

## سناریوی طراحی، ساخت و شبیه سازی عددی تونل باد مادون صوت کم سرعت کوچک آزمایشگاهی

علی مهرابی<sup>۱\*</sup>، جواد دلدار شیخی<sup>۲</sup>، امیرمهدی صبوریان راد<sup>۳</sup>

۱- دکترای مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک استادیار، دانشگاه افسری امام علی (ع) نازجا، دانشکده مهندسی و پرواز

۲- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش پیشران، دانشگاه افسری امام علی (ع)، گروه مهندسی بالگرد

۳- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، مرکز آیرودینامیک قدر

\* Mehrabi.@iamu.ac.ir

## چکیده

به نتایج دقیق و تصمیمات نهایی در طیف گسترده ای از صنایع و کاربردهای دانشگاهی باقی مانده است. تونل باد بعنوان یک ابزار اولیه و مهم برای آیرودینامیک تجربی، شناخته می شود. یک تونل باد با طراحی خوب می تواند اطلاعات فنی را برای تعداد زیادی از کاربردهای مهندسی مانند آیرودینامیک بیرونی (جریان بر روی وسایل نقلیه زمینی و هوایی)، مهندسی عمران (جریان بر روی پل ها، ساختمان ها، کابل ها و غیره)، فعالیت های ورزشی (جریان گذری از روی دوچرخه سواران، طراحی توپ های والیبال، بسکتبال، گلف و ...)، دینامیک سیالات بنیادی (جریان آرام و مآشفتنگی بر روی هندسه ساده و پیچیده) و چارچوب گسترده ای از گزینه های دیگر در صنعت و مراکز تحقیقاتی در دانشگاه ها در سراسر دنیا فراهم آورد.

برای دستیابی به چنین سطحی از کاربرد، ۲ نوع اصلی تونل باد و پیکره بندی اولیه بخش آزمون آنها وجود دارد که عبارتند از تونل باد مدار باز و تونل باد مدار بسته. مزایای تونل باد مدار باز، هزینه ساخت کمتر، امکان راه اندازی موتورهای احتراق داخلی و استفاده گسترده از دود برای تجسم جریان بدون نیاز به پاکسازی آنهاست. معایب آن عبارتند از: مشکل بودن رسیدن به جریان با کیفیت بالا در بخش آزمون، امکان تأثیر گذاری باد و هوای سرد موجود در محیط بر عملکرد آن، و نیاز به انرژی بیشتری در بهره برداری مداوم از آن و استعداد بیشتر برای ایجاد سر و صدا. از طرفی مزایای تونل باد مدار بسته عبارتند از: استفاده از پره ها و صفحات گردش جریان در گوشه های تونل و کنترل بهتر جریان، مستقل از شرایط آب و هوا و محیط، انرژی کمتر مورد نیاز برای نرخ بهره برداری بالا و صدای محیطی کمتر هنگام کار. معایب آن نیز هزینه های اولیه بالاتر (به دلیل کانال های برگشتی و پره های چرخشی گوشه ای)، لزوم تخلیه تونل در صورت وجود دود زیاد و نیاز به برخی از روش های خنک کننده برای استفاده زیاد از تونل. با توجه به نوع طراحی تونل باد، دو پیکربندی اولیه بخش آزمون نیز وجود دارد که می تواند بخش آزمون باز و یا بسته باشند. بخش آزمون باز یک بخش آزمون با مرز آزاد (باز در شرایط محیطی) و بخش آزمون بسته یک بخش آزمون محصور است که توسط دیواره ها احاطه شده است.

هدف این مقاله تشریح برخی از جنبه های طراحی و جزئیات ساخت یک تونل باد مدار باز کم سرعت مادون صوت است که برای دستیابی به سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در مقطع آزمون با شدت آشفتگی کم مورد انتظار است. برای دستیابی به چنین اهدافی اصلی طراحی بسیار دقیق از طریق استفاده از تحلیل های نظری و روش های نیمه تجربی برای بهبود کیفیت

در این مقاله مراحل طراحی و جزئیات ساخت یک تونل باد مادون صوت کم سرعت کوچک آزمایشگاهی شرح داده شده است. این تونل باد برای دستیابی به سرعت ۳۰ متر بر ثانیه در مقطع آزمون برای استفاده آموزشی-پژوهشی در زمینه هایی مانند آیرودینامیک سرعت پایین، کاربردهای مهندسی و تحقیقات بنیادی در مکانیک سیالات در آزمایشگاه آیرودینامیک طراحی و ساخته شده است. برای دستیابی به چنین اهدافی، طراحی تفصیلی با استفاده از تحلیل های نظری، شبیه سازی عددی و روش های نیمه تجربی انجام شد که همه آنها در بهبود کیفیت جریان در امتداد بخش های تونل باد تأثیر داشتند. سعی شد تا با استفاده از یک مجموعه فن و موتور الکتریکی قوی مقدار حجم مناسب و با ثبات فشاری کافی به مقطع آزمون تزریق شود. طراحی و ساخت هر بخش تونل باد ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است تا جنبه های فنی و مهم آنها روشن شود تا یک الگوی و راهنمای مناسب برای طراحی و ساخت اجزای اصلی یک تونل باد مادون صوت با سرعت کم ارائه شود.

واژه های کلیدی: تونل باد، سرعت کم، آزمایشگاه آیرودینامیک، کنترل جریان، مقطع آزمون

## ۱-مقدمه

آزمایشات و بررسی های تجربی مختلف در آیرودینامیک جریان های با سرعت کم همواره به تکامل خود ادامه داده است و سنگ بنای توسعه طیف وسیعی از وسایل نقلیه و سایر وسایلی است که باید کارکرد خود را در برابر نیروهای تحمیل شده توسط جریان های آیرودینامیکی قوی هوا یا آب انجام دهند. در دهه ۱۹۷۰ و در اوایل دهه ۱۹۸۰ اعتقاد بر این بود که استفاده از تونل های باد، به ویژه در رژیم مادون صوت، به سرعت از میان خواهد رفت زیرا دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> به گزینه ای جذاب تر برای به دست آوردن داده های آیرودینامیکی در بسیاری از کاربردهای مهندسی تبدیل می شود زیرا از نظر هزینه ای مقرون به صرفه هستند. با این وجود، شبیه سازی ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی از آن زمان بهبود یافته اند، اما در بسیاری موارد به سطح کافی برای جایگزینی مناسب برای آزمایش های تجربی نزدیک نشده اند [۱].

در واقع، با تبدیل شدن روش های محاسباتی به یک ابزار قدرتمند جدید در این زمینه، روش های تحقیقی که منجر به پیش بینی های کمی می شود، ترکیبی از آزمایش و تئوری بوده است. با این حال، هنوز هم اکتشافات تجربی پایه اصلی برای به دست آوردن داده ها برای طراحان برای دستیابی

<sup>۱</sup> CFD

کیفیت جریان یکی از ویژگی های اصلی و نتیجه کل طراحی نهایی تونل باد است و تنها در طول آزمایش های کالیبراسیون قابل بررسی است. با این حال، با توجه به دانش تجربی قبلی، برخی از قوانین را می توان برای انتخاب مقادیر کافی از متغیرها که بر پارامترهای کیفیت مرتبط تأثیر می گذارد، دنبال کرد. مقادیر توصیه شده در بخش های مربوط به نازل، بخش آزمون و دیفیوزر مورد بحث قرار خواهند گرفت زیرا بخش هایی از تونل باد هستند که بیشترین تأثیر را بر کیفیت جریان دارند. با توجه به این الزامات و محدودیت موجود در فضا و هزینه مربوط، مشخصات اصلی تونل باد به شرح زیر تعریف شد: تونل باد مدار باز با طول تقریباً ۴/۱ متر و عرض بیشینه ۱ متر. با توجه به سهولت ساخت و ابزارها و امکانات ساخت در دسترس، از صفحات فولادی برای ساخت و پوشش بخش های مختلف تونل باد استفاده می شود. با توجه به فلزی بودن بدنه و استفاده از روش ها و دستگاه های خم کاری برای ساخت بخش های مختلف آن، سعی شده است تا از کمترین اسکلت و سازه بیرونی استفاده شود. حداکثر سرعت هوا در محفظه آزمایش باید به ۳۰ متر بر ثانیه با سطح آشفتنگی تعیین شده در حدود ۰/۲ تا ۰/۵ درصد برسد. حداقل سرعت جریان نیز ۵ متر بر ثانیه خواهد بود. ابعاد محفظه آزمایش نیز ۰/۳ متر (عرض)، ۰/۳ متر (ارتفاع)، با ۰/۹ متر (طول) خواهد بود و دسترسی به محفظه آزمایش از طریق درب های اکریلیکی است. سعی شده است تا برای کنترل جریان غیرفعال از صفحات طوری در ورودی و مقطع بعد از محفظه آزمون تونل باد استفاده شود. نسبت همگرایی ۴:۱ برای رسیدن به سرعت مورد نیاز تعیین شده است. حداقل لوازم جانبی نیز شامل لوله پیتوت ثابت و متحرک و ۲ دستگاه جریان سنج سیم داغ هستند که همه آنها به فشار سنج و سرعت سنج های دیجیتال متصل می شوند. سیستم محرک تونل باد شامل یک فن با موتور الکتریکی تک فاز ۲۲۰ ولت، ۶۰ هرتز با توان ۰/۳۳ اسب بخار و بیشینه سرعت دورانی ۱۷۳۵ دور بر دقیقه بوده و کنترل دور موتور آن نیز از طریق یک اینورتر فرکانس است. فن شامل ۶ پره از مواد فلزی، با قطر ۰/۴ متر و گام ثابت است.

## ۱-۲- بخش آزمون

اولین قدم در طراحی تونل باد، تعیین اندازه و شکل بخش آزمون آن است. این انتخاب بستگی به کاربردهای مورد نظر و همچنین به منابع مالی موجود برای ساخت تجهیز دارد. در کاربردهای عمرانی یا صنعتی، در بیشتر موارد مقطع مربعی برای این بخش توصیه می شود. در این حالت، نمونه های آزمایش معمولاً بدنه های دارای یخ هستند و مساحت پیشانی معادل آن ها نباید از ۱۰ درصد سطح مقطع محفظه آزمایش بیشتر باشد تا نیازی به اصلاح انسداد غیر خطی نباشد [۳]. با پیشروی در امتداد بخش آزمون، ضخامت لایه مرزی در دیواره بیشتر می شود. این پدیده باعث کاهش سطح مقطع مؤثر و بنابراین باعث افزایش سرعت جریان و کاهش فشار استاتیکی می شود (شکل ۲). نتیجه این تغییرات در سرعت و فشار جریان باعث ایجاد یک پسی اضافی بر روی مدل تحت آزمایش می شود که "شناوری افقی" نامیده می شود [۱].

راه حل ممکن برای این مشکل، افزایش سطح مقطع در امتداد طولی است. وقتی این کار به درستی انجام شود، مقادیر ثابت سرعت و فشار استاتیکی در سراسر بخش آزمون حفظ می شوند. متأسفانه، تا به امروز هیچ روش طراحی دقیقی وجود ندارد که فشار استاتیکی ثابت را تضمین کند با این وجود، به عنوان یک تقریب مناسب می توان دیواره های مقطع آزمون را با

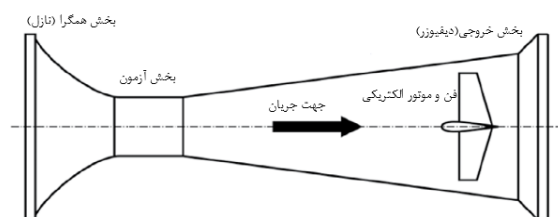
جریان در امتداد تونل باد و مقاطع آن انجام شده و توجه ویژه ای هم در انتخاب مجموعه فن معطوف شده است. تا حد امکان سعی شد تا کنترل و تثبیت جریان نیز با استفاده از نصب توری در مقاطع مختلف انجام شود. علاوه بر طراحی، در طول فرآیند ساخت نیز، در کنار انتخاب روش ساخت آسان، با انتخاب تکنیک های ساخت مناسب، کنترل تلرانس ها، شکاف ها، مراحل و کیفیت سطح در سرا سر بخش های تونل باد توجه ویژه ای به کیفیت و کنترل جریان صورت گرفت. در واقع منظور اصلی این مطالعه، ارائه راهنمایی از طریق اشتراک گذاری تجربه طراحی اجزا و قطعات تونل باد مانند بخش آزمون، بخش نازل، دیفیوزر و بخش های دیگر و روش نمودن سایر جنبه های مهم ترین پارامترهای طراحی آن است. علاوه بر این، این تحقیق فنی برخی از ایده ها و نکات ساخت که ممکن است برای کسانی که علاقه مند به ساخت چنین تجهیزاتی هستند را ارائه می کند. بنابر این، بر اساس این مشاهدات اصلی، طراحی و ساخت هر بخش تونل باد ارائه شده است و بر اساس جنبه های فنی بحث شده است.

## ۲- طراحی تونل باد

طراحی تونل باد فرآیندی است که در آن اهداف تحقیقاتی و آموزشی در درجه اول قرار دارند و سپس معیارهای طراحی بر اساس آنها تعیین می شوند. از آنجا که طراحی معمولاً شامل ساخت، هزینه، فضای در اختیار و سایر محدودیت های گاهاً متناقض است بنابر این، فرآیندی تکراری است. معمولاً مراجع مختلفی مانند [۲]، [۳]، [۴]، [۵] و [۶] برای طراحی تونل باد وجود دارند. با این حال، باید هنگام در نظر گرفتن جنبه های شدت آشفتنگی کم، کنترل جریان و یکنواختی جریان در داخل تونل باد به الزامات هزینه، فرآیند تولید و بهبودهای احتمالی آینده در تجهیزات نیز توجه ویژه ای شود. مطابق با محتوای این مراجع، برخی از قوانین سنتی ممکن است با اصلاحات و یا تنظیمات ظریف برای هر طرح و کاربرد خاص اعمال شوند. در قسمت های بعدی الزامات طراحی و جزئیات هر جزء از جمله جنبه های فنی اصلی مرتبط ارائه خواهد شد.

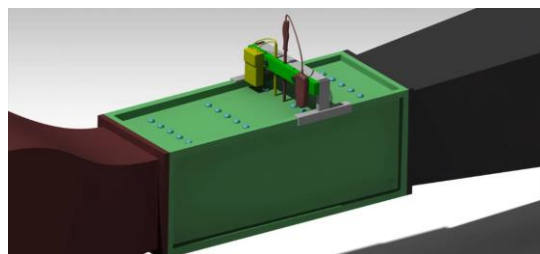
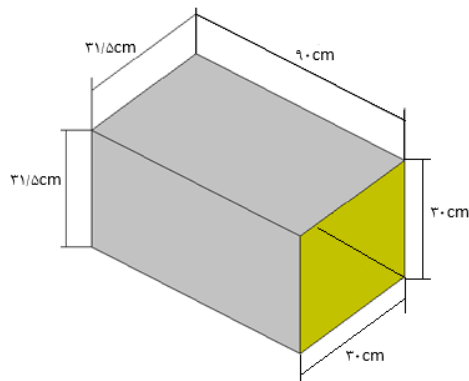
## ۱-۲- الزامات طراحی تونل باد

الزامات اصلی برای این تونل باد خاص در ابتدا به این شرح تعریف شدند: تونل باد سرعت کم (مادون صوت در حدود ۰/۱ ماخ) برای اهداف تحقیقاتی و آموزشی، مدار باز با مقطع آزمون با کنترل جریان غیرفعال. معیارهای طراحی برای امکان اندازه گیری تقریباً دقیق جریان یکنواخت یا غیر دائم با شدت آشفتنگی کم برای تسهیل مطالعه پدیده های فیزیکی مورد علاقه در نظر گرفته شده اند. یک نمای کلی از تونل باد مورد نظر در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: طرحواره ای از تونل باد مادون صوت مدار باز

ورقه‌های فولادی به منظور نصب پایه و سکوی تعادل آیرودینامیکی مدل و ... ساخته شده است.



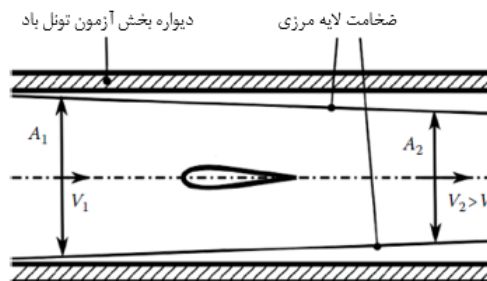
شکل ۳: ابعاد محفظه آزمایش تونل باد

### ۲-۱-۲- بخش نازل

بخش "نازل" یا قسمت همگرا مهم‌ترین بخش در طراحی یک تونل باد است و بیشترین تأثیر را بر کیفیت جریان محفظه آزمایش دارد. هدف آن تسریع جریان از بخش ورودی تونل به محفظه آزمایش، کاهش آشفتگی و عدم یکنواختی جریان در محفظه آزمایش است. مقدار شتاب دهی به جریان و تضعیف غیریکنواختی آن در نازل عمدتاً به نسبت همگرایی (N)، بین قسمت ورودی و خروجی نازل بستگی دارد [۹، ۱۰]. علاوه بر این مزایا، در بخش نازل، با ایجاد کشیدگی در رشته‌های گردابی نوسانات محوری جریان نیز کاهش می‌یابد [۱۱]. از طرفی طول این بخش نیز باید به حدی کوچک باشد که رشد لایه مرزی و هزینه تولید به حداقل برسد، اما برای جلوگیری از گردادی نامطلوب فشار زیاد در طول دیوار که ناشی از انحنای نازل است باید به اندازه کافی به طول اضافه شود. این پدیده می‌تواند منجر به جدایش جریان از دیواره نازل و قبل از ورود به محفظه آزمایش شود.

اثر همگرایی هندسه نازل بر تغییرات سرعت غیردائم و آشفتگی پیچیده‌تر است بنحوی که کاهش در نوسانات راستای (محوری) بیشتر از نوسانات عرضی است. یک تحلیل ساده انجام شده توسط پرائنتل [۱۲] پیش‌بینی می‌کند که نسبت ریشه میانگین مربع (rms) نوسانات سرعت محوری به سرعت متوسط با ضریب  $2N^{1/2}$  کاهش می‌یابد، در حالی که نسبت نوسانات rms عرضی به سرعت متوسط فقط با یک ضریب N کاهش می‌یابد؛ یعنی، نوسانات عرضی (مثلاً بر حسب متر بر ثانیه) از طریق همگرایی سطح نازل افزایش می‌یابد که این رویداد به دلیل کشیدگی و چرخش خطوط گردابی طولی ابتدایی است. اندازه‌گیری نوسان مولفه محوری

۰/۵ درجه واگرایی طراحی کرد. طول بخش آزمون نیز معمولاً به اندازه یک تا دو برابر اندازه مقطع عرضی آن در نظر گرفته می‌شود [۷، ۸].



شکل ۴: اثر تشکیل لایه مرزی بر جریان داخل بخش آزمون تونل باد

باید در نظر داشت که تلفات توان در هر نقطه از تونل با توان سوم (مکعب) سرعت متناسب است بنابراین در بخش آزمون که افزایش سرعت اتفاق می‌افتد این تلفات نسبتاً بزرگ هستند [۱]. در نتیجه، یک بخش آزمون با طول کوتاه برای کاهش تلفات انرژی مفید است. با در نظر گرفتن اینکه گاهی اوقات نیاز به قرار دادن تجهیزات اضافی مانند ابزار اندازه‌گیری، تکیه‌گاه‌ها و غیره در داخل محفظه آزمایش است مرسوم است که فشار عملکردی داخل آن برابر با فشار محیط محلی نگه داشته شود. برای انجام این شرط در مرجع [۸] توصیه شده است که یک دهانه کوچک، تقریباً ۱٪ از طول کل محفظه آزمایش، در مقطع ورودی دیفیوزر وجود داشته باشد. برای کاهش جدایش و ناپایداری جریان در مکان‌هایی مانند دیفیوزر، فن و نازل، از قراردادن یک مجرای مساحت ثابت با طول لازم برای ته نشینی جریان در قبل از قسمت همگرایی نازل استفاده می‌شود. با توجه به ملاحظات و معیارهای مذکور، در طراحی تونل باد ارائه شده در این مقاله، محفظه آزمایش در ابتدا با ۰/۳ متر (عرض)، ۰/۳ متر (ارتفاع) و ۰/۹ متر (طول) طراحی شد. علت زیاد بودن طول این محفظه نسبت به معیارهای مطرح شده در مراجع قبل به علت دسترسی بیشتر به جریان هموارتر در مقطع آزمون با توجه به نزدیکی محل نصب فن به آن بوده است. البته دستیابی به این ابعاد بر اساس استانداردهای اولیه مطرح شده و سپس سعی و خطای انجام شده در انتخاب ابعاد نهایی با توجه به کیفیت و همواری جریان نیز بوده است. به منظور حفظ فشار استاتیکی داخل محفظه نیز دیواره‌ها با ۰/۵ درجه واگرایی در امتداد طول آن طراحی شدند بنابراین ابعاد خروجی محفظه اندکی نسبت به ابعاد ورودی آن بزرگتر شدند. شکل ۳، اندازه‌های هندسی محفظه آزمایش را نشان می‌دهد.

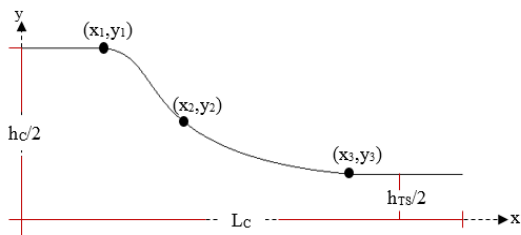
این بخش مطابق با الزاماتی ساخته شده است که عبارتند از: دسترسی مناسب به داخل محفظه از طریق درب ساخته شده از اکریلیک برای سهولت استفاده از تکنیک‌های آشکارسازی جریان مانند ریک دود یا سرعت سنجی تصویر ذرات<sup>۳</sup>. سایر تجهیزات جانبی اندازه‌گیری را می‌توان در هر زمان با مجراهای تعبیه شده بر روی پانل‌های اکریلیک و کفی فولادی در بخش آزمون جای داد. روشنایی بخش آزمایش با رشته لامپ‌های ال ای دی<sup>۴</sup> چسبیده شده بر روی سقف انجام شده است. کف این بخش با استفاده از

<sup>۳</sup> LED

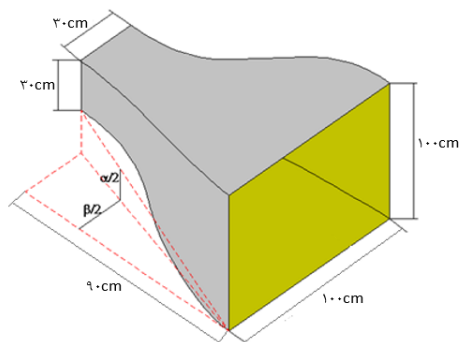
<sup>۴</sup> PIV

با اعمال شرایط مذکور در روابط ۱ و ۲، ضرایب معادلات نیز مشخص می شوند.

با توجه به تجربه های طراحی گذشته [۴، ۱۲، ۱۸]، زمانی که هر دو نیمه زاویه انقباض،  $\alpha/2$  و  $\beta/2$  مقادیری در حدود ۱۲ درجه می گیرند، همگرایی طولی معقول و رفتار دینامیکی سیال خوبی ایجاد می شود. ضریب همگرایی نازل (Nc) نیز برابر  $3/3$  می شود. با توجه به شرایط مذکور ابعاد حاصل برای نازل همگرایی تونل باد در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴: انطباق چند جمله ای درجه سوم برای ترسیم شکل نازل همگرایی ورودی



شکل ۵: ابعاد نهایی نازل همگرایی ورودی

تا حد امکان، برای حداقل کردن اندازه کلی تونل مطلوب است که طول نازل که مجموع طول محفظه ورودی، قسمت همگرا به اضافه طول قسمت خروجی نازل است، کوتاه باشد. اغلب از یک محفظه ورودی با طول حدود نصف یا کمتر طول نازل ورودی تونل استفاده می شود. چنین طولی امکان استفاده از لانه زنبوری و/یا توری را برای کاهش آشفتگی جریان فراهم می کند. در تونل باد ارائه شده در این تحقیق نیز از یک محفظه ورودی به طول ۳۰ سانتی متر استفاده شده است. نصب یک صفحه توری می تواند مقدار آشفتگی طولی جریان ورودی به تونل را به شدت کاهش دهد. با این حال، استفاده از دو صفحه توری در ساخت تونل باد حاضر، می تواند سطح آشفتگی را در دو جهت طولی و عرضی تا مقدار  $0/15$  درصد کاهش دهد. ضریب افت فشار، با توجه به فشار دینامیکی موضعی، یک صفحه ساخته شده از سیم های قطر  $0/5$  میلی متر حدود  $0/4$  است [۸].

ساده تر است و می توان با وسایلی مانند بادسنج سیم داغ آن را اندازه گیری نمود و معمولاً بصورت مقدار «آشفتگی جریان آزاد» ذکر می شود، با این حال مقدار آن کم است [۱۳]. در مورد تونل های باد برای کاربردهای عمرانی یا صنعتی، ممکن است که نسبت همگرایی بین ۴ تا ۶ کافی باشد. با طراحی خوب هندسه، اغتشاش و غیریکنواختی جریان می تواند به حدود ۲ درصد برسد که برای بسیاری از کاربردها قابل قبول است [۱۴]. با این وجود، با قرار دادن یک صفحه توری یا لانه زنبوری و... در ورودی نازل می توان این مقدار را تا  $0/5$  درصد کاهش داد که حتی برای برخی آزمایش های حوزه هوایی نیز یک مقدار بسیار معقول است [۱۵]. برای آزمایش های حوزه هوانوردی زمانی که برای کیفیت جریان باید غیریکنواختی سرعت متوسط و سطح آشفتگی محوری بهتر از  $0/1$  درصد و مقدار آشفتگی عمودی و جانبی بهتر از  $0/3$  درصد باشد، نسبت همگرایی بین  $0/8$  و  $0/9$  مطلوب تر است [۱۲].

شکل نازل همگرا دومین مشخصه ای است که باید مشخص شود. با در نظر گرفتن همواری هندسه نازل، ممکن است تصور شود که یک رویکرد یک بعدی برای تحلیل جریان برای تعیین گرادبان فشار در طول آن کافی است. اگرچه این فرض برای مقادیر متوسط مناسب است، اما توزیع فشار روی دیواره های انقباضی دارای مناطقی با گرادبان فشار نامطلوب است که ممکن است جداسازی لایه مرزی محلی را ایجاد کند. هنگامی که این پدیده اتفاق می افتد، سطح اغتشاش به شدت افزایش می یابد و در نتیجه کیفیت جریان در محفظه آزمایش کاهش می یابد. معمولاً از تطبیق چند جمله ای های پیشنهادی و یا شبیه سازی های جریان پتانسیل سه بعدی در داخل نازل برای طراحی آن و تحویل یک جریان با کیفیت مناسب در محفظه آزمایش استفاده می شود [۱۶، ۱۷]. در این مقاله، برای طراحی بخش نازل از دو نوع منحنی حاصل از چند جمله ای درجه سه استفاده شده است.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شرایط مورد نیاز برای تعریف چند جمله ای که از انتهای نازل شروع می شود عبارتند از: مختصات  $(x_1, y_1)$ ، شرط مماس بودن افقی با خطی افقی در آن نقطه، نقطه ای که خط منحنی خط مستقیم منطبق بر آن را در میانه طول آن قطع می کند و شرط مماس بودن با خط افقی در سمت باریک نازل. برای خطی که از انتهای باریک شروع می شود، نقطه اولیه  $(x_2, y_2)$  است، با همان شرایط مماس افقی در این نقطه، و اتصال به خطی که از سمت عریض نازل می آید. در نتیجه، چند جمله ای ها عبارتند از:

$$y = a_1 + b_1 \cdot x + c_1 \cdot x^2 + d_1 \cdot x^3 \quad (1)$$

$$y = a_2 + b_2 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + d_2 \cdot x^3 \quad (2)$$

با اعمال این شرط که نقطه اتصال دو منحنی در میانه خط مستقیم واصل نقطه ۱ و ۳ است، مختصات نقطه اتصال (نقطه ۲) بصورت رابطه ۳ تعریف می شود:

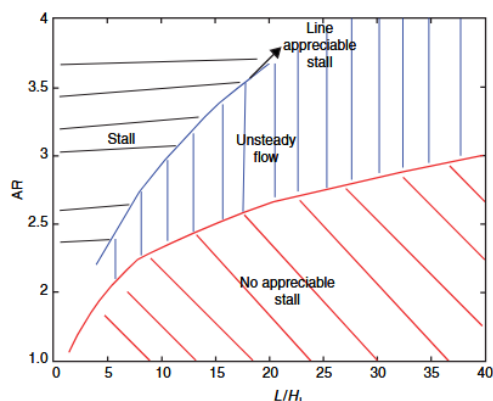
$$[x_2, y_2] = \left[ \frac{x_1 + x_3}{2}, \frac{y_1 + y_3}{2} \right] \quad (3)$$

۳-۱-۲- بخش دیفیوزر

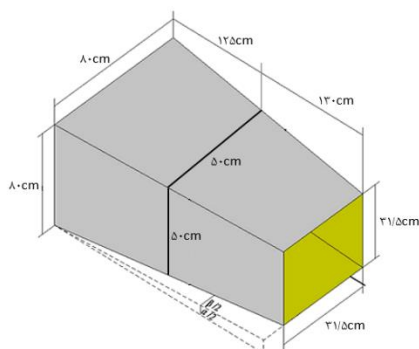
بخش دیفیوزر تونل باد مدار باز از انتهای پایین دست بخش آزمون شروع و تا قسمت خروجی آن گسترش می یابد. سیستم فن در داخل دیفیوزر نصب شده است بنابراین این دیفیوزر دارای دو قسمت قبل و بعد از فن است. از آنجایی که انتظار می رود تلفات توان در هر نقطه از تونل با توان سوم (مکعب) سرعت تغییر نماید، لذا هدف اصلی دیفیوزر کاهش سرعت با کمترین اتلاف انرژی است که به معنای بازیابی حداکثر فشار و کاهش بار سیستم موتور و فن است. همچنین الگوی جریان خروجی از بخش آزمایش بر میدان جریان در داخل دیفیوزر تأثیر گذار است. همچنین ویژگی های جریان مانند جهت گیری، اندازه و توسعه دنباله ناشی از مدل ها بر جریان ورودی دیفیوزر تأثیر می گذارد. پارامترهای اولیه طراحی برای یک دیفیوزر، زاویه انبساط مخروطی معادل و نسبت مساحت است [۳]. دیفیوزرها معمولاً بر حسب نسبت مساحت (نسبت سطح مقطع در انتها و ابتدای دیفیوزر) و زاویه مخروط معادل، که زاویه یک مقطع مخروطی فرضی با طول مشخص و نواحی ورودی و خروجی یکسان با دیفیوزر واقعی است توصیف می شوند. این بخش تونل باد تقریباً به خطاهای طراحی حساس است زیرا باعث ایجاد جدایش های دائم یا غیر دائم کم در جریان می شود. در تئوری، زمانی که یک جریان یکنواخت وارد ورودی دیفیوزر می شود، تنها محدودیت در زاویه مخروط این است که لایه مرزی متلاطم دچار جدایی نشود.

بنابر این برای جلوگیری از جدایش جریان، ضریب انبساط دیفیوزر باید به خوبی تعیین شود [۵، ۱۹]. با دانستن این موضوع، برای جلوگیری از جدایش جریان، مساحت دیفیوزر باید به تدریج در امتداد محوری آن افزایش یابد. اغلب از منحنی های دیفیوزر موجود در مرجع [۹] برای طراحی دیفیوزر استفاده می شود (شکل ۶). این نمودار برای نسبت مساحت بین خروجی و ورودی دیفیوزر (AR) بر حسب نسبت طول دیفیوزر به ارتفاع ورودی  $(\frac{L}{H_i})_D$  ترسیم شده است. طراحی دیفیوزر با انتخاب یک طول برای آن با توجه محدودیت اندازه کلی تونل باد انجام می شود. بنابر این با داشتن مقدار  $(\frac{L}{H_i})_D$ ، از آنجایی که دیفیوزر طراحی شده برای این تونل باد به دو بخش قبل و بعد از فن تقسیم شده است، مقدار AR قسمت اول دیفیوزر از ناحیه جریان دائم و مقادیر قسمت دوم دیفیوزر از محدوده جریان غیر دائم انتخاب می شود تا بتوان با توجه به افت فشارهای رویداده در امتداد مقاطع تونل باد و بعد از گذر از روی مدل، بازیابی فشار بیشتری را بعد از گذر از فن بدست آورد. در عمل، جریان ورودی به دیفیوزر به دلیل وجود مدل و پایه های نگهدارنده یکنواخت نیست. به عنوان یک قانون کلی، نیم زاویه مخروط معادل نباید از ۷ درجه تجاوز کند [۷]. در انتهای دیفیوزر اول و قبل از موتور یک توری نصب شده است تا ضمن کمک به هموار نمودن جریان دنباله از

پرتاب و یا ورود احتمالی قطعات لق شده از بخش آزمون به سیستم درایو جلوگیری نماید.



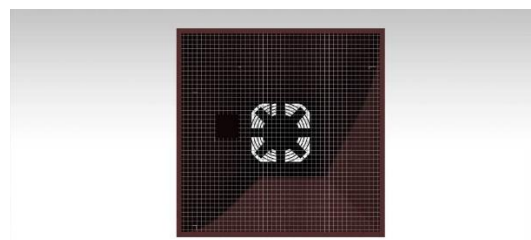
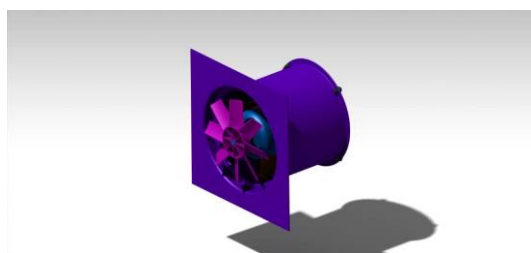
شکل ۶: نمودار طراحی دیفیوزر [۱۸] و [۲۰]



شکل ۷: ابعاد نهایی دیفیوزر

۴-۱-۲- فن تونل باد

هدف از قرار دادن فن در تونل باد ایجاد جریان باد بوسیله افزایش فشار جریان کم فشار ورودی به آن است.



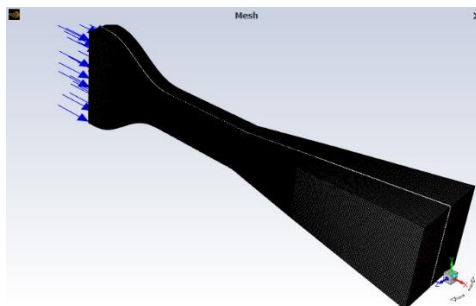
شکل ۸: طرحواره فن تونل باد

نباید از محیط محل نصب ریشه آنها تجاوز کند. در این تحقیق برای رسیدن به سرعت حدود ۳۰ متر بر ثانیه جریان در مقطع آزمایش، از یک فن با تعداد ۶ پره و موتور الکتریکی با توان ۰/۳۳ اسب بخار و بیشینه سرعت دورانی ۱۷۳۵ دور بر دقیقه استفاده شده است که مقدار سرعت موتور و فن توسط یک اینورتر دیجیتال قابل کنترل و تنظیم است. از آنجایی که مساحت بخش تست ۰/۱ متر مربع است، سیستم محرک توصیف شده جریان جرمی ۳۳۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، جریان حجمی ۳ متر مکعب بر ثانیه و فشار دینامیکی ۵۰۶ پاسکال را تضمین می کند.

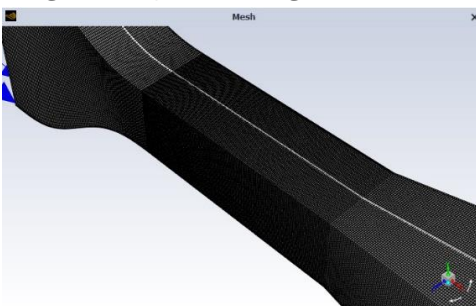
با توجه به محاسبات و طراحی انجام شده در این تحقیق، مشخصات و ابعاد کلی تونل باد مادون صوت کم سرعت به شرح جدول ۱ ارائه شده است.

### ۳- شبیه سازی عددی تونل باد مادون صوت کم سرعت

از آنجا که ما می خواهیم درک بهتری داشته باشیم از عملکرد تونل باد طراحی شده خود در فضای شبیه سازی تجربی قبل از ساخت، ابتدا تونل مادون صوت مد نظر خود را به صورت خالی از مدل شبیه سازی عددی می کنیم. نرم افزار عددی مورد استفاده شده در این حل عددی انسیس فلونت ۲۰۲۲ می باشد. برای حل عددی تونل باد لازم کل فضای تونل باد شبکه بندی شود و شبکه محاسباتی مناسبی را ایجاد کنیم که توسط نرم افزار گمبیت این کار انجام داده ایم. شبکه محاسباتی تولید شده در شکل ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است:



شکل ۹: شبکه محاسباتی تونل باد مادون صوت خالی از مدل



شکل ۱۰: شبکه محاسباتی تونل باد مادون صوت خالی از

#### مدل از نمای نزدیک تر

نتایج شبیه سازی عددی تونل باد مادون صوت خالی از مدل مد نظر ما، در سرعت ۲۵ بر متر بر ثانیه که به طور تقریبی سرعت ۲۵ یا ۳۰ متر بر ثانیه در ابتدای محفظه آزمون بدست می آید، به شرح زیر می باشد: در شکل (۱۱) خطوط هم تراز فشار (کانتور فشار) به دست آمده از شبیه سازی جریان با سرعت ورودی ۲۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است.

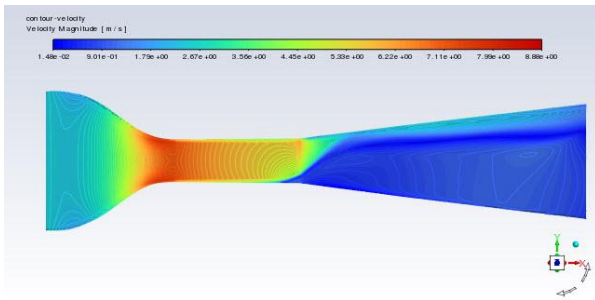
معمولاً فن به عنوان یک دیسک محرک مدل می شود که جریان کم فشار با سرعت ثابت از آن عبور می کند و فشار استاتیکی افزایش می یابد. مکانی که فن در آن قرار می گیرد پیامدهای مهمی بر عملکرد آن دارد. فن زمانی که در جریانی با سرعت کافی قرار می گیرد بالاترین بازده را دارد. علاوه بر این، عملکرد و توان مصرفی فن تا حدی با توان دوم (مربع) قطر آن متناسب است. به این دو دلیل، قرار دادن فن در ابتدای محفظه ورودی تونل باد معمول نیست بنابراین فن معمولاً در بخش دیفیوزر قرار می گیرد. در این مکان، بدلیل عبور جریان از مساحت ثابت محفظه آزمایش دارای سرعت تقریباً مناسب و توزیع یکنواخت است. فن معمولاً باعث ایجاد یک حرکت چرخشی در جریان می شود که لازم است تا برای دستیابی به کیفیت جریان بالا این اثر تا حد امکان کاهش داده شود. استفاده از صفحه توری صاف کننده در پشت و پیش از فن یک راه حل نسبتاً ارزان برای به دست آوردن جریان یکنواخت است [۷].

### جدول ۱- مشخصات و ابعاد کلی تونل باد مادون صوت کم سرعت طراحی

| شده                                     |           |  |         |
|---|-----------|--|---------|
| بیشترین سرعت عملکردی جریان ( $V_{TS}$ ) | ۳۰ m/s    | نیم زاویه واگرایی دیفیوزر ( $\alpha_D/2$ ) | ۷ درجه  |
| عرض محفظه آزمایش ( $W_{TS}$ )           | ۳۰ cm     | طول دیفیوزر ( $L_D$ )                      | ۲/۵۵m   |
| ارتفاع محفظه آزمایش ( $H_{TS}$ )        | - ۳۱/۵ cm | عرض خروجی دیفیوزر ( $WD$ )                 | ۸۰ cm   |
| طول محفظه آزمایش ( $L_{TS}$ )           | ۹۰ cm     | ارتفاع خروجی دیفیوزر ( $HD$ )              | ۸۰ cm   |
| ضریب همگرایی نازل ( $N_e$ )             | ۳/۳       | ضریب انبساط میانگین دیفیوزر ( $AR$ )       | ۲/۵     |
| نیم زاویه همگرایی نازل ( $\alpha_c/2$ ) | ۱۲ درجه   | قطر فن ( $D_f$ )                           | ۰/۴ متر |
| طول محفظه ورودی ( $L_{SC}$ )            | ۳۰ cm     | طول کلی تونل باد ( $L_t$ )                 | ۴/۱ متر |

به همین دلیل برای صرفه جویی در هزینه از در ساخت تونل باد ارائه شده در این تحقیق از نصب صفحه توری پیش از فن برای خطی کردن جریان فن استفاده می شود. سرعت فن با مد نظر قرار دادن محدودیت نگه داشتن عدد ماخ کافی در نوک پره آن برای جلوگیری از تشکیل امواج ضربه ای (که کیفیت و راندمان فن را به شدت کاهش می دهد)، محدود می شود. تعداد پره های فن تا حدودی دلخواه است، حاصل ضرب تعداد پره ها و وتر آنها کل مساحت را تعیین می کند که باید بر اساس مقدار رانش مورد نیاز انتخاب شود. حداقل به چهار پره برای جلوگیری از ایجاد جریان ضربانی متناوب نیاز است. حداکثر تعداد پره ها نیز توسط ملاحظات استحکام سازه محدود می شود. در واقع برای جلوگیری از تداخل بیش از حد بین پره ها، حداکثر مقدار مجموع وترهای پره،  $N \cdot C$  که  $N$  تعداد پره ها و  $C$  وتر یک پره است،





شکل ۱۳: خطوط هم تراز سرعت (کانتور سرعت) تونل باد مادون صوت در سرعت ۶ متر بر ثانیه

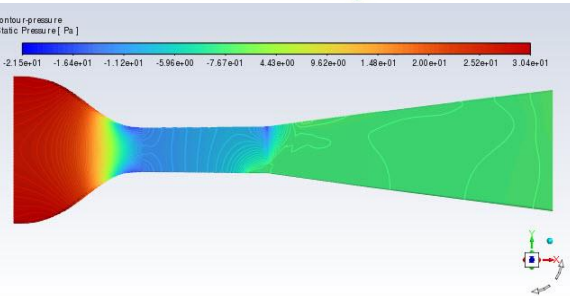
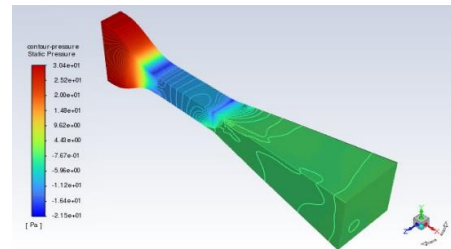
#### ۴- ساخت تونل باد

در این بخش جزئیاتی در مورد ساخت این تونل باد خاص توضیح داده شده است. به عنوان تصمیم یک طراحی، با توجه به سهولت ساخت و ابزارها و امکانات ساخت در دسترس، از صفحات فولادی برای ساخت و پوشش بخش‌های مختلف تونل باد استفاده می‌شود. با توجه به فلزی بودن بدنه و استفاده از روش‌ها و دستگاه‌های خم‌کاری برای ساخت بخش‌های مختلف آن، سعی شده است تا از کمترین اسکلت و سازه بیرونی استفاده شود. از روش جوشکاری قوس الکتریکی دستی<sup>۴</sup> برای اتصال قطعات استفاده شد. در شکل ۱۴ نمونه ای ساخته شده بخش نازل تونل باد بر اساس این روش نشان داده شده است. با استفاده از این نوع ساختار و روش ساخت، دوام طولانی برای تجهیزات، کمک به کاهش لرزش، سهولت در نصب تجهیزات اندازه‌گیری و مدل و منظم بودن سطوح داخلی مورد انتظار است.



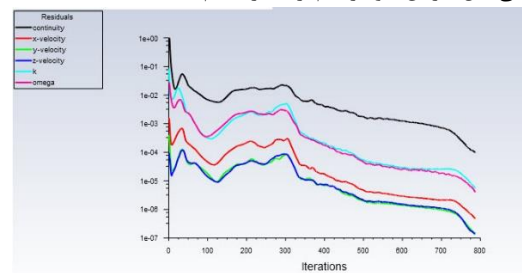
شکل ۱۴: نمونه فولادی ساخته شده بخش نازل با روش جوشکاری قوس الکتریکی دستی (SWAM)

در طول فرآیند ساخت، از فولاد SAE ۱۰۲۰ با پروفیل های فولادی ۳ در ۳ سانتی متر که با دستگاه های برشکاری بسیار دقیق برش داده شدند برای ساخت قاب های اصلی بخش های مختلف تونل باد استفاده شد. محل اتصال بین قطعات فلزی علاوه بر جوشکاری و صیقل کاری دقیق، برای جلوگیری از شکاف و ناهمواری های جزئی با بتونه نیز پوشش داده شدند. سپس علاوه



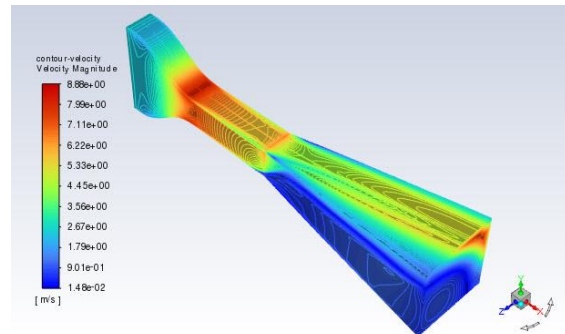
شکل ۱۱: خطوط هم تراز فشار (کانتور سرعت) تونل باد مادون صوت در سرعت ۶ متر بر ثانیه

همچنین برای درک بهتر در انتها به عنوان یک نمونه در شکل (۱۲) همگرایی حل جریان خود را هم ارائه کرده ایم.



شکل ۱۲: نمودار همگرایی حل جریان تونل باد مادون صوت به سرعت ۶ متر بر ثانیه

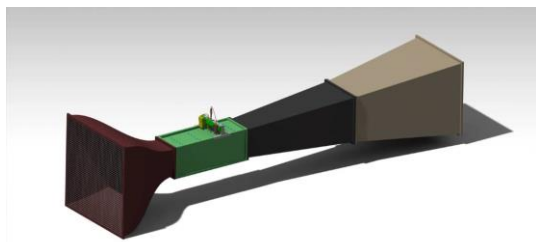
در شکل (۱۳) خطوط هم تراز سرعت (کانتور سرعت) به دست آمده از شبیه سازی جریان با سرعت ورودی ۲.۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است.



چرخش استفاده شده است. شکل ۱۶ و ۱۷ تونل باد نهایی ساخته شده را نشان می دهد که به طور کامل مونتاژ شده و آماده آزمایش است.



شکل ۱۶: تونل باد مادون صوت کم سرعت ساخته شده در آزمایشگاه آیرودینامیک



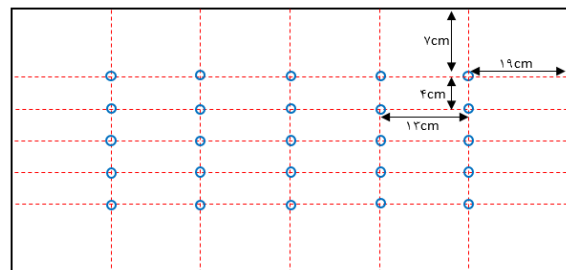
شکل ۱۷: تونل باد مادون صوت کم سرعت طراحی شده در با نرم افزار کتیا

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله جزئیات طراحی و ساخت یک تونل باد مادون صوت کم سرعت مدار باز ارائه شد. با توجه به فرایند ارائه شده نتیجه می-شود که طراحی تونل باد تا حدودی دارای یک رویه استاندارد و یکسان نیست و به شدت به متغیرهایی مانند زیرساخت (ابعاد فضا) در دسترس، الزامات سرعت جریان، هزینه و امکانات ساخت بستگی دارد. دو متغیر اول کاملاً وابسته به اهداف آموزشی و پژوهشی مد نظر در طراحی و ساخت تونل باد هستند و دستیابی به آنها از طریق مراحل طراحی صورت می-گیرد. متغیر هزینه نیز محدودیت های سختی را به طراحی تحمیل می کند. هزینه کل و دسترسی به تجهیزات و قطعات خاص مانند موتور و فن باعث ایجاد محدودیت در طراحی پیکره-بندی-مد نظر شد. بر این اساس یکی از مهمترین مراحل طراحی نه ملاحظات فنی بلکه اقتصادی و دسترسی به قطعات اصلی است. بنابر این یک فهرست تکمیل شده «قطعه و هزینه» باید در ابتدای طراحی مشخص و سازگاری هزینه-ای با توجه به اعتبار مالی در دسترس برآورد و ارائه شود. انتخاب محل نصب فن تونل باد با مد نظر قرار دادن ایجاد بیشترین سرعت و کیفیت جریان ممکن در محفظه آزمایش مونتاژ یکی دیگر از نکاتی است که شایسته توجه بسیار دقیق است زیرا می تواند بر عملکرد کلی تونل باد تأثیر بگذارد. در تحقیق حاضر اولین آزمایش ها که با نصب فن در انتهای تونل باد انجام پذیرفت ناامیدکننده بودند و انتظارات مد نظر را بر آورده نکردند ولی با گسترش محدوده طراحی در نمودار نسبت طول و مساحت دیفیوزر و نصب فن در قسمت داخلی دیفیوزر سرعت و کیفیت جریان بهبود مناسبی یافته و تا حدودی الزامات را تضمین کردند. البته به دلیل ورود برخی از نقاط طراحی دیفیوزر به ناحیه غیر دائم، در بیشینه سرعت چرخش فن برخی ناپایداری-های جریان در حدود سرعت ۳۰ متر بر ثانیه مشاهده شد. بنابر این محققین این تحقیق انجام آزمایش-های مختلف انتخاب فن

بر سطوح بیرونی، سطح داخل کل بخش ها نیز به دقت با رنگ پوشش داده شدند.

به عنوان یکی از الزامات ساخت این تونل باد، سطوح کناری بخش آزمون از جنس پلی کربنات (شفاف) و کف و سقف این بخش نیز به منظور سهولت در نصب مدل و تجهیزات اندازه گیری از ورق فولادی ساخته شدند. به منظور قرار دادن پراب های حسگر جریان سیم داغ و پیتوت-استاتیک در داخل محفظه آزمایش با حداقل نشتی جریان به/از داخل و خارج تونل باد، مجراهایی با قطر منطبق بر قطر پراب ها بر روی دیواره سقف ایجاد شدند (شکل ۱۵). ایجاد این مجراها باعث شدند تا برای اندازه گیری مقادیر سرعت و فشار جریان، حسگرها به راحتی در نقاط و مختصات دلخواه قرار گیرند.



شکل ۱۵: نحوه چیدمان مجراهای قرارگیری پراب های حسگر جریان سیم داغ و پیتوت-استاتیک در داخل محفظه آزمایش

با توجه به اینکه کل مجموعه تونل باد بر روی یک میز دو تکه چرخدار قرار داده شده است بنابر این بخش نازل به صورت لولایی به بخش آزمون وصل شده است. این ساختار به کاربر این اجازه را می دهد که در مواقع لزوم باز کردن دو پیچ و حرکت میز چرخدار و حرکت نازل حول لولاهایی که بر روی آن قرار گرفته است دسترسی کامل به درون محفظه آزمایش و مدل و تجهیزات اندازه گیری و جابجایی آنها فراهم شود. لازم بذکر است که تمامی اتصال های بین بخش-های تونل باد با درزگیرهای خاص و پیچ های مناسب به یکدیگر جفت می شوند تا آب بندی مناسب نیز انجام شده باشد. به منظور افزایش مؤثر سرعت جریان و استفاده حداکثری از توان فن در دسترس همراه با حفظ کیفیت نسبی جریان در داخل محفظه آزمایش، سیستم محرک تونل باد که شامل یک فن و موتور الکتریکی تک فاز آن بود در داخل بخش دیفیوزر نصب شد. بین قاب فن و بدنه تونل باد نیز از مواد جاذب ارتعاش استفاده شد تا ارتعاش احتمالی در هنگام کارکرد موتور و فن به بدنه تونل باد منتقل نشود. برای حذف چرخش جریان ناشی از عملکرد پره های در حال کار فن، از نصب صفحه توری درست در جلوی دیسک



- و روش‌های مختلف نصب آن در محل مناسب قبل از انتخاب و طراحی نهایی تونل باد را توصیه می‌نمایند. در بخش طراحی نازل همگرای تونل باد استفاده از مراجع علمی مختلف که امروزه وجود دارند می‌تواند به شکل نهایی معقولی منجر شود. البته استفاده از ابزارهای اضافی مانند شبیه سازی دینامیک سیالات عددی<sup>۵</sup> نیز برای کمک به بهبود طراحی نهایی و/یا شناسایی برخی از آنها توصیه میشود.
- با توجه به هزینه های بالای مربوط به لانه زنبوری آلومینیومی، از نصب صفحات توری برای کمک به یکنواختی جریان در محفظه آزمون استفاده شد اما در صورت تأمین هزینه و در دسترس بودن، همچنان استفاده از لانه زنبوری آلومینیومی با طول مناسب در بخش محفظه ورودی برای بهبود کیفیت جریان و یکنواختی در بخش آزمون توصیه می‌شود. در نهایت باید گفته شود که تونل باد مذکور امروزه یکی از تجهیزات اصلی در آزمایشگاه آیرودینامیک در دانشگاه امام علی(ع) که با تیم تخصصی متشکل از اساتید و دانشجویان در مدت ۳ ماه ساخته شده است. آزمایشات اولیه نشان داد که الزامات سرعت و کیفیت جریان مورد نیاز برای اهداف آموزشی و پژوهشی پایه تا حدودی با موفقیت برآورده شده است. در مقاله حاضر نکاتی برای طراحی و نکاتی برای مرحله ساخت تجهیزات مشابه ارائه شد و همچنین ابتکارات بیشتر در این زمینه ارائه شده است.
- ۶- تشکر و قدردانی**
- نویسندگان این مقاله مایلند که از دانشکده مهندسی و پرواز دانشگاه افسری امام علی(ع) برای تأمین مالی و امکاناتی برای طراحی و ساخت این تونل باد تشکر نمایند.
- ۸- مراجع**
- [۱] Barlow, B., W.H. Rae, and A. Pope, Low-speed wind tunnel testing. ۱۹۹۹: John Wiley & sons.
- [۲] Bell, J.H. and R.D. Mehta, Contraction design for small low-speed wind tunnels. ۱۹۸۸.
- [۳] Barlow, B., W.H. Rae Jr, and A. Pope, Low speed wind tunnel testing. INCAS Bulletin, ۲۰۱۰. ۷(۱): p. ۱۳۳.
- [۴] Lara, A, J. Toledo, and R.P.S. Romero, Characterization, Design Testing and Numerical Modeling of a Subsonic-Low Speed Wind Tunnel. Ingeniería, ۲۰۲۲. ۲۷(۱).
- [۵] Zanoun, S., Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing. Alexandria engineering journal, ۲۰۱۸. ۵۷(۴): p. ۲۲۶۵-۲۲۷۷.
- [۶] Calautit, J.K., et al., A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, ۲۰۱۴. ۱۲۵: p. ۱۸۰-۱۹۴.
- [۷] Chanzet, B., et al., Experimental Aerodynamics. ۲۰۲۰: Springer.
- [۸] Discetti, S. and A. Ianiro, Experimental aerodynamics. ۲۰۱۷: CRC Press.
- [۹] Cattafesta, L., C. Bahr, and J. Mathew, Fundamentals of wind-tunnel design. Encyclopedia of aerospace engineering, ۲۰۱۰: p. ۱-۱۰.
- [۱۰] Saad, F.G., et al., THE MAIN DESIGNS CRITERIA FOR A LOW SPEED SUBSONIC WIND TUNNEL.
- [۱۱] Tennekes, H., J.L. Lumley, and J.L. Lumley, A first course in turbulence. ۱۹۷۲: MIT press.
- [۱۲] Hernández, M.A.G., et al., Design methodology for a quick and low-cost wind tunnel. Wind tunnel designs and their diverse engineering applications, ۲۰۱۳. ۱: p. ۳-۲۶.
- [۱۳] Monin, A.S. and A.M. Yaglom, Statistical fluid mechanics, volume II: mechanics of turbulence. Vol. ۲. ۲۰۱۳: Courier Corporation.
- [۱۴] Antonia, R.A., et al., Effect of a small axisymmetric contraction on grid turbulence. Experiments in fluids, ۲۰۱۰. ۴۹(۱): p. ۳-۱۰.
- [۱۵] Davis, G.D.V., The flow of air through wire screens, in Hydraulics and Fluid Mechanics. ۱۹۶۴, Elsevier. p. ۱۹۱-۲۱۲.
- [۱۶] Morel, T., Comprehensive design of axisymmetric wind tunnel contractions. ۱۹۷۵.
- [۱۷] Mathew, J., et al. Design, fabrication, and characterization of an anechoic wind tunnel facility. in ۱۱th AIAA/CEAS aeroacoustics conference. ۲۰۰۵.
- [۱۸] Siram, O., et al., Aerodynamic Design and Wind Tunnel Tests of Small-scale Horizontal-axis Wind Turbines for Low Tip Speed Ratio Applications. Journal of Solar Energy Engineering, ۲۰۲۲: p. ۱-۲۴.
- [۱۹] Leifsson, L. and S. Koziel, Simulation-driven design of low-speed wind tunnel contraction. Journal of Computational Science, ۲۰۱۵. ۷: p. ۱-۱۲.
- [۲۰] Almeida, O.d., et al., Low subsonic wind tunnel-Design and construction. Journal of Aerospace Technology and Management, ۲۰۱۸. ۱۰.
- [۲۱] Mohammad Ali Jaz Vaziri and Soheil Namvar. , "Advanced Fluent Education", Imam Hussein University Press, Volume One, Published in ۱۳۹۷. (in Persian)
- [۲۲] امیرمهدی صبوربان راد، علی مهرابی، عبدلعلی حقیری، " بررسی عددی تغییرات جریان حول دو بال ناکا ۰۰۱۲ پشت سر هم دارای حرکت نوسانی پیچینگ در ملخ اصلی ثانویه بالگرد تحت تاثیر اغتشاشات ایجاد شده در بالادست توسط ملخ اصلی اولیه در بالگرد های با دو ملخ اصلی در محدوده جریان مادون صوت (جریان تراکم ناپذیر) "، بیستمین کنفرانس بین المللی انجمن هوافضای ایران سال ۱۴۰۱.