیوزرهای دوبعدی و مستقیم به صورت تجربی انجام دادند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که اگر نسبت طول دیفیوزر به عرض ورودی آن ثابت نگه داشته شود و بتوان تا حدودی از اغتشاشات جریان در ورودی چشم پوشی کرد، مطابق با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر، چهار رژیم جریان به ترتیب زیر ظاهر می شوند: 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 می ماند. رژیم وامانده کاملاً توسعه یافته که لایه مرزی در رژیم قبلی توسعه یافته و تبدیل به یک ناحیه گردابه ای 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 دیواره ها فراگیر می شود و جریان اصلی از روی دیواره ها کاملاً جدا می شود. در این ناحیه کاهش عملکرد دیفیوزر به حداکثر میزان خود می رسد. ویتمن و همکاران [۵] اثرات ضخامت لایه مرزی جریان در ورودی دیفیوزرهای دو بعدی با دیواره های تخت را بررسی کردند و متوجه شدند که افزایش ضخامت لایه مرزی، اثراتی را روی رژیم های جریان می گذارد و سبب کاهش عملکرد دیفیوزرها می شود. کاکرن و کلاین [۶] از پره های تخت کوتاه برای به تاخیر انداختن نقطه جدایش جریان در دیفیوزرهای مادون صوت دو بعدی 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. آزمایشات آن ها 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 ۰/۲ برای تمام زوایای واگرایی وقتی که نرخ کمیت مکش تا ۰/۲ است، کاهش می یابد. راتو و راجو [۸] از صفحه های جداکننده برای کنترل جریان در دیفیوزرهای مخروطی با زاویه واگرایی ۳۸ درجه و نسبت سطح ۱۵ استفاده کردند. این صفحه ها، 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 اندازه گیری شده نشان داد که عملکرد نزدیک به ۵۰٪ 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 تیغه هایی که در جریان تولید گردابه می کنند، کارایی دیفیوزر را افزایش دهند. آزمایشات آن ها برای دیفیوزرهایی با زاویه واگرایی ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۳۰ درجه و با نسبت سطح ۴ انجام شد. نتایج نشان داد که این تیغه های تولیدکننده گردابه از جدایش جریان تا زاویه واگرایی ۱۶ درجه جلوگیری می کنند و ضریب بازیافت فشار در این حالت به اندازه ضریب بازیافت فشار دیفیوزر ۸ درجه است. همچنین این تیغه ها به شکل موفقیت آمیزی در دیواره واگرایی 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 می افتد. 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.

در سال ها و دهه اخیر تحقیقات انجام گرفته در ارتباط با دیفیوزر به صورت تجربی و عددی بوده و در بعضی از موارد کنترل جدایش و یا بررسی پدیده فوق از موضوع های مطرح بوده است. ربیعی و همکاران [۱۲] دیفیوزر مخروطی تونل باد مادون صوتی را به صورت تجربی بررسی کرده و تاثیر تولید کننده گردابه بر عملکرد دیفیوزر و کاهش مصرف انرژی را در آن مشخص نمودند. سامانتا و همکاران [۱۳] اثر غیر یکنواختی جریان در ورودی دیفیوزر را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این اثر سبب کاهش پارامترهای عملکردی دیفیوزر نظیر ضریب بازیافت فشار می شود. اپسلی و لچزینر [۱۴] جریان جدا شده در دیفیوزر را به صورت عددی با استفاده از مدل های اغتشاشی مورد بررسی قرار دادند. همچنین هرست و همکاران [۱۵] با استفاده از شبیه سازی عددی و مدل LES تاثیر عدد رینولدز بر جدایش جریان در دیفیوزر را مورد بررسی قرار دادند. با افزایش عدد رینولدز جدایش جریان لایه مرزی در دیفیوزر کاهش می یابد. همچنین

دیفیوزر واقعی می باشد. مطابق شکل ۱ ورودی دیفیوزر به شکل ۸ ضلعی بوده و هر ضلع آن ۱۶۰ میلی متر است و خروجی آن به شکل مربع به ضلع ۵۰۰ میلی متر است. طول دیفیوزر ۷۸۰ میلی متر بوده که نسبت سطح خروجی به ورودی آن ۲/۰۲ می باشد. جریان هوا در دیفیوزر فوق در حالت های دمنده و مکند مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱ می توان دریافت که صفحه های دیفیوزر، دارای دو نوع زاویه متفاوت می باشد که زوایای آن به طور ناگهانی افزایش پیدا نکرده است. زاویه کوچکتر دیفیوزر ۳/۴۳ درجه و زاویه بزرگتر آن ۱۰/۶۶ درجه است. با توجه به زاویه های فوق در صورتی که ورودی دیفیوزر دایروی و خروجی آن مربع در نظر گرفته شود، زاویه معادل برابر ۵/۷۹ درجه خواهد بود.



شکل ۱ - مدل ۷/۸ درصدی دیفیوزر اصلی

شکل ۲ تونل باد مدار باز دمنده را نشان می دهد که با استفاده از آن دیفیوزر در حالت دمنده مورد آزمایش قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تونل باد فوق دارای یک فن سانتریفیوژ بوده که با استفاده از کنترل دور، سرعت دورانی فن آن کنترل شده و در نتیجه سرعت جریان هوا در آن تنظیم می شود. تونل باد فوق دارای یک عدد دیفیوزر زاویه باز و اتاق آرامش می باشد. به منظور جلوگیری از جدایش جریان در دیفیوزر زاویه باز، در آن دو عدد توری تعبیه شده 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.

هی یانگسن و همکاران [۱۶] با استفاده از روش های عددی و مدل $K-\epsilon$ جریان مغشوش درون دیفیوزر مخروطی را بررسی نمودند. در این حالت دیفیوزر با زاویه ۴ و ۱۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ای که در زاویه ۱۵ درجه جدایش اتفاق می افتد به منظور کنترل جدایش، از صفحه های مشبک و یا توری استفاده نمودند.

تحقیقات انجام گرفته نشان می دهند 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 [۱۷].

با توجه به این که شرایط همواره در اختیار طراح نبوده و در بسیاری از موارد دیفیوزر به شکل های مختلف و سطوح غیر دایروی و با زاویه های غیر بهینه طراحی می شود، در نتیجه افت فشار دیفیوزر مورد طراحی با دیفیوزر طراحی شده در حالت بهینه، تفاوت خواهد داشت.

برای تعیین افت فشار دیفیوزر معمولاً از روش های تجربی استفاده می شود. بدین صورت که با اندازه گیری فشار کل در ورودی و خروجی دیفیوزر می توان افت فشار دیفیوزر را اندازه گیری نمود. همچنین می توان با اندازه گیری توزیع فشار استاتیکی بر روی بدنه دیفیوزر و اختلاف آن با توزیع فشار حالت ایده آل (برنولی)، افت فشار دیفیوزر را مشروط بر این که توزیع سرعت در خروجی دیفیوزر یکنواخت باشد، بدست آورد. در صورتی که توزیع سرعت یکنواخت نباشد، باید از ضریب تصحیح انرژی جنبشی استفاده کرد و افت فشار را اصلاح نموده و مقدار واقعی آن را تعیین کرد. لذا اندازه گیری توزیع سرعت در ورودی و خروجی دیفیوزر از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین با اندازه گیری توزیع سرعت در امتداد دیفیوزر می توان پدیده جدایش جریان و مکان آن را بررسی نموده و در صورت امکان از آن جلوگیری کرد.

در این مقاله به بررسی توزیع سرعت جریان در دیفیوزر مورد استفاده در طرح تونل باد عمودی پرداخته و از نتایج آن برای پی بردن به جدایش و افت فشار واقعی دیفیوزر استفاده می شود.

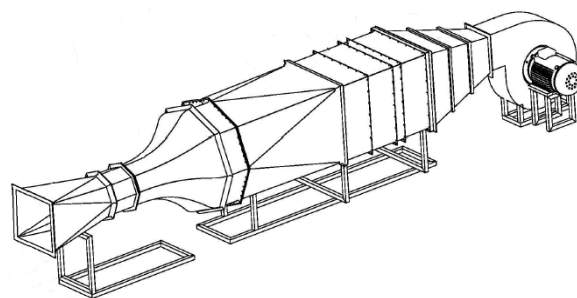
۲- روش آزمایش

آزمایش های مورد نظر در آزمایشگاه مستقر در سایت تونل باد عمودی انجام گرفته است. ابعاد دیفیوزر مدل ۷/۸ درصد ابعاد

۱۲۵۰ پاسکال و دقت اندازه گیری آن ۰/۲۵٪ نسبت به خط راست می باشد. لذا دقت اندازه گیری 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، غیر خطی بودن سنسور، کالیبراسیون نقطه صفر و ... حدود ۱٪ فشار اندازه گیری می باشد. همان گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، به منظور جابجایی پراب برای اندازه گیری پروفیل جریان هوا از مکانیزم انتقال دهنده استفاده می شود و این مکانیزم دارای دقت ۰/۱ میلی متر در جهت محورهای مختصات می باشد. کنترل حرکت پراب با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده توسط رایانه انجام می شود. اندازه گیری با استفاده از جریان سنج سیم داغ همانند دستگاه های دیگر دارای خطا می باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای دستگاه جریان سنج سیم داغ را می توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک پذیری کارت A/D و تغییرات دما دانست. کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ با استفاده از تونل باد و لوله استاتیکی پیتوت در جریان با شدت اغتشاش کمتر از ۰/۲٪ انجام پذیرفته است. خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت کمتر از ۰/۳٪ می باشد. پس از کالیبره نمودن جریان سنج سیم داغ رابطه و ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چندجمله ای درجه ۴ برازش نموده که خطای آن نیز کمتر از ۰/۵٪ خواهد بود. کارت A/D مورد استفاده ۱۲ بیتی بوده و بازه آن بین ± 10 ولت است و در صورتی که از تطبیق دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک پذیری آن نیز کمتر از ۰/۰۵٪ می باشد. تغییرات دما تاثیر نامطلوبی بر دقت جریان سنج سیم داغ داشته به طوری که خطا برای تغییر ۱ درجه سلیسیوس دمای محیط حدود ۲٪ ایجاد می شود که اصلاح نمودن آن را می توان به ۰/۱ درصد کاهش داد [۱۸]. با توجه به توضیحات ارائه شده می توان خطای کلی اندازه گیری را حدود ۱٪ در نظر گرفت. جزئیات بیشتر از جریان سنج سیم داغ در مرجع [۱۹] ارائه شده است.

۳- بحث و نتایج

شکل ۴ مقاطع دیفیوزر را که در آن توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش های آن اندازه گیری شده است را نشان



شکل ۲- تونل باد مدار باز دمنده

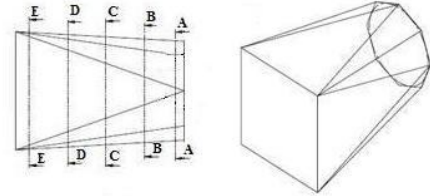
برای اندازه گیری توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش های آن از جریان سنج سیم داغ ساخت شرکت فرانسجش صبا مطابق شکل ۳ استفاده شده است.



شکل ۳- مکانیزم انتقال دهنده مورد استفاده برای اندازه گیری توزیع سرعت

پرآب جریان سنج سیم داغ از نوع یک بعدی بوده و سنسور آن از نوع تنگستن ۵ میکرونی می باشد و داده های اندازه گیری شده توسط جریان سنج سیم داغ از طریق کارت A/D به رایانه ارسال شده و توسط نرم افزار مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. همچنین به منظور اصلاح نمودن تاثیرات دما بر روی داده های جریان سنج سیم داغ، دمای هوا، اندازه گیری شده و از طریق کارت A/D به رایانه ارسال می شود. برای اندازه گیری فشار استاتیک از فشارسنج الکترونیکی ۳۰ کاناله استفاده شده است که خروجی فشارسنج های فوق از طریق کارت A/D به رایانه ارسال و توسط نرم افزار تجزیه تحلیل می شوند. فشارسنج مورد استفاده از نوع دیفرانسیلی مربوط به شرکت هانیول^۱ بوده و بازه عملکرد فشارسنج فوق

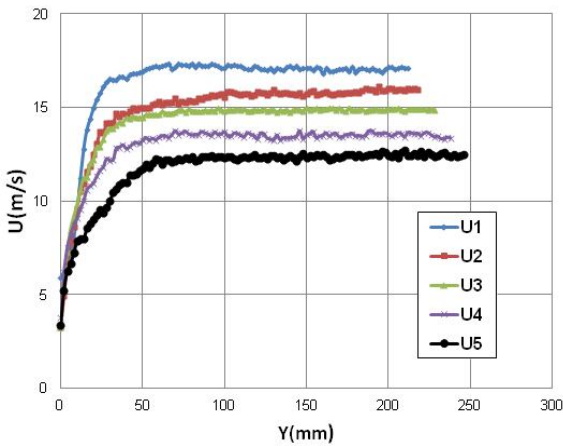
می دهد. فواصل مقاطع ۱ تا ۵ از مقطع ورودی دیفیوزر به ترتیب برابر ۴، ۱۸/۳، ۳۶/۲، ۵۳/۸ و ۷۱/۶ سانتیمتر می باشد.



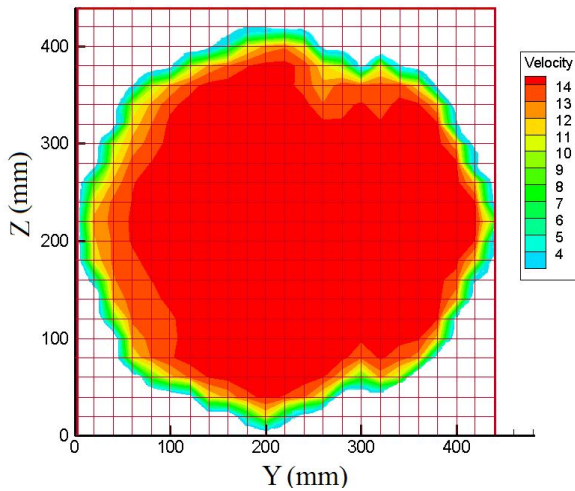
شکل ۴- سطح مقطع های دیفیوزر مورد آزمایش برای اندازه گیری سرعت و اغتشاش

۳-۱- بررسی تغییرات سرعت در دیفیوزر

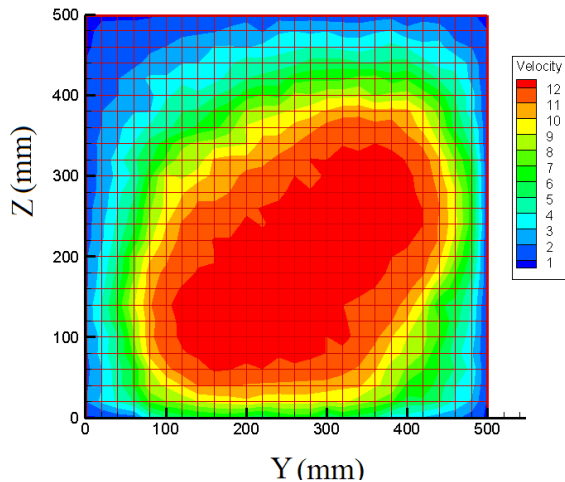
شکل های ۵ و ۶ تغییرات سرعت در ۵ مقطع از دیفیوزر مورد آزمایش را به ترتیب برای سرعت های ورودی ۲۲/۳ و ۱۷/۲۵ متر بر ثانیه نشان می دهند. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش فاصله از ورودی دیفیوزر سرعت از مقطع ۱ تا مقطع ۵ رفته رفته کاهش می یابد. بنابراین با کاهش سرعت در خروجی دیفیوزر، فشار دینامیکی کاهش یافته و در نتیجه فشار استاتیک افزایش می یابد. آزمایش فوق برای سرعت های ورودی ۱۱/۹۸ و ۶/۳ متر بر ثانیه نیز انجام شد و نتایج مشابهی بدست آمد.



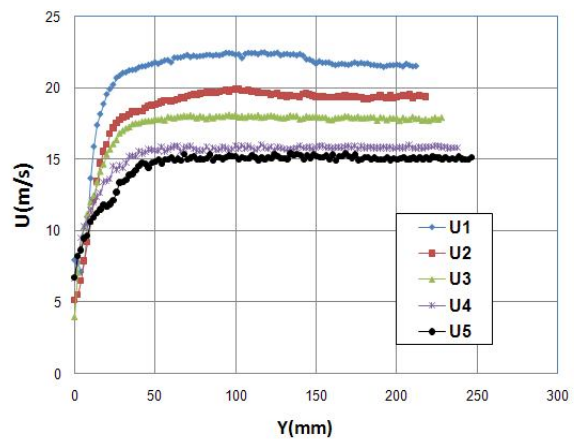
شکل ۶- مقایسه تغییرات سرعت در مقاطع مختلف دیفیوزر برای سرعت ورودی ۱۷/۲۵ متر بر ثانیه



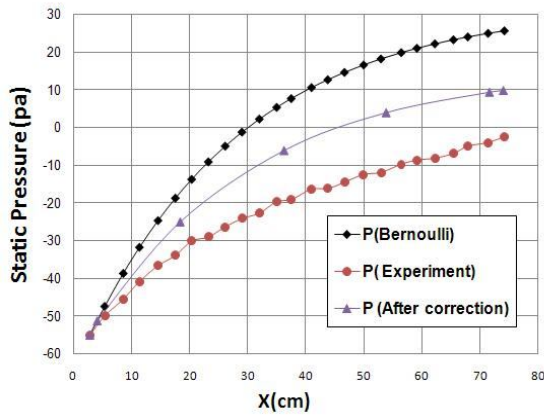
شکل ۷- توزیع دوبعدی سرعت در دهانه ورودی دیفیوزر برای سرعت ورودی ۱۴/۷ متر بر ثانیه



شکل ۸- توزیع دوبعدی سرعت در دهانه خروجی دیفیوزر برای سرعت ورودی ۱۴/۷ متر بر ثانیه



شکل ۵- مقایسه تغییرات سرعت در مقاطع مختلف دیفیوزر برای سرعت ورودی ۲۲/۳ متر بر ثانیه



شکل ۹- توزیع فشار استاتیک در امتداد دیفیوزر برای سرعت ورودی ۱۵ متر بر ثانیه

۳-۲- بررسی تغییرات پارامترهای لایه مرزی در دیفیوزر
به طور کلی برای تعیین جدایش و محل آن روش های مختلفی وجود دارد. از جمله می توان توزیع سرعت جریان هوا در لایه مرزی را بررسی نموده (منحنی بخش ۳-۱) و یا آن که با بررسی ضریب شکل لایه مرزی [۲۱ و ۲] جدایش را مشخص نمود. پارامترهای لایه مرزی عبارتند از: ضخامت جابه جایی δ^* ، ضخامت ممتموم θ و ضریب شکل H می باشد که طبق روابط زیر بدست می آیند:

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy \quad (3)$$

$$\theta = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) \frac{u}{U_{\infty}} dy \quad (4)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (5)$$

شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات ضخامت جابجایی لایه مرزی، تغییرات ضخامت ممتموم و تغییرات ضریب شکل را در امتداد دیفیوزر برای سرعت های مختلف نشان می دهند. با توجه به شکل های فوق، با افزایش فاصله از مقطع ورودی دیفیوزر ضخامت لایه مرزی و ضخامت ممتموم افزایش ولی ضریب شکل مقدار کمی کاهش می یابد. مطابق مراجع [۲۱ و ۵] برای لایه مرزی مغشوش، در صورتی که ضریب شکل توزیع سرعت به مقدار $2/4$ برسد جدایش اتفاق می افتد، بنابراین با توجه به شکل ۱۲، مقدار ضریب شکل در دیفیوزر

شکل های ۷ و ۸ توزیع دوبعدی سرعت در ورودی و خروجی دیفیوزر را برای سرعت ورودی $14/7$ متر بر ثانیه نشان می دهند. در شکل ۷، توزیع سرعت در ورودی دیفیوزر تقریباً به صورت یکنواخت است در حالی که در خروجی دیفیوزر مطابق شکل ۸ غیر یکنواخت می باشد.

این غیر یکنواختی تاثیر زیادی در اندازه گیری افت فشار واقعی دارد. برای بدست آوردن افت فشار واقعی نیاز است که ضریب تصحیح انرژی جنبشی را طبق رابطه زیر بدست آورد [۲۰]:

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

بنابراین با توجه به شکل های فوق و رابطه (۱) ضریب تصحیح انرژی جنبشی در ورودی و خروجی دیفیوزر به ترتیب برابر $1/0.35$ و $1/0.54$ بدست آمده است، همچنین با به کار بردن ضریب تصحیح انرژی جنبشی برای جریان غیر یکنواخت، افت فشار کل واقعی به صورت زیر بیان می شود [۱۹]:

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

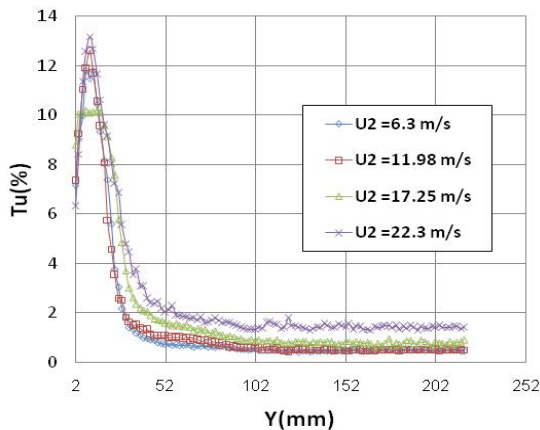
در رابطه فوق P_{s1} ، P_{s2} فشار استاتیک و U_1 ، U_2 سرعت متوسط جریان، به ترتیب در مقاطع ورودی و خروجی دیفیوزر می باشند.

توزیع فشار استاتیک اندازه گیری شده در امتداد دیفیوزر به همراه توزیع فشار استاتیک پس از اصلاح غیر یکنواختی سرعت در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین در شکل فوق توزیع فشار استاتیک در حالت ایده آل (برنولی) نیز نشان داده شده است. اختلاف مقدار فشار استاتیک با برنولی افت فشار می باشد. در صورتی که اثر غیر یکنواختی سرعت در افت فشار اصلاح نشود مقدار افت فشار برابر ۲۹ پاسکال خواهد بود، ولی افت فشار واقعی برابر ۱۷ پاسکال است. به عبارت دیگر اگر اثر غیر یکنواختی سرعت در افت فشار اصلاح نشود، ضریب افت فشار $K = \Delta P / (1/2 \rho U_1^2)$ ، برابر 0.25 خواهد شد ولی ضریب افت واقعی برابر 0.14 است.

۳-۳- بررسی تغییرات اغتشاش های جریان در دیفیوزر
 شدت اغتشاش های جریان طبق رابطه زیر بیان می شود:

$$Tu\% = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100 \quad (۶)$$

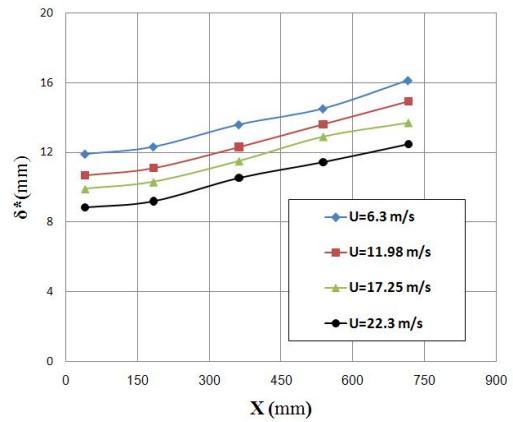
در رابطه فوق U سرعت متوسط جریان هوا در خارج از لایه مرزی، u' اغتشاش های جریان و یا در واقع تفاوت مقدار سرعت لحظه ای با سرعت متوسط جریان هوا می باشد. شکل ۱۳ تغییرات اغتشاش های جریان هوا را در امتداد لایه مرزی در مقطع ۲ در سرعت های مختلف نشان می دهد. همان گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، مقدار شدت اغتشاش ها در لایه مرزی بسیار بوده و تا حدود ۱۳٪ افزایش می یابد. با خارج شدن از لایه مرزی مقدار فوق کاهش یافته و به حدود ۱٪ می رسد.



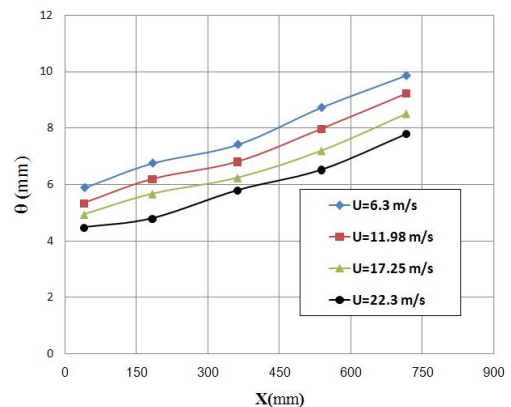
شکل ۱۳- تغییرات اغتشاش های جریان در امتداد لایه مرزی دیفیوزر در مقطع ۲ برای سرعت های مختلف

شکل ۱۴ تغییرات شدت اغتشاش های جریان را در مقاطع مختلف و در مکان ضخامت جابجایی لایه مرزی، در امتداد دیفیوزر نشان می دهد. همان طور که در شکل فوق نشان داده شده است با افزایش فاصله از دهانه ورودی دیفیوزر، شدت اغتشاش های جریان به دلیل کاهش فشار دینامیکی که در دیفیوزر فوق رخ می دهد، کاهش می یابد. همان گونه که در شکل فوق نیز نشان داده شده است در صورتی که در دیفیوزر جدایش اتفاق نیافتد، دیفیوزر سبب کاهش شدت اغتشاش های جریان می شود.

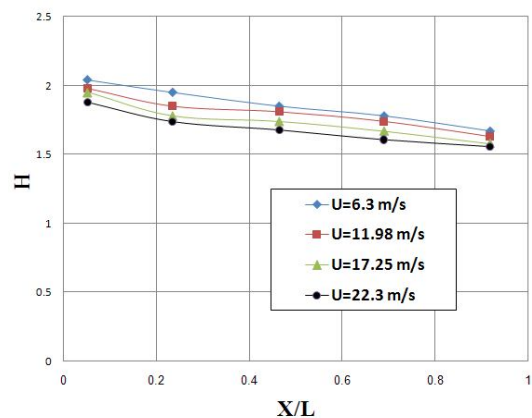
مورد آزمایش کمتر از ۲/۴ می باشد که بیانگر عدم وجود جدایش جریان در دیفیوزر فوق است.



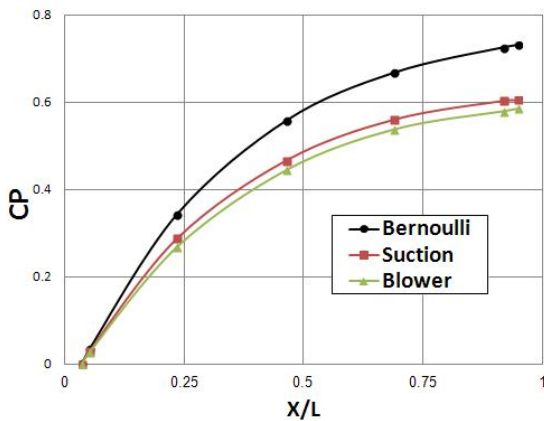
شکل ۱۰- تغییرات ضخامت جابجایی در امتداد دیفیوزر



شکل ۱۱- تغییرات ضخامت ممنتوم در امتداد دیفیوزر

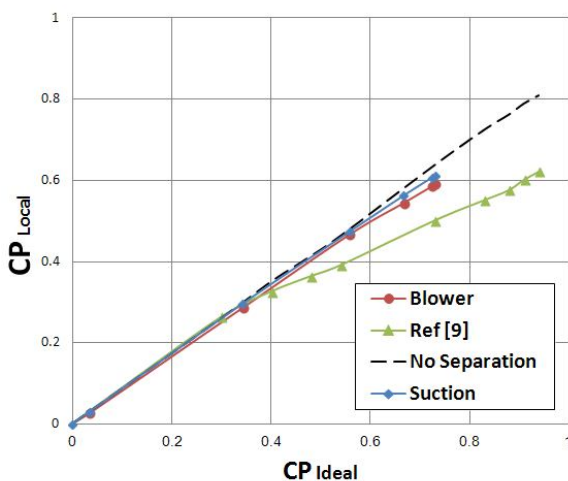


شکل ۱۲- تغییرات ضریب شکل در امتداد دیفیوزر

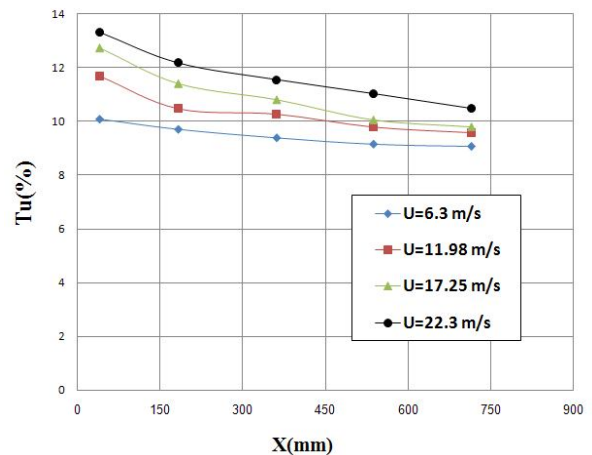


شکل ۱۵- تغییرات ضریب بازیافت فشار در حالت دمنده و مکنده

همان گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، با افزایش فاصله از ورودی دیفیوزر، ضریب بازیافت فشار افزایش می یابد لذا با توجه به عدم گرادیان فشار صفر و یا منفی جدایش قوی وجود ندارد. همچنین در شکل فوق منحنی ضریب بازیافت فشار در حالت ایده آل (برنولی) نیز نشان داده شده است. اختلاف ضریب بازیافت فشار در حالت های مکنده و یا دمنده طبق رابطه $K = C_{p_i} - C_p$ برابر ضریب افت فشار می باشد. با توجه به شکل ۱۵ مشخص می شود که عملکرد دیفیوزر در حالت های دمنده و مکنده مشابه می باشند ولی اختلاف ضریب بازیافت فشار C_p ، در حالت مکنده با حالت ایده آل (برنولی) مقداری کمتر از حالت دمنده است و در نتیجه ضریب افت فشار آن نیز مقداری کمتر خواهد بود.



شکل ۱۶- تغییرات ضرایب بازیافت فشار محلی در برابر ضریب بازیافت فشار ایده آل



شکل ۱۴- مقایسه اغتشاشات جریان در دیفیوزر مورد آزمایش در تمام ۵ مقطع

همان طور که در قسمت قبل بیان شد، با استفاده از روش ضریب شکل برای تشخیص جدایش، نیاز است که مشخص شود جریان در دیفیوزر از نوع لایه مرزی آرام و یا مغشوش می باشد. در صورتی که لایه مرزی از نوع آرام باشد مقدار ضریب شکل برای جدایش حدود $3/5$ و اگر از نوع مغشوش باشد مقدار ضریب شکل حدود $2/4$ خواهد بود. بنابراین بهترین روش برای تشخیص نوع لایه مرزی، مشخص نمودن شدت اغتشاش های جریان می باشد.

۳-۴- مقایسه عملکرد دیفیوزر در حالت دمنده و مکنده
با توجه به این که تونل باد عمودی که برای عملیات سقوط آزاد طراحی شده، از نوع مکنده می باشد، دیفیوزر فوق در حالت مکشی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. بدین منظور از تونل باد مدار باز مکنده استفاده شده و تغییرات فشار استاتیک در امتداد دیفیوزر اندازه گیری شده است. شکل ۱۵ توزیع ضریب بازیافت فشار در حالت های دمنده و مکنده را نشان می دهد. ضریب بازیافت فشار، معیار سنجش عملکرد دیفیوزر می باشد که مطابق رابطه زیر تعریف می شود [۱۷]:

$$C_p = \frac{P - P_i}{\frac{1}{2} \rho U_i^2} \quad (7)$$

در رابطه فوق، P_i فشار استاتیک و U_i سرعت متوسط جریان هوا در مقطع ورودی دیفیوزر و ρ چگالی هوا می باشند.

اصلاحات انجام نشده باشد. به عنوان مثال در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه در صورتی که اثر غیریکنواختی سرعت در افت فشار اصلاح نشود، ضریب افت فشار برابر ۰/۲۵ و در صورت اصلاح این ضریب برابر ۰/۱۴ است.

- شدت اغتشاش های جریان در لایه مرزی در دیفیوزر فوق بررسی شده و مقدار آن بالاتر از ۱۰٪ بوده که نشان دهنده جریان مغشوش می باشد. با توجه به مراجع [۲۰ و ۲۱] در صورتی که ضریب شکل توزیع سرعت به مقدار ۲/۴ برسد، جدایش اتفاق می افتد. نتایج اندازه گیری شده نشان می دهد که تغییرات ضریب شکل در امتداد دیفیوزر فوق کمتر از ۲ می باشد که بیانگر عدم جدایش جریان در دیفیوزر ۸ ضلعی به ۴ ضلعی فوق است.
- با بررسی ضریب باز یافت فشار دیفیوزر مورد آزمایش در حالت های دمنده و مکند و مقایسه آن با ضریب باز یافت فشار ایده آل، مشخص گردید که جدایش قابل توجهی اتفاق نیافتاده است.

۵- فهرست علائم

α	ضریب تصحیح انرژی جنبشی
u	سرعت لحظه ای
u'	تفاوت میان سرعت لحظه ای و سرعت متوسط
U	سرعت متوسط
U_∞	سرعت در جریان آزاد
U_i	سرعت متوسط در مقطع ورودی
P_i	فشار استاتیک در مقطع ورودی
K	ضریب افت فشار
ΔP	افت فشار کل
δ^*	ضخامت جابجایی
θ	ضخامت ممنتوم
H	ضریب شکل
$Tu\%$	شدت اغتشاش های جریان
C_p	ضریب باز یافت فشار
C_{P_i}	ضریب باز یافت فشار ایده آل
ρ	چگالی هوا

۶- پی نوشت ها

- 1- Honeywell
- 2- Hysteresis

به منظور بررسی بهتر پدیده جدایش، منحنی تغییرات ضریب باز یافت فشار محلی در برابر ضریب باز یافت فشار ایده آل در شکل ۱۶ برای حالت های دمنده و مکند نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۵ داده های مربوط به مرجع [۹] که در آن جدایش رخ داده است نیز نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می شود مقادیر ضریب باز یافت فشار C_p ، برای حالت های دمنده و مکند بر روی خط راست از مبداء می گذرند و دچار انحراف شدید نشده اند. لذا این موضوع بیانگر عدم جدایش قابل ملاحظه می باشد. لازم به ذکر است که در حالت مکند مقدار انحراف ضریب باز یافت فشار C_p محلی از خط راست کمتر از حالت دمنده می باشد.

۴- نتیجه گیری

- هدف اصلی این مقاله، بررسی دیفیوزر تونل باد عمودی که برای عملیات سقوط آزاد استفاده می شود. این دیفیوزر دارای ورودی ۸ ضلعی و خروجی ۴ ضلعی می باشد. صفحه های دیفیوزر نسبت به محور مرکزی آن دارای دو زاویه ۳/۴۳ و ۱۰/۶۶ درجه می باشد. تعیین مقدار افت فشار واقعی دیفیوزر و همچنین بررسی پدیده جدایش از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا تحقیقات تجربی برای دیفیوزر فوق انجام شده و با توجه به تحقیقات ارائه شده می توان نتایج زیر را به اختصار بیان نمود:
- توزیع سرعت جریان هوا در امتداد لایه مرزی دیفیوزر بررسی شده و با توجه به اینکه گرادیان معکوس در پروفیل سرعت مشاهده نشده است، جدایش در دیفیوزر مورد آزمایش اتفاق نیافتاده است.
 - با توجه به اینکه جریان هوا در لایه مرزی دیفیوزر از نوع مغشوش می باشد، در صورتی که ضریب شکل توزیع سرعت به مقدار ۲/۴ برسد، جدایش اتفاق می افتد. بنابراین این ضریب شکل در امتداد دیفیوزر مورد آزمایش کمتر از مقدار ۲/۴ بدست آمد که بیانگر عدم جدایش جریان در دیفیوزر فوق است.
 - با اندازه گیری سرعت جریان هوا در مقطع ورودی و خروجی دیفیوزر مورد آزمایش، توزیع دو بعدی سرعت و در نتیجه ضریب تصحیح انرژی جنبشی بدست آمد. با استفاده از این ضریب افت فشار واقعی دیفیوزر تعیین شد که مقدار فوق به مراتب کمتر از حالتی است که این

۷- منابع و مراجع

- Diffuser*” Flow, Turbulence and Combustion Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 1999; pp 81-112.
- [15] Herbst A. H., Schlatter p., Henningson D. S., “*Simulations of Turbulent Flow in a Plane Asymmetric Diffuser*” Flow Turbulence Combust, No 79, 2007; pp 275-306.
- [16] He Yongsan., Toshio Kobayashi., Youhei Morinishi., “*Numerical Prediction Of Turbulent Flow In A Conical Diffuser Using $K - \epsilon$ Model*” ACTA Mecanica Sinica, Vol.8, No.2, 1991.
- [۱۷] اردکانی محمد علی؛ "تونل باد با سرعت پایین (اصول طراحی و کاربرد)؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۸.
- [18] M.A. Ardekani, F. Farhani., “*Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures*”; Flow Measurement and Instrumentation., 2009; pp 174-179.
- [۱۹] اردکانی محمد علی؛ "جریان سنج سیم داغ"؛ انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۵.
- [20] Dixon S.L., “*Fluid Mechanics, Thermodynamics Of Turbo machinery*” ., 5th ed., London, British Library Cataloguing in Publication Data, 2005.
- [21] White F.M., “*Fluid Mechanics*”, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [22] Barlow J.B., Rate W.H., Pope A., “*Low Speed Wind Tunnel Testing*” ; New York, Wiley 1999.
- [1] Eckert T., Mort W., Jope J., “*Aerodynamic Design Guidelines And Computer Program For Estimation Of Subsonic Wind Tunnel Performance*”, , NASA, NT D-8243; 1976.
- [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.
- [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, Serise 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*” ; New York, ASME, No.73, 1974; pp 4-10.
- [10] Taylor H.D., “*Fluid Mixing By Vortex Generators*” ; New York, ASME, 1958.
- [11] Mehta RD., “*The Aerodynamic Design Of Blower Wind Tunnels With Wide Angle Diffusers* London, Prog Aerospace Sci, Vol. 18, pp 59-120.
- [۱۲] ربیعی علیرضا، قدک فرهاد، حقیری عبدالعلی؛ "تحلیل تجربی یک تولید کننده گردابه بر عملکرد یک دیفیوزر مخروطی مادون صوت"؛ نشریه مکانیک و هوافضا، جلد ۴، شماره ۱، تابستان ۱۳۸۷، از صفحه ۱۵ الی ۲۴.
- [13] Samantha H. Feakins, Douglas G. MacMartin, and Richard M. Murray. “*Dynamic Separation Control In A Low-Speed Aymmetric Diffuser With Varying Down Stream Boundary Condition*” Fluid Dynamics Conference, AIAA 2003-4161
- [14] Apsley D.D, Leschziner M.A., “*Advanced Turbulence Modelling of Separated Flow in a*