

**Research Paper**

# Design of a Diffuser for a Subsonic Wind Tunnel Using CFD

**Z. Saboohi<sup>1\*</sup>**

1. Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research and Technology, Tehran, IRAN

\* [saboohi@ari.ac.ir](mailto:saboohi@ari.ac.ir)

*In this paper, the design of a diffuser for a suction type subsonic wind tunnel equipped with three axial fans has been taken into account by CFD. The tunnel test section has a 140 cm height and 195cm width. For numerical modeling the axial fans that contains 10 rotor blades and 13 stator blades 3D modeling to simulate the impeller have been used. The 3D modeling to simulate the impeller method provides an adequate means for simulating the swirl effects of air flow. The best geometrical characteristics have been selected for designing the optimal performance for the diffuser. The final design includes a circular diffuser which incorporates a 4 degree equivalent cone angle. This study also suggests that the circular scheme is superior to the triangular and fitted design aspect of the total pressure loss and the volumetric flow rate.*

**Keyword:** Wind tunnel, Computational fluid dynamics, Diffuser, Axial Fan, 3D modeling to simulate the impeller.

---

1. Assistant Professor (Corresponding Author)

مقاله علمی - پژوهشی

# طراحی دیفیوزر برای یک تونل باد زیر صوت مکشی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

زهیر صبوچی\*<sup>۱</sup>

۱- پژوهشکده علوم و فناوری هوایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

\*saboohi@ari.ac.ir

در این مقاله، طراحی دیفیوزر یک تونل باد زیر صوت مکشی که سه فن محوری نیروی رانش آن را تأمین می‌کند، به کمک دینامیک سیالات عددی مورد توجه قرار گرفته است. اتاق آزمون تونل باد یاد شده به ابعاد  $114 \times 195 \text{ cm}^3$  است. برای مدل‌سازی فن محوری یاد شده که شامل ۱۰ پره روتور و ۱۳ پره استاتور می‌باشد و نیز در روند طراحی دیفیوزر و مدل‌سازی تونل باد از مدل‌سازی سه‌بعدی پرها استفاده شده است. این روش به بهترین شیوه، اثرات چرخش جریان را مدل می‌کند. در بخش طراحی دیفیوزر سعی شد تا با بررسی حالات مختلف هندسی، دیفیوزری با بهترین عملکرد انتخاب شود. طرح نهایی دیفیوزری با زاویه مخروط معادل ۴ درجه و طرح دایروی است. همچنین نشان داده شد که طرح دایروی در مقایسه با طرح‌های سه‌گوش و محاطی عملکرد بهتری از لحاظ افت فشار کل تونل باد و دبی عبوری از آن را دارد.

واژگان کلیدی: تونل باد، دینامیک سیالات محاسباتی، دیفیوزر، فن محوری، مدل‌سازی سه‌بعدی پرها.

## علائم و اختصارات

$A$	سطح مقطع
$f$	نیروی حجمی
$L$	طول دیفیوزر
$P$	فشار
$Re$	شعاع معادل مقطع
<b>حروف یونانی</b>	
$\Omega$	سرعت زاویه‌ای
$\theta$	زاویه مخروط معادل دیفیوزر
$\vec{v}$	بردار سرعت

## مقدمه

از گذشته استفاده از آزمون‌های تونل باد جایگاه ویژه‌ای در دانش مهندسی آیرودینامیک داشته است و امروزه در گستره وسیعی از

مطالعات مهندسی آیرودینامیک و باد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]- [۱]. با وجود پیشرفت‌های فراوان در توان محاسباتی کامپیوترها در چند دهه گذشته، دینامیک سیالات محاسباتی هرگز نتوانسته به طور کامل جایگزین استفاده از آزمون‌های تونل باد شود [۶]. با این وجود امروزه، دینامیک سیالات محاسباتی در کنار آزمون‌های تونل باد نقش مکمل را ایفا می‌کند. از یک سو آزمون‌های تونل باد برای اعتبارسنجی نتایج حل‌های عددی که با استفاده از مدل‌های مختلف آشفستگی حاصل شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرد و از سوی دیگر، دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به عنوان ابزاری برای بهبود طراحی تونل باد، کمک به آزمون‌ها و تفسیر نتایج حاصله از تونل باد به کار برده شود. تعداد بیشماری از مقالات را می‌توان برشمرد که در آن‌ها از آزمون‌های تونل باد برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از حل عددی استفاده شده است. نمونه‌های فراوانی از این مقالات در مجلات معتبر حوزه آیرودینامیک و مهندسی باد موجود هستند. در مقابل مطالب مربوط به استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بهبود طراحی و افزایش بهره‌وری در آزمون‌های تونل باد در تعداد محدودی از مقالات ارائه شده است. به عنوان

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

مقاله حاضر در راستای طراحی یک تونل باد زیرصوت مدار باز مکشی جهت نصب در شهر تهران تعریف شده است. در حال حاضر برای ساخت این تونل باد سه دستگاه فن محوری در نظر گرفته شده است. هدف تحقیقاتی این مقاله مدل‌سازی دقیق این فن‌ها و در نتیجه طراحی دیفیوزر این تونل باد است.

## طراحی مقدماتی دیفیوزر

به‌طور کلی در یک مسئله طراحی مهندسی، بهترین انتخاب در میان گستره وسیعی از انتخاب‌های ممکن جست‌وجو می‌شود. در مسائل مختلف «بهترین» می‌تواند به معنای سریع‌ترین، کم‌هزینه‌ترین، کم‌افت‌ترین و ... باشد. در بیشتر مسائل طراحی، برای رسیدن به بهترین انتخاب لازم است تا چندین هدف در کنار یکدیگر مورد ارزیابی قرار گیرد. در تونل باد، هدف از کاربرد دیفیوزر تبدیل فشار دینامیکی به فشار استاتیکی، کاهش تلفات و بازیافت فشار است. در بحث طراحی مقاطع و بخش‌های مختلف تونل باد با توجه به اینکه احتمال جدایش جریان در دیفیوزر وجود دارد، طراحی این بخش اهمیت دوچندان دارد.

در بحث طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر همواره دو پارامتر هندسی مورد توجه هستند. این پارامترها عبارتند از:

$$1. \text{ زاویهٔ مخروط معادل } (\theta)$$

$$2. \text{ نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی } (A_R)$$

در بیشتر تونل‌های باد از دیفیوزرهای مخروطی شکل استفاده نمی‌شود و سطح مقطع دو سمت دیفیوزر اشکالی مانند مستطیل، هشت ضلعی و ... (به طور کلی غیردایروی) هستند. برای این گونه دیفیوزرها زاویه مخروط معادل با استفاده از معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$2\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{A_2 - A_1}}{L\sqrt{\pi}} \right) \quad (1)$$

در معادله فوق،  $A_2$  سطح مقطع خروجی،  $A_1$  سطح مقطع ورودی دیفیوزر و  $L$  طول دیفیوزر می‌باشند. به این ترتیب نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی برابر است با:

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \quad (2)$$

در ادامه با توجه به اطلاعات مندرج در یکی از منابع اصلی طراحی مهندسی تونل‌های باد زیرصوت [۱۳]، طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر تونل باد انجام شده است. پیش از آن لازم است تا تونل باد مطالعاتی معرفی گردد.

در جدول (۱) ابعاد بخش‌های اصلی تونل باد زیرصوت مفروض مطالعاتی بیان شده است. طراحی تونل باد یاد شده بر مبنای استفاده از سه فن محوری یکسان برای سیستم تأمین جریان هواست که در بخش‌های بعد به تفصیل معرفی شده‌اند.

نمونه می‌توان از کارهای گوردن و ایمابی [۷] برای بهبود طراحی مقاطع بحرانی یک تونل باد جدید و همچنین، قانی و همکاران [۸] که برای بهینه‌سازی و بهبود عملکرد تعدادی از اجزای کلیدی تونل بادی با کاربرد در محیط زیست از دینامیک سیالات محاسباتی بهره بردند، نام برد.

مومن و همکاران [۹] برای بررسی کیفیت جریان مقطع آزمون تونل‌های باد، شش شاخص معرفی کردند. این شاخص‌ها وابسته به عواملی نظیر میزان چرخش جریان، زاویهٔ جریان، همگرا یا واگرا بودن جریان بوده و بیان‌کنندهٔ میزان یکنواختی جریان در مقطع آزمون می‌باشند. آن‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و این شاخص‌ها اثر پره‌های راهنما و توری را بر کیفیت جریان مقطع آزمون یک تونل باد مدار بسته مطالعه کردند.

زرانگ [۱۰] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یک تونل باد مدار باز با سایز متوسط با کاربری آموزشی برای واحدهای درسی دورهٔ کارشناسی و همچنین آزمون اجزای توربین باد را طراحی کرد. وی از دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی رفتار سیال در تونل باد استفاده کرد. همچنین یک تحلیل کلی به منظور مطالعه بازده و کارایی تونل باد نیز انجام داد.

مومن و همکاران [۱۱] جریان در یک تونل باد مدار بسته با کاربرد در زمینه محیط زیست را با استفاده از دینامیک سیالات عددی مدل‌سازی کردند. آن‌ها جهت مدل‌سازی فن از «شرط مرزی فن» استفاده کردند و فن‌ها را با استفاده از یک صفحه مجازی که اختلاف فشار فن را ایجاد می‌کند، مدل کردند. آن‌ها تونل باد را در دو شرایط کاری مختلف یکی زمانی که جسمی در مقطع آزمون قرار ندارد و دیگری زمانی که یک جسم مکعبی در اتاق آزمون قرار دارد مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتایج حاصل از مدل‌سازی خود را با داده‌های تجربی مقایسه کردند که جواب‌ها از همگرایی قابل قبولی برخوردار بودند.

متنو [۱۲] در رساله دکترای خود طراحی و ساخت یک تونل باد مدار باز ناپژواک در دانشگاه فلوریدا را مورد توجه قرار داد. وی در روند طراحی و دستیابی به انتخاب‌های بهینه از ابزارهای نوینی مانند دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل‌های اجزای محدود سازه‌ها استفاده کرد. تونل باد طراحی شده از نوع دمشی بود و نیروی رانش آن با استفاده از یک فن گریز از مرکز با توان ۳۰۰ اسب بخار تأمین می‌شد. در اتاق آرامش از یک شبکه لانه زنبوری و چهار ردیف توری برای یکنواخت کردن جریان ورودی به اتاق آزمون استفاده شده بود. مقطع اتاق آزمون مستطیل شکل و به ابعاد ۷۴ در ۱۱۲ سانتی‌متر بوده و با توجه به اینکه بیشترین سرعت ممکن در آن مقطع (m/sec) ۷۴ می‌باشد، محدودهٔ رینولدز ۳ تا ۴ میلیون در اتاق آزمون این تونل باد در دسترس است.

در طراحی دیفیوزر برای یک تونل باد مدار باز باید توجه شود که این بخش تا حدود زیادی نسبت به خطاهای طراحی حساس است. زیرا کوچک‌ترین اشتباه ممکن است منجر به جدایش جریان در این بخش شود. زاویه مخروط معادل و نسبت سطح مقاطع بایستی به گونه‌ای انتخاب شوند تا جدایشی به شکل پایا یا متناوب در دیواره‌های دیفیوزر رخ ندهد. جدایش در دیفیوزر می‌تواند ارتعاشات ایجاد کند، در فن و مقطع آزمون باعث نوسانی شدن جریان شود و در نتیجه تلفات تونل باد افزایش یابد. در جایی که جریان ورودی به دیفیوزر یکنواخت است، می‌توان زوایای بزرگ‌تری برای دیفیوزر در نظر گرفت. اما جریان هوایی که از اتاق آزمون وارد دیفیوزر می‌شود غیریکنواخت است. عواملی همچون وجود مدل و نگهدارنده آن در اتاق آزمون، ناحیه دنباله حاصله از دستگاه‌های اندازه‌گیری در اتاق آزمون و ... از دیگر عوامل ایجاد جریان غیریکنواخت در ورودی دیفیوزر هستند.

نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی، زاویه مخروط معادل و همچنین نسبت طول دیفیوزر به شعاع معادل سطح مقطع بالادست برای چندین تونل باد زیرصوت در شکل (۲) نمایش داده شده است. لازم به توضیح است که در محاسبه طول دیفیوزر اندازه خط مستقیمی که مرکز سطح ورودی را به مرکز سطح خروجی متصل می‌سازد، در نظر گرفته شده است. همچنین شعاع معادل به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Re = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3)$$

در مرجع یاد شده [۱۳] ناحیه‌ای مناسب برای طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر بر حسب پارامترهای هندسی پیشنهاد شده است. این ناحیه در شکل (۴) نمایش داده شده است. استفاده از حد بالای ناحیه مجاز برای دیفیوزرهایی که دارای دیواره‌های گوشه‌گرد و حد پایین ناحیه نشان داده شده برای دیفیوزرهایی با گوشه تیز توصیه شده است.

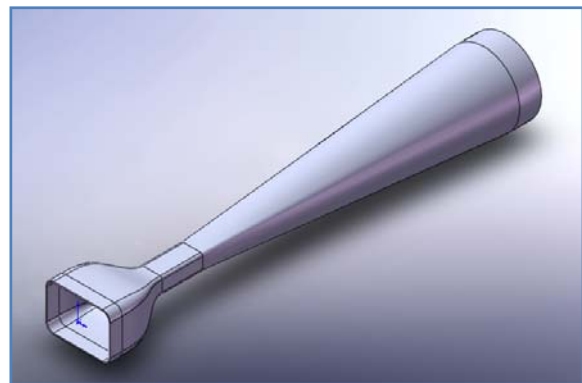
همان‌طور که در بخش معرفی تونل باد مورد مطالعه بیان شد، مشخصات سطح مقطع ورودی دیفیوزر معین است. ابعاد اتاق آزمون تونل باد یاد شده ( $195\text{cm} \times 140\text{cm}$ ) بوده و بنابراین و بر طبق معادله (۳) شعاع معادل این مقطع برابر  $0.93$  متر خواهد بود. همچنین سطح مقطع ورودی دیفیوزر نیز برابر  $2/73$  مترمربع خواهد بود. در خروجی دیفیوزر نیز سه فن مکشی قرار دارند. قطر مقطع ورودی هر یک از این فن‌های محوری برابر  $292$  سانتی‌متر است. بنابراین سطح مقطع خروجی دیفیوزر در حالت کمینه (با فرض سطح مقطعی که محاط به ورودی سه فن باشد) برابر  $20/1$  مترمربع خواهد بود. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که نسبت سطح مقطع خروجی به سطح مقطع ورودی در دیفیوزر مورد بحث حدوداً برابر  $7/35$  خواهد بود.

اطلاعات مربوط به ابعاد کلی دیفیوزر (سطح مقطع خروجی و طول) در جدول (۱) بیان نشده است. این اطلاعات با بررسی حالات مختلف در ادامه کار نهایی خواهد شد. شکل (۱) شماتیکی از تونل باد مورد بررسی را نمایش می‌دهد. در این شکل سطح مقطع دایروی برای خروجی دیفیوزر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- ابعاد بخش‌های اصلی تونل باد

اتاق آزمون	نازل	اتاق آزمون	اتاق آزمون
عرض در مقطع ورودی (m)	۵/۸۶	۱/۹۵	۵/۸۶
ارتفاع در مقطع ورودی (m)	۴/۱۹	۱/۴۰	۴/۱۹
عرض در مقطع خروجی (m)	۵/۸۶	۱/۹۵	۱/۹۵
ارتفاع در مقطع خروجی (m)	۴/۱۹	۱/۴۰	۱/۴۰
عمق (m)	۱/۱۰	۵/۶۰	۳/۷۰
سطح مقطع ورودی ( $m^2$ )	۲۴/۵۵	۲/۷۳	۲۴/۵۵
سطح مقطع خروجی ( $m^2$ )	۲۴/۵۵	۲/۷۳	۲/۷۳
نسبت سطح مقاطع	۱	۹	۱

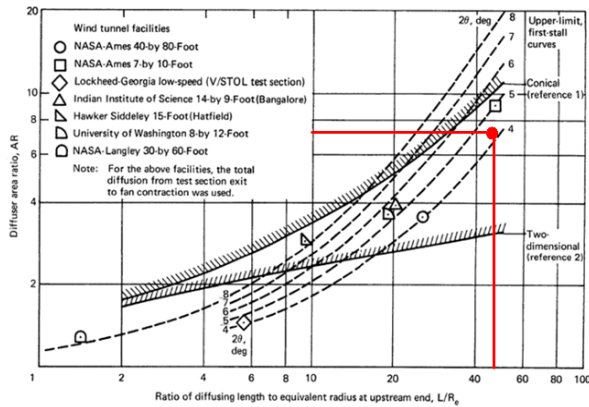
در طراحی دیفیوزر سرعت مطلوب در اتاق آزمون تونل باد برابر  $95\text{ (m/s)}$  فرض می‌شود. در این سرعت و در نظر گرفتن ارتفاع  $1200$  متری از سطح دریا (ارتفاع حدودی شهر تهران که برای نصب تونل باد مفروض است)، در اتاق آزمون ماخ نزدیک به  $0.3$  خواهد بود.



شکل ۱- شماتیک تونل باد مفروض مطالعاتی

### طراحی مهندسی دیفیوزر

در این بخش هدف طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر تونل باد مدار باز معرفی شده بر اساس یکی از گزارش‌های فنی ناساست [۱۳]. در گزارش فنی یادشده راهکارهایی برای طراحی آیرودینامیکی و تخمین افت‌های اجزای تونل بادهای زیرصوت ارائه شده است. همچنین راهنمایی‌های کلی برای طراحی دیفیوزر، نازل، گوشه‌ها (مربوط به تونل بادهای مدار بسته) و سایر بخش‌های مهم تونل باد آورده شده است. روش ارائه شده در این مرجع برای تحلیل افت، ترکیبی از راه‌کارهای تحلیلی و تجربی است.



شکل ۴- نمایش نقطه طراحی دیفیوزر مورد طراحی در مقایسه با سایر تونل‌های باد سطح جهان [۱۲]

## طراحی دیفیوزر با کمک دینامیک سیالات محاسباتی

در بخش‌های قبل مسئله طراحی مهندسی دیفیوزر برای یک تونل باد زیرصوت مکشی معرفی شد و با استفاده از راهنماهای موجود در مراجع یک طراح اولیه برای دیفیوزر استخراج شد. در این بخش هدف اصلاح طرح اولیه و انتخاب بهترین گزینه از میان طرح‌های موجود با کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد.

**مدل‌سازی فن محوری با روش مدل‌سازی سه بعدی پره‌ها**  
در اصطلاح فن به توربوماشینی اطلاق می‌شود که با اندکی افزایش فشار قادر است جریان پیوسته‌ای از سیال گاز ایجاد نماید. فشار سیال در بیش‌تر فن‌هایی که در صنعت به کار برده می‌شوند در حدود فشار هوای محیط است.

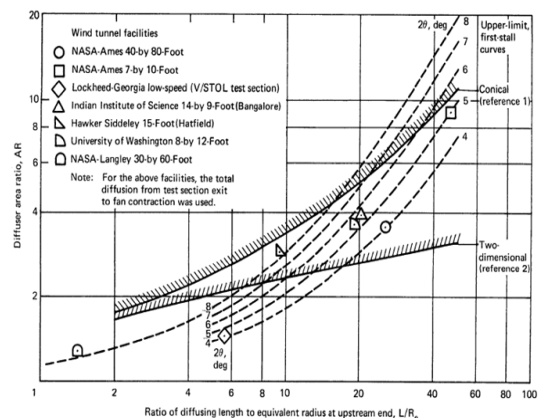
با توجه به هزینه‌های زمانی و اقتصادی تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعه عددی مشخصات آیرودینامیکی سیستم‌های شامل فن، مورد توجه است. برای مدل‌سازی عددی فن محوری چندین روش وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های سرعت ثابت<sup>۳</sup> [۱۴]، پرش فشار<sup>۴</sup> [۱۵]، دیسک عملگر<sup>۵</sup> [۱۶] (افزودن ترم چشمه یا چاه به معادلات مومنتوم سیال) و مدل‌سازی سه‌بعدی پره‌ها [۱۷] اشاره کرد. در میان روش‌های نامبرده، راهکار مدل‌سازی سه‌بعدی پره‌ها با وجود هزینه بالای محاسباتی و نیازمندی به تولید شبکه پیچیده محاسباتی به بهترین نحو، اثرات سه‌بعدی چرخش جریان را مدل می‌کند. بنابراین جهت استفاده در این مقاله انتخاب شده است. امروزه، چندین کد و نرم‌افزار تجاری دینامیک سیالات

3. Constant velocity  
4. Pressure jump  
5. Actuator disk

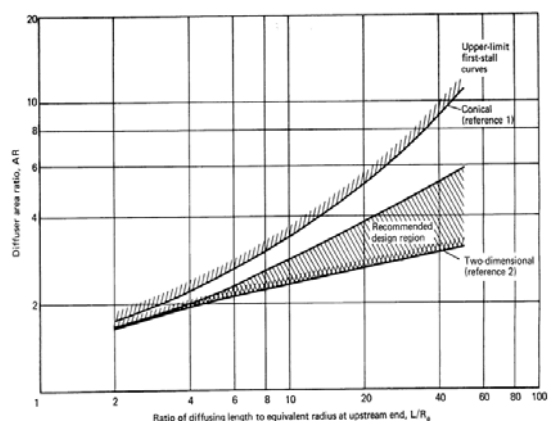
در انتخاب طول دیفیوزر ذکر چند نکته ضروری است. هرچه طول دیفیوزر انتخابی بیشتر باشد هزینه ساخت تونل باد بیشتر خواهد بود و ابعاد کلی آن نیز افزایش خواهد یافت. در پژوهش حاضر سعی بر این است که تا جایی که امکان دارد از ابعاد کلی تونل باد کاسته شود. از طرف دیگر انتخاب طول بزرگ برای دیفیوزر این اطمینان را به طراح می‌دهد که از خطر جدایش جریان در این مقطع و افت شدید فشار کل کاسته خواهد شد. از سوی دیگر، افت‌های اصطکاکی نیز با افزایش طول دیفیوزر افزایش خواهند یافت. به بیان دیگر طراح بایستی در طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر به نکات فراوانی توجه داشته باشد.

با توجه به اطلاعات ارائه شده در شکل‌های (۲) و (۳) بازه قابل قبول برای نسبت طول به شعاع معادل سطح مقطع ورودی دیفیوزر ( $\frac{L}{R_e}$ ) بایستی در بازه ۳۵ تا ۶۰ انتخاب شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش نسبت شعاع به سطح مقطع ورودی دیفیوزر برابر ۴۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقدار شعاع معادل سطح مقطع ورودی دیفیوزر (۰/۹۳ متر) طول دیفیوزر طراحی شده حدود ۴۲ متر خواهد بود. در شکل (۴) نقطه طراحی در مقایسه با طراحی‌های مورد استفاده برای سایر تونل‌های بادهای سطح جهان نمایش داده شده است.



شکل ۲- اطلاعات هندسی دیفیوزر مربوط به چندین تونل باد موجود در سطح جهان [۱۲]



شکل ۳- ناحیه پیشنهاد شده برای طراحی آیرودینامیکی دیفیوزر [۱۳]

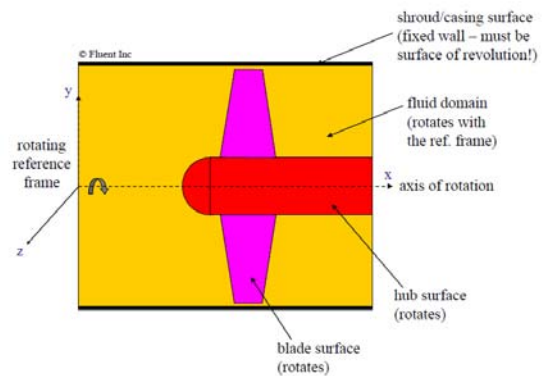
شده است ولی اطلاعات جزئی تر مانند پروفیل پره های روتور و استاتور مشخص نشده اند [۱۸]. برای تحلیل جریان فن ها با استفاده از روش های دینامیک سیالات عددی پیش از هر چیز لازم است تا نقشه های دقیق پره ها بدست آید. برای بدست آوردن ابعاد دقیق پره روتور فن از دستگاه تعیین مختصات نوری (OCMM<sup>A</sup>) استفاده شده است. برای این منظور یکی از پره های روتور فن یاد شده جدا گردیده تا به صورت دقیق و سه بعدی با کمک دستگاه تعیین مختصات نوری ابعاد و مدل هندسی سه بعدی آن استخراج گردد. شکل (۶) پره جدا شده را در حین فرایند تعیین مختصات نمایش می دهد.



شکل ۶- پره روتور فن محوری در زمان داده برداری نوری به منظور مشخص شدن مدل دقیق هندسی

پس از نهایی شدن فرایند داده برداری نوری و ایجاد فایل از ابر نقاط تشکیل دهنده سطح پره، نوبت به کارگیری نرم افزار تخصصی CAD جهت ارائه مدل هندسی ساخته شده از داده های ابر نقاط حاصل از فرایند ابعاد برداری است. برای مدل سازی پره به نرم افزاری نیاز است که قابلیت مدل سازی پیشرفته با ورودی ابر نقاط (فایل های \*.stl و \*.igs) را دارد. نتیجه مقدماتی، تبدیل ابر نقاط به یکی از پره های روتور فن می باشد که پس از آن پره ها به تعداد ۱۰ عدد و با رعایت تقارن محوری در کنار یکدیگر قرار داده شد و در نتیجه، کل روتور فن مدل سازی هندسی می شود. شکل (۷) نمای شماتیک مدل نهایی روتور فن را نشان می دهد. همان طور که پیش از این بیان شد فن محوری مورد بحث شامل یک ردیف پره های روتور و یک ردیف پره های استاتور می باشد. پره های استاتور در ریشه و نوک به داکت فن به صورت دائمی متصل می باشند و لذا انجام مراحل شرح داده شده در مورد استاتور عملی نخواهد بود. برای این منظور سعی شد تا با استفاده از گروهی از روش های تجربی و هندسی پروفیل پره های استاتور حاصل گردد. لازم به توضیح است که پره های

محاسباتی برای مطالعه فن با مدل سازی سه بعدی پره ها وجود دارد که در آن ها از شبکه دورانی استفاده می شود. یکی از بهترین نرم افزارها در این زمینه فلوئنت<sup>۶</sup> است. این نرم افزار می تواند انواع مسائل سیالاتی را، که در آن ها جابه جایی یا چرخش اجزا وجود دارد، حل کند. یکی از روش های مدل سازی این نرم افزار که به نام چهارچوب دورانی واحد<sup>۷</sup> شناخته شده است، برای مدل سازی جریان فن محوری به کار می رود. در شکل (۵) جزئیات پیاده سازی این مدل در دستگاه مختصات کارترین نمایش داده شده است.



شکل ۵- جزئیات اعمال شرایط مرزی در روش مدل سازی سه بعدی پره ها [۱۷]

در مدل سازی سه بعدی پره ها، در چهارچوب یک دستگاه مختصات دورانی، از فرمولاسیون سرعت مطلق استفاده می شود. برای انتقال سرعت ها از دستگاه مختصات ثابت به متحرک از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\vec{v}_r = \vec{v} - (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (4)$$

در معادله بالا  $\vec{v}_r$  سرعت نسبی (سرعتی که در دستگاه مختصات دورانی دیده می شود)،  $\vec{v}$  سرعت مطلق (سرعت در دستگاه مختصات ثابت)،  $\vec{\Omega}$  سرعت زاویه ای و  $\vec{r}$  بردار موقعیت به نسبت محور دوران می باشند. معادله بقای مومنوم در دستگاه مختصات دورانی برابر است با:

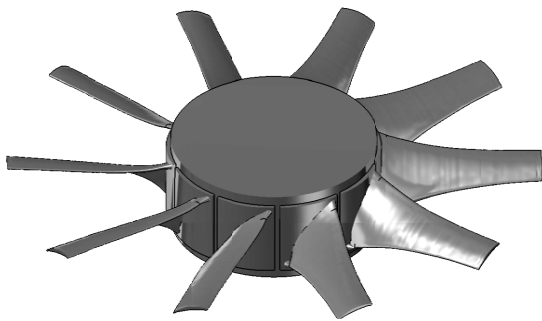
$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho (\vec{\Omega} \times \vec{v}) - \nabla \bar{t} = -\nabla p + \vec{f} \quad (5)$$

جمله  $(\vec{\Omega} \times \vec{v})$  در معادله بالا بیانگر شتاب های کربولیس و مرکزگرا می باشد. همان طور که اشاره شد، جمله  $\vec{f}$  نیروی حجمی یا به عبارت دیگر جمله چشمه در معادله مومنوم است. این جمله در مدل سازی سه بعدی پره ها با استفاده از دستور شبکه دورانی برابر صفر در نظر گرفته می شود.

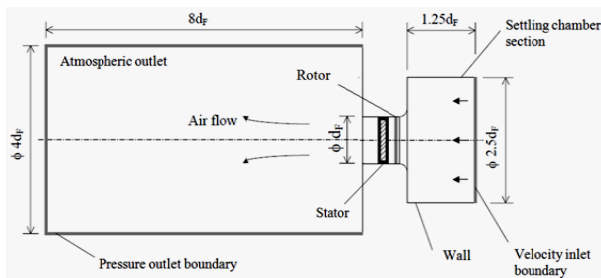
سه فن برای سیستم رانش تونل باد حاضر، در نظر گرفته شده است. این فن های محوری ساخت شرکت LTG بوده و مدل آن ها (VAN-2500) می باشند. در کاتالوگ فنی این شرکت ابعاد کلی این فن ها مانند قطر بدنه، ارتفاع پره ها و طول بخش های مختلف آورده

6. Fluent

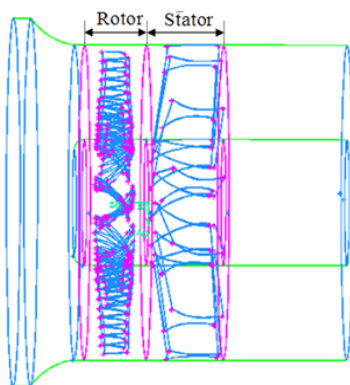
7. Single reference frame



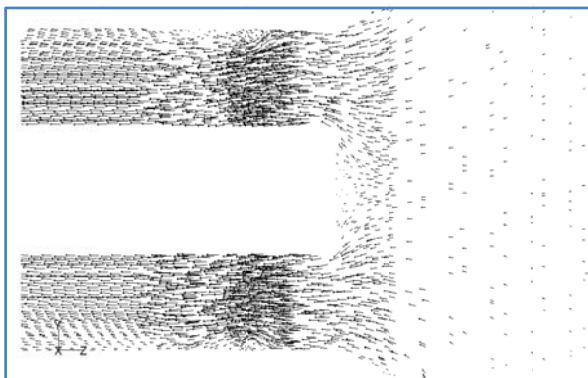
شکل ۷- مدل هندسی نهایی روتور فن



شکل ۸- شماتیک شبکه محاسباتی مورد استفاده برای استخراج منحنی عملکرد فن محوری [۲۰]



شکل ۹- مدل سازی هندسی روتور و استاتور در روش مدل سازی سه بعدی پرها در نرم افزار گمبیت



شکل ۱۰- بردارهای سرعت در نزدیکی روتور و استاتور (مدل سازی سه بعدی پرها)

استاتور از یک ورق فلزی که در ریشه و نوک با پرچ به داکت فن متصل هستند، ساخته شده است و ضخامت آن یکنواخت و اندک است.

### نتایج مدل سازی عددی فن محوری

جهت شبیه سازی شرایط آزمون آزمایشگاهی از استاندارد BS 848 استفاده شده است [۱۹]. در این استاندارد جزئیات روش آزمون فن و نحوه اندازه گیری ها توضیح داده شده است. در شکل (۸) ابعاد شبکه محاسباتی مورد استفاده برای مدل سازی فن محوری نمایش داده شده است. ابعاد اتاقک آرامش با توجه به ابعاد مشخص شده در استاندارد BS 848 انتخاب شده است. همچنین سعی شده تا مرزهای اتمسفر به اندازه کافی دور در نظر گرفته شوند. لازم به توضیح است که، مشابه چنین شبکه محاسباتی پیش از این توسط فان دراسپای و همکاران [۲۰] مورد استفاده قرار گرفته بود. در شکل (۹) نحوه مدل سازی هندسی روتور و استاتور در نرم افزار گمبیت<sup>۹</sup> نمایش داده شده است.

شرایط مرزی برای شبکه محاسباتی بر طبق آنچه در شکل های (۵) و (۸) ارائه شد، اعمال شده است. دیوارهای مربوط به شرایط اتمسفریک با شرط مرزی فشار خروجی<sup>۱۰</sup> مشخص شده اند و مقدار فشار نسبی<sup>۱۱</sup> آن ها برابر صفر وارد شده است. در صفحه ورودی اتاقک آرامش شرط مرزی ورودی سرعت<sup>۱۲</sup> اعمال شده است و برای سرعت پروفیل ورودی یکنواخت در نظر گرفته شده است. سایر دیوارها شامل جدار محفظه فن نیز با شرط مرزی دیوار مدل شده اند. در رابطه با جزئیات حل عددی، لازم به شرح است که معادلات حاکم با روش SIMPLE و با گسسته سازی های مرتبه اول بالادست<sup>۱۳</sup> (جهت بهبود شرایط همگرایی حل عددی) حل گردیدند. برای معیار همگرایی تمامی اجزای بررسی شده است که دبی جرمی ورودی و خروجی تا ۴ رقم اعشار یکسان باشند و همچنین مقدار باقیمانده های مؤلفه های سرعت و آشفتگی (مدل  $k - \epsilon$ ) تا حد امکان کاهش یابد (بیشتر مواقع تا  $10^{-6}$ ).

بردارهای سرعت در نزدیکی روتور و استاتور در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است بزرگی سرعت از ریشه تا نوک پرها با توجه به تأثیر مؤلفه سرعت دورانی افزایش می یابد. در شکل (۱۱) منحنی عملکرد فن محوری با استفاده از مدل سازی سه بعدی پرها نمایش داده شده است و حاصل کار با داده های منتشر شده شرکت سازنده مقایسه شده است. در کل به نظر می رسد روند تغییرات اختلاف فشار بر حسب دبی با استفاده از روش مدل سازی سه بعدی پرها با دقت قابل قبولی بدست می آید.

9. Gambit  
10. Pressure outlet  
11. Gauge pressure  
12. Velocity inlet  
13. Upwind

استفاده شده است. در این بخش شرایط مرزی به گونه‌ای اعمال شده است که در مقطع آزمون ماخ نزدیک ۰/۳ شود. برای اعمال شرط مرزی فشار در خروجی تونل باد بخشی از فضای دور دست مدل شده است. همچنین کلیه دیوارهای دیفیوزر، اتاق آزمون و دیواره‌های فن صاف<sup>۱۴</sup> فرض شده و برای آن‌ها شرط عدم لغزش اعمال شده است. مدل آشفتگی استفاده شده  $k - \epsilon$  بوده است و از تابع دیواره (wall function) استفاده گردید. با توجه به راهنمای نرم‌افزار محاسباتی در این حالت مقدار  $y^+$  در محدوده ۳۰ تا ۳۰۰ قابل قبول است. در موارد محاسباتی مختلف میزان  $y^+$  در محدوده یاد شده بوده است. با توجه به محدودیت‌های محاسباتی در تولید شبکه از لایه مرزی استفاده نشده است.

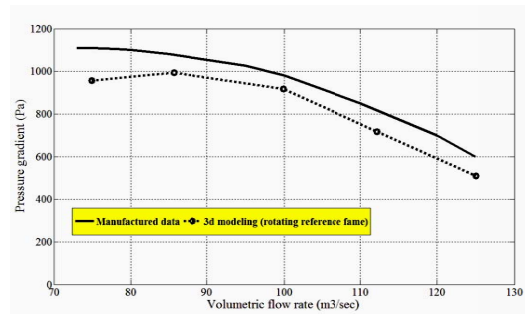
شبیه‌سازی‌های شبکه‌های محاسباتی یادشده با استفاده از آزمایشگاه پردازش موازی (HPCL) دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. پردازنده‌های هر واحد محاسباتی این آزمایشگاه دارای پردازنده‌های (2x Intel Pentium4 3.0 GHz 2 M) است که هر کدام شامل ۸ هسته محاسباتی و ۸ GB RAM می‌باشند.

در جدول (۳) مقادیر افت فشار کل در تمامی حالات بررسی شده گزارش شده است. همان‌طور که از نتایج ارائه شده مشخص است، با افزایش مقادیر زاویه مخروط معادل و یا به عبارت دیگر کاهش طول دیفیوزر مقدار افت فشار در دیفیوزر افزایش می‌یابد.

جدول ۳- مقادیر افت فشار کل در دیفیوزر (بررسی تاثیر زاویه مخروط معادل)

زاویه مخروط معادل ( $\theta$ )	شرایط کاری	افت فشار کل دیفیوزر (Pa)
۴ درجه	شرایط کاری آزاد	۱۶۰
	آزمون جسم مکعبی	۳۹۱/۵
۵ درجه	آزمون جسم کروی	۱۲۸/۶
	شرایط کاری آزاد	۲۲۱
۶ درجه	آزمون جسم مکعبی	۴۹۹/۸
	آزمون جسم کروی	۱۲۴/۳
۶ درجه	شرایط کاری آزاد	۳۴۶/۷
	آزمون جسم مکعبی	۶۳۲/۴
	آزمون جسم کروی	۱۵۵/۹

کوتاه شدن طول دیفیوزر باعث کاهش ابعاد کلی تونل باد و کاهش هزینه ساخت و مواد اولیه خواهد شد. ولی از سوی دیگر همان‌طور که نشان داده شد، این مسأله تلفات بیشتر و هزینه عملکرد بیشتر تونل باد را به همراه خواهد داشت. تذکر این نکته ضروری است که با کاهش طول دیفیوزر تلفات اصطکاک در دیفیوزر به مراتب کمتر می‌شود، ولی تلفات ناشی از دیفیوزر ۲ تا ۳



شکل ۱۱- منحنی عملکرد فن محوری (مدل‌سازی سه بعدی پره‌ها)

## طراحی دیفیوزر

هدف در این بخش طراحی دیفیوزر با بررسی حالات مختلف هندسی مانند شیب، سطوح مقاطع و ... و در نهایت معرفی دیفیوزری با بهترین عملکرد است. در ادامه، پارامترهای مختلف هندسی دیفیوزر با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است و در نهایت طرح بهینه معرفی شده است.

## بررسی تأثیر تغییر زاویه مخروط معادل

در بخش قبل و طراحی اولیه دیفیوزر طول ۴۲ متر و زاویه مخروط معادل ( $2\theta$ ) حدود ۴ درجه پیشنهاد گردید. این طرح حالت ایده‌آل طراحی است، در این بخش هدف مطالعه رفتار جریان در دیفیوزر با طول‌های کوچک‌تر یا به عبارت دیگر زوایای مخروط معادل بزرگ‌تر است. همان‌طور که توضیح داده شد از دیدگاه هزینه طرح و محدودیت‌های نصب، هرچه طول دیفیوزر کوتاه‌تر باشد، مطلوب‌تر است. برای این منظور به‌ازای سه زاویه مختلف، طول دیفیوزر با استفاده از تعریف زاویه مخروط معادل محاسبه شده است. در جدول (۲) اطلاعات هندسه‌های بررسی شده ارائه شده است.

جدول ۲- مدل‌های بررسی شده به منظور مطالعه تأثیر تغییر زاویه مخروط معادل

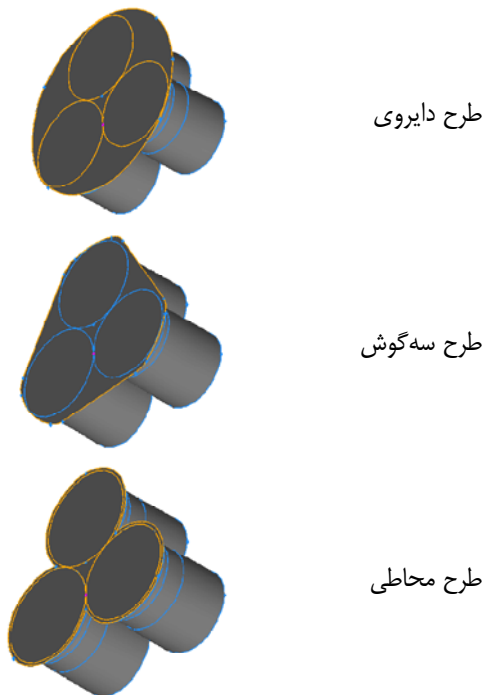
زاویه مخروط معادل (درجه)	۸	۱۰	۱۲
طول دیفیوزر (m)	۳۲/۲۰	۲۵/۷	۲۱/۴

به منظور بررسی عملکرد دیفیوزر در شرایط کاری مختلف به‌ازای هر یک از طرح‌های ارائه شده در جدول (۲) در سه حالت وجود جسم کروی در مقطع آزمون، وجود جسم مکعبی در مقطع آزمون و شرایط کاری آزاد، جریان در تونل باد مطالعه شده است. ابعاد جسم کروی و مکعبی یاد شده به گونه‌ای است که حدوداً ۹ درصد از سطح مقطع آزمون را شامل می‌شود.

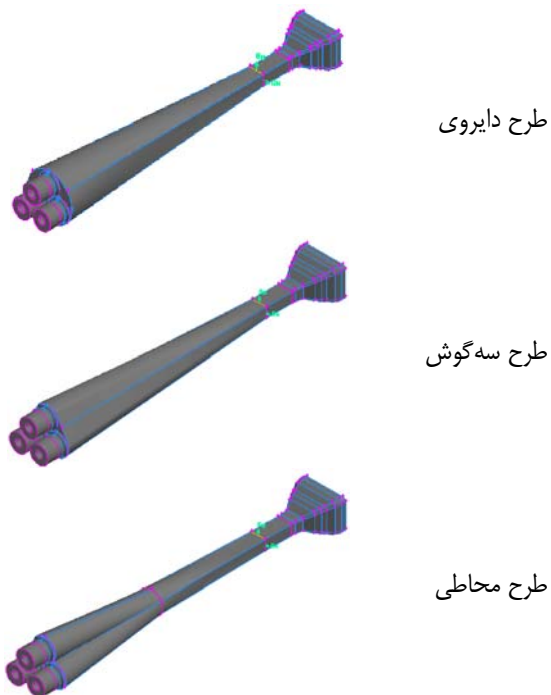
با توجه به شرایط هندسی هر حالت (وجود و یا عدم وجود جسم در مقطع آزمون و همچنین طول دیفیوزر) از شبکه محاسباتی شامل ۲/۵ تا ۳/۵ میلیون سلول به منظور مدل‌سازی تونل باد،



طرح نمایش داده شده در شکل (۱۳) شامل حدود ۳/۵ میلیون سلول می‌باشند. با استفاده از شرایط مرزی اعمال شده، دبی جریان در تونل توسط حل گر (نرم‌افزار فلوئنت) محاسبه خواهد شد.



شکل ۱۲- طرح‌های پیشنهادی برای مقطع خروجی دیفیوزر



شکل ۱۳- هندسه تونل باد با استفاده از طرح‌های مختلف برای سطح مقطع خروجی دیفیوزر

برابر تلفات در کانال با مقطع ثابت است. دلیل این مطلب، اثرات لایه‌های مرزی و ایجاد گرادیان فشار معکوس است. جریان جدا شده در دیواره‌ها بر جریان نیرو اعمال می‌کند. با مطالعه دقیق نتایج حل دینامیک سیالات محاسباتی (به علت محدودیت در حجم مطالب امکان ارائه همه کانتورها و داده‌های حاصله وجود ندارد) جریان در دیفیوزری با زاویه ۴ درجه تقریباً ایده‌آل است، ولی پس از آن رفته رفته آثار جدایش در دیواره‌ها پدید می‌آید. به همین دلیل در ادامه روند بررسی حالات مختلف طراحی، طول دیفیوزر برابر ۳۲/۲ متر در نظر گرفته می‌شود. برای سطح مقطع دایروی به‌ازای این طول، زاویه مخروط معادل دیفیوزر ( $\theta$ ) برابر ۴ درجه خواهد بود. در ادامه روند طراحی با ثابت در نظر گرفتن طول، تاثیر سایر پارامترها بررسی می‌گردد.

### بررسی تأثیر تغییر هندسه مقطع خروجی دیفیوزر

نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی ( $A_R$ ) و همچنین زاویه مخروط معادل ( $\theta$ ) دو پارامتر مهم هندسی در طراحی دیفیوزر هستند. در تونل باد معرفی شده سطح مقطع ورودی به دیفیوزر، یا به عبارت دیگر سطح مقطع خروجی اتاق آزمون، ثابت می‌باشد. برای تغییر نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی بایستی حالت‌های گوناگون در مقطع خروجی بررسی گردد. به همین منظور سه طرح برای سطح مقطع خروجی دیفیوزر پیشنهاد شده است که در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند. در هر سه طرح نمایش داده شده در شکل (۱۲) فضای بین فن‌ها بسته است و تنها مجرای خروجی هوا سطح دایروی ورودی فن‌ها می‌باشد. نخستین طرح شکل یادشده مقطع دایروی را نمایش می‌دهد. این مقطع در تمامی بررسی‌های بخش قبل مورد استفاده قرار گرفت. تونل باد معرفی شده دارای مشکل کلی بزرگ بودن نسبت سطح مقطع خروجی به ورودی می‌باشد. این نسبت معمولاً بین ۲/۵ تا ۳ می‌باشد [۱۳]، ولی با استفاده از سطح مقطع دایروی نمایش داده این نسبت بزرگ‌تر از ۱۱ خواهد بود. در طرح‌های سه‌گوش و محاطی به نوعی سعی شده است تا با کاهش سطح مقطع خروجی این نسبت کاهش پیدا کند. در شکل (۱۳) هندسه مدل شده برای شبیه‌سازی جریان در تونل باد با استفاده از طرح‌های معرفی شده در شکل (۱۲)، نمایش داده شده است.

در این بخش، با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی پره‌های روتور و استاتور و دستور شبکه دورانی سه فن در انتهای دیفیوزر تونل باد مدل شده‌اند. شرایط مرزی مورد استفاده در این بخش در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. در ورودی تونل باد و همچنین در پشت فن‌های محوری شرط مرزی فشار خروجی (اتمسفر) اعمال شده است. شبکه‌های محاسباتی تولید شده برای شبیه‌سازی سه

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴) و بحث‌های مطرح شده در این بخش طرح دیفیوزر دایروی در میان سایر انتخاب‌ها برگزیده می‌شود. نتایج نشان دادند که با استفاده از این طرح می‌توان به بالاترین دبی در تونل و در نتیجه بالاترین ماخ در مقطع آزمون دست یافت.

جدول ۴- مقایسه طرح‌های دیفیوزر (بررسی تأثیر تغییر هندسه سطح مقطع خروجی)

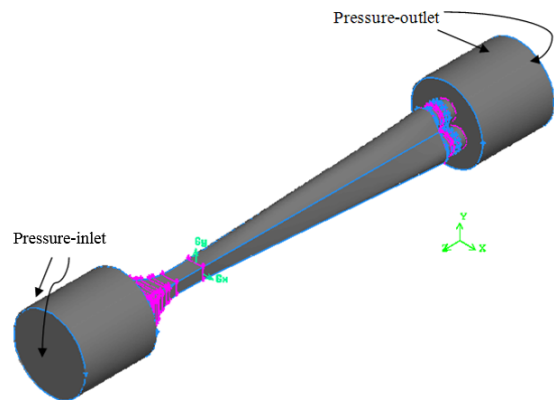
افت فشار کل (Pa)	افت فشار بخش‌های مختلف تونل باد (Pa)			دبی حجمی ( $m^3/sec$ )	شرایط کاری	
	دیفیوزر	مقطع آزمون	نازل			
۴۴۰/۳	۱۳۸/۷	۲۶۴/۲	۳۷/۴	۳۴۳/۷	آزاد	طرح دایروی
۴۸۴/۸	۱۱۹/۸	۲۵۷/۴	۷/۶	۱۶۹/۵	جسم مکعبی	
۴۴۵/۷	۱۱۶/۴	۳۱۳/۵	۱۵/۷	۱۹۹/۸	جسم کروی	
۴۳۶	۱۸۹/۵	۲۱۶/۵	۳۰	۲۲۰/۸	آزاد	طرح سه گوش
۴۸۰/۳	۱۰۴/۸	۲۶۷/۲	۸/۳	۱۶۷/۴	جسم مکعبی	
۴۴۴/۴	۱۳۷/۶	۲۹۶/۷	۱۶/۱	۱۹۰/۳	جسم کروی	
۴۴۹/۶	۲۰۶/۲	۲۱۰/۵	۳۲/۹	۲۱۷/۲	آزاد	طرح محاطی
۴۹۲/۷	۱۴۱/۸	۳۴۱/۷	۱۱/۲	۱۶۳/۱	جسم مکعبی	
۴۵۸	۱۸۰/۳	۲۵۵/۲	۲۲/۵	۱۸۴/۶	جسم کروی	

### مطالعه اثر مخروط‌های دربرگیرنده الکتروموتور فن‌ها

در انتهای دیفیوزر مخروط‌هایی وجود دارند که الکتروموتورهای فن‌های محوری را در بر می‌گیرند. در این بخش هدف، مطالعه اثر این مخروط‌ها بر عملکرد تونل باد مورد طراحی و در صورت نیاز اصلاح طرح دیفیوزر پیشنهادی با در نظر گرفتن بخش یاد شده می‌باشد.

در جدول (۵) نتایج مدل‌سازی تونل باد با در نظر گرفتن مخروط‌های دربرگیرنده فن‌های محوری ارائه شده است. مدل‌سازی در این بخش با در نظر گرفتن شرایط کاری آزاد و همچنین وجود جسم مکعبی در اتاق آزمون انجام شده است. در بخش‌های قبل نشان داده شد که در مقایسه میان شرایط کاری وجود جسم مکعبی و یا کروی در مقطع آزمون تونل باد، شرایط وجود جسم مکعبی بحرانی‌تر است. در این بخش نیز از شبکه‌های محاسباتی شامل نزدیک به ۳/۵ میلیون سلول استفاده گردید و همچنین شرایط مرزی اعمال شده مطابق شکل (۱۴) است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها که در جدول (۵) آورده شده، می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت کلی با در نظر گرفتن مخروط‌ها دبی حجمی سیال کاهش یافته و همچنین افت فشار کلی در داخل تونل باد افزایش خواهد یافت. در نتیجه علت افزایش افت فشار می‌توان به تلفات اصطکاکی جریان در دیواره‌ی مخروط‌ها اشاره کرد.



شکل ۱۴- شرایط مرزی اعمالی در شبیه‌سازی تونل باد

مطابق راه‌کار به کار رفته در بخش قبل (بررسی اثر زاویه مخروط معادل دیفیوزر) در اینجا نیز برای هر یک از طرح‌های پیشنهاد شده عملکرد تونل باد در سه حالت: شرایط کاری آزاد، وجود جسمی مکعبی و همچنین وجود جسمی کروی در مقطع آزمون تونل باد مطالعه شده است. برای بررسی دقیق‌تر سه طرح معرفی شده لازم است تا افت فشار کل در طول دیفیوزر و سایر بخش‌های تونل باد محاسبه شود. برای این منظور فشار متوسط در صفحات ورودی و خروجی هر بخش محاسبه شده است. افت فشار بخش‌های مختلف تونل باد در طرح‌های مختلف در جدول (۴) گزارش شده است.

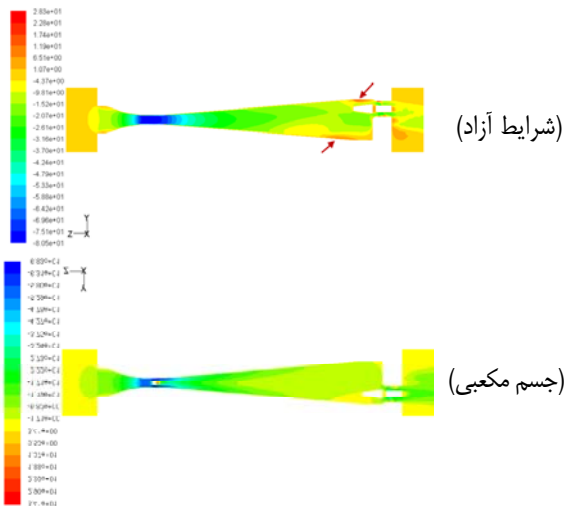
لازم به توضیح است که در محاسبه افت فشار کل در تونل باد از اثر توری‌ها و شبکه‌های لانه زنبوری که در اتاقک آرامش نصب می‌شوند، صرف نظر شده است. با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده از شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴)، نتایج زیر حاصل می‌شوند:

- در صورتی که معیار انتخاب رسیدن به بیشترین دبی یا به عبارت دیگر بیشترین سرعت در مقطع آزمون باشد، طرح دایروی مناسب‌تر از سایر طرح‌ها ارزیابی می‌شود.
- در صورتی که معیار انتخاب کمترین افت فشار در تونل باد باشد، طرح سه گوش مناسب‌تر از سایر طرح‌ها می‌باشد. البته لازم است به این نکته توجه شود که اختلاف میان طرح‌های مختلف اندک می‌باشد.
- طرح محاطی بیشترین افت را دارد. می‌توان چنین توجیه کرد که با توجه به سطح بیشتر دیواره‌های دیفیوزر در این طرح، تلفات اصطکاکی بیشتر می‌باشد. همچنین کمترین دبی حجمی سیال در این طرح گزارش می‌شود.
- در مقایسه شرایط کاری تونل با جسم مکعبی و جسم کروی، جسم مکعبی بحرانی‌تر است. نتایج شبیه‌سازی در این شرایط کاری دبی حجمی کمتر و افت بیشتر را نشان می‌دهند.

عملکرد تونل باد خواهد گذاشت. این اثر منفی در شرایط کاری آزاد بسیار مشهودتر است. در این شرایط کاری دبی حجمی جریان کاهش و مقدار افت فشار کل در اجزای تونل باد افزایش قابل توجهی دارند. همچنین همان‌طور که در کانتور سرعت محوری رسم شده در شکل (۱۶) مشخص شده است، در بخش‌های پایانی دیفیوزر نواحی قابل توجه جدایش جریان قابل پیش‌بینی است. بنابراین اصلاح وجود شیب صفر درجه از بخش انتهایی دیفیوزر مناسب ارزیابی نمی‌شود.

جدول ۶- مطالعه طرح شیب صفر درجه در انتهای دیفیوزر

شرایط کاری	دبی حجمی (m <sup>3</sup> /sec)	افت فشار بخش‌های مختلف تونل باد (Pa)			اقت فشار کل (Pa)
		نازل	مقطع آزمون	دیفیوزر	
آزاد	۲۴۲/۴	۳۲/۳	۲۵۰/۸	۱۶۱/۵	۴۴۴/۶
جسم مکعبی (با مخروطها)	۱۵۹/۸	۱۱/۵	۳۸۰	۱۰۱	۴۹۲/۵
آزاد	۲۱۳/۹	۲۱/۱	۱۸۸/۵	۴۰۰/۲	۶۰۹/۸
جسم مکعبی (شیب صفر درجه)	۱۵۹/۳	۱۲/۴	۲۹۴/۷	۱۸۸/۶	۴۹۵/۷

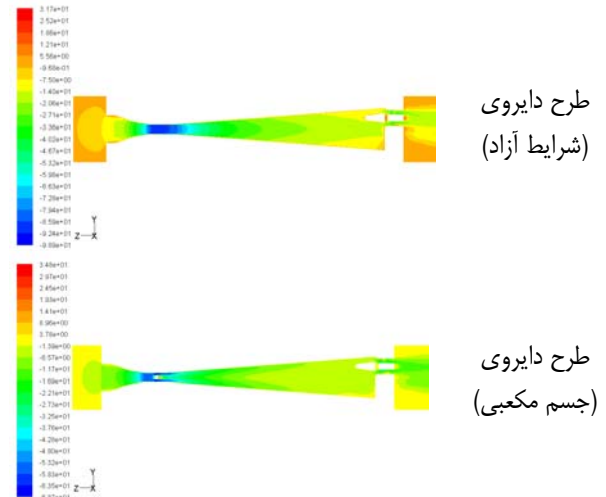


شکل ۱۶- کانتور سرعت محوری (مطالعه طرح شیب صفر درجه در بخش پایانی دیفیوزر)

### بررسی کیفیت جریان در اتاق آزمون

در بخش‌های قبل طرح‌های مختلف دیفیوزر، مزایا و معایب هریک مطالعه شد و نهایتاً طرح بهینه انتخاب گردید. نشان داده شد که طرح دایروی با زاویه مخروط معادل (θ) ۴ درجه مناسب‌ترین انتخاب می‌باشد. با توجه به رشد لایه مرزی در اتاق آزمون شیب ۰/۵ درجه در این بخش از تونل باد در نظر گرفته می‌شود. در این

با توجه به کانتورهای ارائه شده در شکل (۱۵) مشخص است که با اضافه شدن مخروط‌های دربرگیرنده به شبیه‌سازی تونل باد، در طول دیفیوزر جدایشی رخ نمی‌دهد.



شکل ۱۵- کانتور سرعت محوری (با در نظر گرفتن اثر مخروط‌های دربرگیرنده)

جدول ۵- مطالعه اثر وجود مخروط‌های در برگیرنده الکتروموتور فن‌های محوری

شرایط کاری	دبی حجمی (m <sup>3</sup> /sec)	افت فشار بخش‌های مختلف تونل باد (Pa)			اقت فشار کل (Pa)
		نازل	مقطع آزمون	دیفیوزر	
آزاد	۲۴۳/۷	۳۷/۴	۲۶۴/۲	۱۳۸/۷	۴۴۰/۳
جسم مکعبی (بدون مخروطها)	۱۶۹/۵	۷/۶	۳۵۷/۴	۱۱۹/۸	۴۸۴/۸
آزاد	۲۴۲/۴	۳۲/۳	۲۵۰/۸	۱۶۱/۵	۴۴۴/۶
جسم مکعبی (با مخروطها)	۱۵۹/۸	۱۱/۵	۳۸۰	۱۰۱	۴۹۲/۵

### بررسی طرح دیفیوزر با شیب صفر درجه در بخش انتهایی

با در نظر گرفتن مخروط‌های در برگیرنده الکتروموتورها، سطح مقطع جریان در انتهای دیفیوزر کاهش می‌یابد. برای جبران این نقیصه طرح شیب صفر درجه در انتهای دیفیوزر پیشنهاد شده است. این طرح نیز در دو شرایط کاری آزاد و وجود جسم مکعبی بررسی شده است. در جدول (۶) نتایج مدل‌سازی تونل باد با در نظر گرفتن مخروط‌های دربرگیرنده الکتروموتور فن‌های محوری برای دو طرح مختلف در انتهای دیفیوزر گزارش شده است. همچنین کانتور سرعت محوری نیز در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) و همچنین شکل (۱۶) مشخص است که طرح شیب صفر درجه در بخش انتهایی دیفیوزر تاثیر منفی بر

## نتیجه گیری

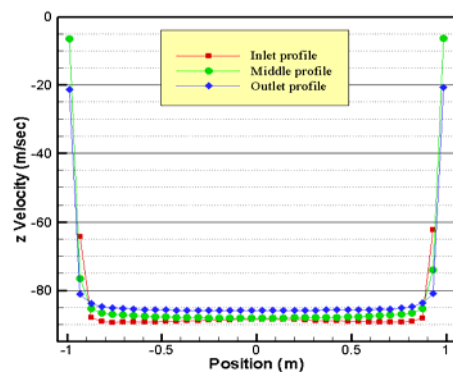
در این پروژه طراحی دیفیوزر برای یک تونل باد زیرصوت مورد توجه قرار گرفت. تونل باد مورد مطالعه از نظر مدار جریان هوا در گروه تونل‌های باد مدار باز و همچنین مکشی قرار دارد. سیستم رانش این تونل باد شامل سه فن محوری است که به منظور تأمین دبی مورد نیاز هوا به صورت موازی در کنار یکدیگر و با آرایش ستاره‌ای نصب شده‌اند. فن‌های محوری انتخاب شده هر یک شامل یک ردیف پره‌های روتور (شامل ۱۰ پره) و یک ردیف پره‌های استاتور (شامل ۱۳ پره) می‌باشند. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مدل‌سازی عددی فن محوری در شرایطی مشابه شرایط آزمون استاندارد (مطابق استاندارد BS 848)، انجام شد که مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی دارای دقت قابل قبولی بود. در این مقاله و به منظور طراحی دیفیوزر به منظور مدل‌سازی فن‌های محوری از روش مدل‌سازی سه‌بعدی پرها (شبه دورانی) استفاده شد. این روش به خوبی اثرات چرخش جریان را مدل می‌کند. در این بخش تاثیر پارامترهایی نظیر طول دیفیوزر و سطح مقطع خروجی آن بر میزان افت فشار در این کانال مطالعه گردید. نتایج مطالعات نشان داد که استفاده از سطح مقطع دایروی با توجه به تلفات انبساطی و اصطکاکی و همچنین مقدار دبی عبوری در داخل تونل باد بهترین انتخاب می‌باشد. همچنین عملکرد انتخاب نهایی در شرایط کاری آزاد و آزمون مورد ارزیابی قرار گرفت.

در صورتی که در طراحی دیفیوزر تونل باد مادون صوت مکشی معرفی شده در مقاله اگر به جای سه فن محوری از یک فن محوری با مکشی معادل مجموع سه فن معرفی شده استفاده شود، بدیهی است طراحی ایده‌آل‌تر خواهد بود. زیرا یک فن محوری سطح مقطعی کم‌تر از سه فن موازی اشغال خواهد کرد و لذا در طول یکسان زاویه مخروط معادل دیفیوزر کاهش خواهد یافت. در نتیجه احتمال جدایش جریان و افت‌های اصطکاکی کمتر می‌گردد.

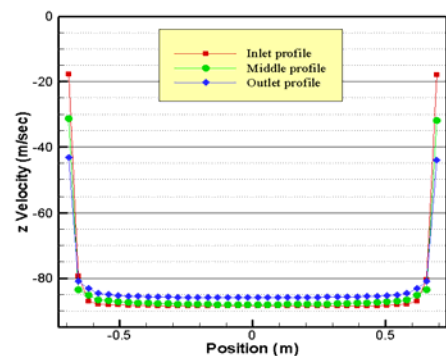
آنچه در این مقاله بدان پرداخته شد یک مسئله واقعی طراحی بود. بدین ترتیب که با در اختیار داشتن سه فن محوری با مشخصات معین تونل بادی مکشی با ابعاد مقطع آزمون ۱/۹۵ m در ۱/۴۰ m طراحی شد.

نتایج این مطالعه نشان داد که طراحی دیفیوزر در یک تونل باد مادون صوت مکشی دارای حساسیت بالایی است. طراحی یک دیفیوزر آیرودینامیکی و کم‌افت موجب افزایش ماخ جریان در مقطع آزمون خواهد شد و ظرفیت کاری تونل باد را با فرض ثابت بودن سیستم رانش، افزایش خواهد داد.

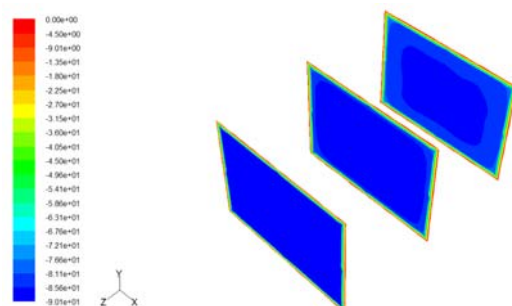
بخش کیفیت جریان در اتاق آزمون تونل باد مطالعه می‌گردد. لازم است تا در مقاطع مختلف اتاق آزمون از ورودی تا خروجی آن پروفیل سرعت یکدست بوده و بزرگی سرعت محوری بدون تغییر باشد. نمودارهای رسم شده در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) پروفیل سرعت را در سه مقطع ورودی، میانی و خروجی تونل باد نمایش می‌دهند. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) پروفیل یکنواخت و همگنی را در اتاق آزمون نمایش می‌دهند. این توزیع یکنواخت سرعت در عمق اتاق آزمون نیز حفظ شده است. در شکل (۱۹) کانتور بزرگی سرعت در سه سطح ورودی، خروجی و میانی اتاق آزمون نمایش داده شده است.



شکل ۱۷- پروفیل سرعت در راستای محور (Z) در خط میانی سه مقطع ورودی، میانی و خروجی اتاق آزمون در راستای محور (X)



شکل ۱۸- پروفیل سرعت در راستای محور (Z) در خط میانی سه مقطع ورودی، میانی و خروجی اتاق آزمون در راستای محور (Y)



شکل ۱۹- کانتورهای پروفیل سرعت محوری در مقاطع مختلف اتاق آزمون

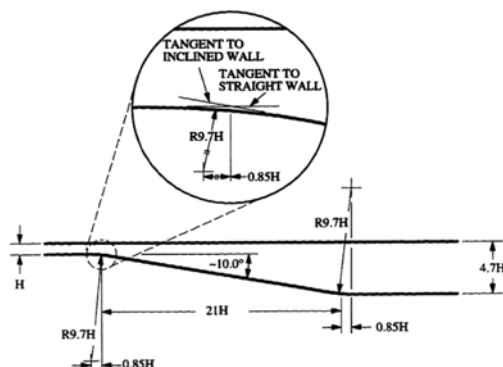
Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance”, *NASA TND-8243*, 1976.

- [14] Bender, T.J., Bergstrom, D.J. and Rezkallah, K.S., “A Study on the Effects of Wind Intake Flow Rate of a Cooling Tower. Part 3: Numerical Study”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 64, 1996, pp. 81-100.
- [15] Senol S., and Cinar A., “Design and Flow Simulation of an Open Circuit Wind Tunnel,” *Engine. Soft International Conference*, 2009, pp. 11-14.
- [16] Thiart, G.D., A Numerical Procedure for Predicting the Effects of Distorted Inflow Conditions on the Performance of Axial Flow Fans, (PhD Thesis), Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch, 1990.
- [17] Fluent, A., *Fluent 12*, Theory guide, 2017.
- [18] LTG Axial-Flow and Centrifugal Fans, LTG Incorporated, Technical Brochure.
- [19] British Standards Institution, Fans for General Purposes, Part 1, Methods for Testing Performance, *BS 848*, 1997.
- [20] van der Spuy, S.J., von Backstrom, T.W. and Kroger, D.G., “An Evaluation of Simplified Methods to Model the Performance of Axial Flow Fan Arrays”, *R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering*, v. 26, 2010, pp. 12-20.
- [21] Buice, C.U., Experimental Investigation of Flow through an Asymmetric Plane Diffuser, (Ph.D. thesis), Stanford University, Stanford, 1997.

### پیوست: اعتبارسنجی نتایج عددی نرم افزار

#### فلوننت برای جریان در یک دیفیوزر مادون صوت

به منظور اطمینان از دقت محاسبات عددی و بررسی نتایج حاصل از مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  نتایج یکی کار آزمایشگاهی در حوزه جریان داخلی دیفیوزر با داده‌های حاصل از حل نرم افزار *Fluent®* مقایسه شده است. در شکل (۲۰) هندسه و ابعاد پارامتری دیفیوزر بررسی شده نمایش داده شده است [۲۱]. در این آزمون اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه LDV انجام شده است.



شکل ۲۰- هندسه دیفیوزر نمونه در ارزیابی نرم افزار انتخابی [۲۱]

ارتفاع مقطع ورودی  $0.15$  متر در نظر گرفته شده است. رینولدز جریان با توجه به ارتفاع مقطع ورودی و سرعت یکنواخت در آن مقطع برابر  $20000$  می‌باشد. همان طور که

### تشکر و قدردانی

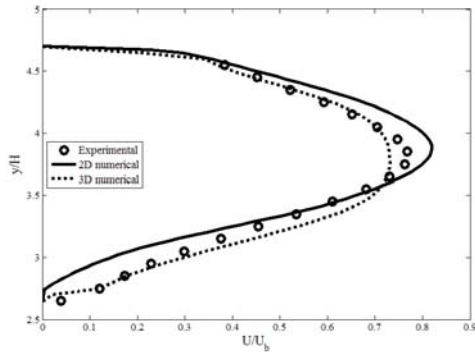
نویسنده مقاله بر خود لازم می‌داند از زحمات و حمایت‌های علمی و معنوی جناب آقای دکتر مسعود دربندی در انجام این پژوهش کمال قدردانی را داشته باشد.

### مراجع

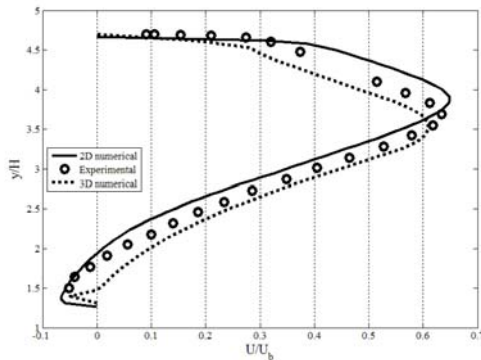
- [1] Chang C.H. and Meroney R.N., “The Effect of Surroundings with Different Separation Distances on Surface Pressures on Low-Rise Buildings,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 91, n. 8, 2003, pp. 1039-1050.
- [2] Blocken B. and Carmeliet J., “A Review of Wind-Driven Rain Research in Building Science”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 92, n. 13, 2004, pp. 1079-1130.
- [3] Sicot, C., Deliancourt, F., Boree, J., Aguinaga, S. and Bouchet, J.P., “Representativeness of Geometrical Details During Wind Tunnel Tests. Application to Train Aerodynamics in Crosswind Conditions”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.177, 2018, pp.186-196.
- [4] Bayati, I., Belloli, M., Bernini, L. and Zasso, A., “Aerodynamic Design Methodology for Wind Tunnel Tests of Wind Turbine Rotors”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 167, 2017, pp.217-227.
- [5] Rae, W.H. and Pope, A., *Low-speed wind tunnel testing* (No. BOOK), John Wiley, 1984.
- [6] Meroney R.N., Leitl B.M., Rafailidis S. and Schatzmann, M., “Wind-Tunnel and Numerical Modeling of Flow and Dispersion about Several Building Shapes”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 81, 1999, pp. 333-345.
- [7] Gordon R., and Imbabi M.S., “CFD Simulation and Experimental Validation of a New Closed Circuit Wind/Water Tunnel Design,” *Journal of Fluids Engineering – Transactions of the ASME*, v. 120, n. 2, 1998, pp. 311-318.
- [8] Ghani, S.A.A.A., Aroussi, A. and Rice, E., “Simulation of Road Vehicle Natural Environment in a Climatic Wind Tunnel”, *Simulation Practice and Theory*, v. 8, n. 6, 2001, pp. 359-375.
- [9] Moonen P., Blocken B., Carmeliet J., “Indicators for the Evaluation of Wind Tunnel Test Section Flow Quality and Application to a Numerical Closed-Circuit Wind Tunnel”, *International Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 95, 2007, pp.1289-1314.
- [10] Zehring, C.A., Comparative Analysis of a Low-Speed Wind Tunnel Designed for Renewable Energy Applications, (M.Sc. Thesis), Purdue University, 2011.
- [11] Moonen, P., Blocken, B., Roels, S., Carmeliet J., “Numerical Modeling of the Flow Condition in a Closed-Circuit Low-Speed Wind Tunnel” *International Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 94, 2006, pp.699-723.
- [12] Mathew, J., Design, Fabrication, and Characterization of an Anechoic Wind Tunnel Facility, (Ph.D. Thesis), University of Florida, 2006.
- [13] Eckert, W.T., Mort, K.K. and Jope, J., “Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for

در تولید شبکه دوبعدی مجدداً مورد استفاده قرار گرفته است. به این ترتیب چگالی شبکه در نزدیکی دیوارها بیشتر در نظر گرفته شده است. شبکه محاسباتی حاصل شامل حدوداً ۲۰۰۰۰۰ سلول می‌باشد.

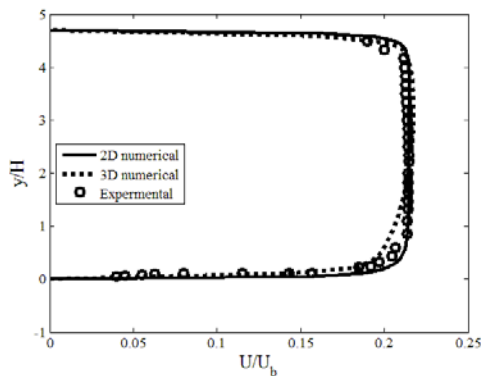
در ادامه (شکل‌های (۲۳) تا (۲۵)) و در چند مقطع مشخص پروفیل سرعت محوری رسم شده و به این ترتیب داده‌های تجربی با نتایج حل‌های دوبعدی و سه‌بعدی عددی مقایسه شده است.



شکل ۲۳- پروفیل سرعت در مقطع  $(\frac{x}{H} = 5/98)$



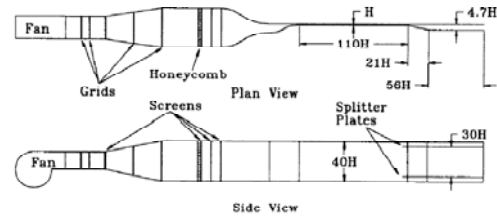
شکل ۲۴- پروفیل سرعت در مقطع  $(\frac{x}{H} = 13/56)$



شکل ۲۵- پروفیل سرعت در مقطع  $(\frac{x}{H} = 46/62)$

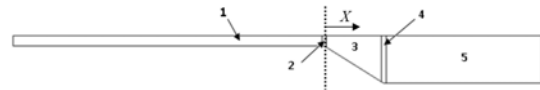
مقایسه نتایج مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی عددی با مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که حل حجم محدود معادلات ناپیراستوکس در نرم‌افزار فلوئنت به‌خوبی جریان داخلی در یک دیفیوزر را شبیه‌سازی می‌کند.

در شکل (۲۰) نمایش داده شده است، زاویه دیفیوزر برابر ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. نهایت زاویه‌ای که در جریان جدایش رخ نمی‌دهد حدود ۷ درجه می‌باشد. در شکل (۲۱) تجهیزات تست آزمایشگاهی نمایش داده شده است.



شکل ۲۱- هندسه دیفیوزر نمونه در ارزیابی نرم‌افزار انتخابی [۲۱]

شبکه محاسباتی برای مدل‌سازی مسئله معرفی شده با استفاده از نرم‌افزار گمبیت تولید شده است. این شبکه دوبعدی بوده و مطابق هندسه معرفی شده در شکل (۲۱) می‌باشد. برای بدست آوردن سرعت یکنواخت در ورودی دیفیوزر یک مقطع یکنواخت به طول ۱۱۰H قبل از ورودی دیفیوزر در نظر گرفته شده است. همچنین مجرای خروجی با طول ۵۶H بعد از مقطع خروجی دیفیوزر مطابق آنچه در کار تجربی وجود داشته است، در نظر گرفته شده است. در شکل (۲۲) هندسه مدل‌سازی شده نمایش داده شده است. به منظور تولید یک شبکه محاسباتی مناسب دامنه محاسباتی به ۵ ناحیه تقسیم شده است. در جدول (۷) تعداد سلول‌های هر بخش گزارش شده است.



شکل ۲۲- معرفی ناحیه‌های دیفیوزر که برای تولید شبکه محاسباتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۷- تعداد سلول‌های تولید شده برای حل دوبعدی در هر ناحیه دیفیوزر

نام ناحیه	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵	کل سلول‌ها
تعداد سلول‌ها	۲۵۰×۶۵	۴۰×۶۵	۵۵۰×۶۵	۳۰×۶۵	۵۰×۶۵	۲۳۵۵۰۰

نحوه تولید شبکه محاسباتی به‌گونه‌ای است که چگالی شبکه تولید شده در نزدیکی دیوارها بیشتر است. دلیل این مطلب این است که در مسئله معرفی شده نیاز است تا حل جریان در لایه مرزی و همچنین پیش‌بینی جدایش جریان با دقت بیشتری صورت پذیرد.

در ادامه و پس از مدل‌سازی دو بعدی دیفیوزر مورد استفاده بویس [۲۱]، مدلی سه بعدی برای مدل‌سازی سه‌بعدی دیفیوزر ارائه شده است. مانند مدل‌سازی دو بعدی در ورودی شرط مرزی و در خروجی شرط مرزی اعمال شده است. در دیوارها نیز شرط مرزی عدم لغزش لحاظ شده است. در تولید شبکه محاسباتی استراتژی معرفی شده