

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک (گرایش تبدیل انرژی)

عنوان:

بهینه سازی دیفیوزر تونل باد مافوق صوت به کمک الگوریتم ژنتیک

استاد راهنما:

دکتر سعید فراهت

استاد مشاور:

دکتر حسام الدین ابن الدین حمیدی

تحقیق و نگارش:

سید مرتضی جوادپور

شهریور ۱۳۸۹

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان بهینه سازی دیفیوزر تونل باد مافوق صوت به کمک الگوریتم ژنتیک قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک توسط دانشجو سید مرتضی جوادپور تحت راهنمایی استاد پایان نامه سعید فراهت تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

(نام و امضاء دانشجو)

این پایان نامه واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ توسط هیئت داوران بررسی و درجه به آن تعلق گرفت.

تاریخ

امضاء

نام و نام خانوادگی

استاد راهنما:

استاد راهنما:

استاد مشاور:

داور ۱:

داور ۲:

نماینده تحصیلات تکمیلی:

تقدیم به:

بزرگ مرد علم و جهاد

دکتر مصطفی چمران

و

پدر و مادرم

دو اسوه

عشق و ایثار

و

همسر مهربانم

سپاسگزاری

سپاس مخصوص خدایی است که آنچه در آسمان ها و زمین است همه ملک اوست و در عالم آخرت نیز شکر و سپاس مخصوص خدایی است که به نظم آفرینش حکیم و به امور عالم آگاه است. حال که با لطف پرودگار این رساله به مراحل پایانی خود رسید جای دارد پس از شکر و سپاس به درگاه الهی باید سپاسگذار زحمات بی شائبه و بی دریغ استاد راهنمای محترم و رئیس محترم گروه مهندسی مکانیک دکتر سعید فراهت، که انجام این رساله بدون راهنمایی های ایشان امکان پذیر نبود، باشم و نیز از مساعدت و نظرات دلسوزانه استاد ارجمند دکتر حسام الدین ابن الدین حمیدی که به عنوان استاد مشاور متحمل زحمات فراوانی شدند و همچنین تشکر خود را از اساتید ارجمند گروه مکانیک دانشگاه دکتر علیرضا حسین نژاد، دکتر سید مسعود حسینی سروری، دکتر امین بهزادمهر، دکتر حسین عجم اعلام دارم.

همچنین از آقایان مهندس علی صناعی و مهندس مصطفی دهقانی و مهندس مهدی جهانبخش در انجام این پایان نامه از راهنمایی ایشان استفاده نمودم تشکر ویژه نموده و برای ایشان آرزوی مدارج بالای علمی و شادکامی در تمامی مراحل زندگی دارم.

در نهایت از همکاری و راهنمایی کارشناسان و اساتید مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر مخصوصاً استاد ارجمند دکتر حسنی آهنگر مدیریت محترم مرکز، مهندس اسلامی، مهندس کمال و مهندس قدک تشکر می نمایم و برای ایشان آرزوی موفقیت می نمایم.

چکیده:

در این پایان نامه، بهینه سازی دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با کمک الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می گیرد. در حال حاضر تونل باد به عنوان یک آزمایشگاه تجربی است که بسیار مورد استفاده قرار می گیرد اما نصب تونل باد بسیار هزینه بر است و طراحان سعی می کنند که با طراحی بهینه اجزای مختلف تونل باد هزینه نصب و تست تونل باد را به حداقل برسانند. لذا تصمیم گرفتیم که با بهینه سازی دیفیوزر به منحنی دست بیابیم که هزینه تونل باد را به حداقل برسانیم.

با توجه به حساس بودن جریان مغشوش و تراکم پذیر در تونل های باد بر آن شدیم که جریان را به صورت دو بعدی با دو مدل اغتشاش SST و Realizable و با در نظر گرفتن لایه مرزی در ابتدای دیفیوزر به تحلیل جریان با ماخ ۴ در تونل باد بپردازیم. و با توجه به تاثیر بسیار هندسه دیفیوزر بر روی عملکرد تونل باد، روند بهینه سازی را بر اساس افزایش راندمان تونل باد انجام داده ایم. همچنین جهت بررسی عملی در تحلیل جریان دیفیوزر مافوق صوت از نمونه دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر استفاده شده است.

جهت افزایش دقت نتایج عددی در این بین از نتایج تجربی دو تونل باد مادون صوت کمک گرفته ایم و از این مقایسه الگو جهت تحلیل عددی دیفیوزر مافوق صوت استفاده کردیم. سپس با توجه به پارامترهای موثر در نتایج عددی مناسبترین دیفیوزر تونل باد مافوق صوت تعیین نموده ایم.

نتایج حاکی از آن است که افزایش ۸۳ درصدی راندمان تونل باد نسبت به حال کنونی را در پی داشتیم و در پایان به دیگر پارامترهای موثری از قبیل زاویه خروجی دیفیوزر مادون صوت و جدایش بر روی راندمان دیفیوزر مافوق صوت تونل باد اشاره کردیم.

کلمات کلیدی: دیفیوزر مافوق صوت، تونل باد، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک، جریان تراکم پذیر، جریان

مغشوش

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل اول: تونل باد، تاریخچه، مروری بر کارهای گذشته.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۲	۲-۱- تاریخچه تونل باد.....
۴	۳-۱- انواع تونل باد.....
۹	۴-۱- تونلهای باد زیر صوت.....
۱۱	۵-۱- تونلهای باد فراصوت.....
۱۴	۶-۱- قسمتهای مختلف تونل باد و وظیفه هر کدام به اختصار.....
۱۵	۷-۱- وظیفه دیفیوزر.....
۱۷	۸-۱- کارهای پیشین.....
۱۹	۹-۱- ضرورت تحقیق.....
۲۱	فصل دوم: الگوریتم ژنتیک.....
۲۲	۱-۲- مقدمه.....
۲۳	۲-۲- مسائل بهینه یابی.....
۲۴	۳-۲- تکنیک های جستجو.....
۲۵	۴-۲- الگوریتم ژنتیک.....
۲۷	۵-۲- اصطلاحات و مفاهیم پایه ای.....
۲۹	۶-۲- جمعیت اولیه.....
۳۰	۷-۲- نگاشت از فضای کروموزومها به فضای پاسخ.....
۳۱	۸-۲- برازندگی کروموزومها.....
۳۱	۹-۲- الگوریتمهای گزینش.....
۳۲	۱-۹-۲- انتخاب قطعی.....
۳۲	۲-۹-۲- مکانیزم چرخ گردان.....
۳۳	۳-۹-۲- انتخاب بر اساس مسابقه.....
۳۳	۱۰-۲- تولید مثل.....
۳۳	۱-۱۰-۲- پیوند.....
۳۴	۱-۱-۱۰-۲- روش پیوند تک نقطه ای.....
۳۵	۲-۱-۱۰-۲- روش پیوند دو یا چند نقطه ای.....
۳۶	۳-۱-۱۰-۲- پیوند همسان.....
۳۷	۴-۱-۱۰-۲- مشکلات پیوند.....
۳۷	۱۱-۲- جهش.....

۳۸	..... ۱۲-۲- استراتژی انتخاب والدین
۳۸	..... ۱۳-۲- شرط همگرایی الگوریتم ژنتیک
	فصل سوم: تعریف مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی و آشنایی با ژورنال
۴۰	..... نویسی
۴۱	..... ۱-۳- تعریف مسئله
۴۲	..... ۲-۳- معادلات حاکم
۴۶	..... ۳-۳- مدل سازی و شبکه بندی
۴۷	..... ۴-۳- مراحل حل یک مسئله با نرم افزار فلوئنت
۴۸	..... ۱-۴-۳- انتخاب نوع حل کننده
۴۹	..... ۲-۴-۳- معادله انرژی
۴۹	..... ۳-۴-۳- انتخاب مدل جریان مغشوش
۴۹	..... ۴-۴-۳- انتخاب خصوصیات فیزیکی سیال عامل
۵۰	..... ۵-۳- تعیین شرایط مرزی در نرم افزار فلوئنت
۵۱	..... ۱-۵-۳- شرط مرزی ورودی فشار
۵۲	..... ۲-۵-۳- شرط مرزی خروجی فشار
۵۳	..... ۳-۵-۳- شرط مرزی فشار در بی نهایت
۵۴	..... ۴-۵-۳- شرط مرزی دیوار
۵۵	..... ۵-۵-۳- شرط مرزی متقارن
۵۶	..... فصل چهارم: تحلیل عددی و تعریف حل مسئله
۵۷	..... ۱-۴- مرحله اول- مدل کردن تونل باد
۵۹	..... ۲-۴- مرحله دوم- استقلال شبکه
۶۰	..... ۳-۴- مرحله سوم- تحلیل جریان در دیفیوزر
۶۱	..... ۴-۴- مرحله چهارم- شروع الگوریتم ژنتیک
۶۵	..... ۱-۴-۱- حالت اغتشاش $\varepsilon - k$ Relizable
۶۸	..... ۲-۴-۴- حالت اغتشاش $\omega - k$ SST
۷۰	..... ۵-۴- مرحله پنجم- تحلیل کامل جریان در تونل باد
۷۳	..... فصل پنجم: استخراج، تحلیل و بررسی نتایج
۷۴	..... ۱-۵- تحلیل بهترین حالات دیفیوزر
۷۹	..... ۲-۵- افزایش راندمان نسبت به حالت عادی
۸۱	..... ۳-۵- اثر مختصات
۸۴	..... ۴-۵- تاثیر زاویه خروجی
۸۶	..... ۵-۵- تاثیر مدل اغتشاش در نتایج
۸۹	..... ۶-۵- جدایش
۹۲	..... فصل ششم: جمع بندی و نتیجه گیری
۹۳	..... ۱-۶- جمع بندی
۹۳	..... ۲-۶- پیشنهادات برای ادامه کار

۹۵	.....مراجع
۹۷	.....پیوست ها
	.....پیوست (الف): ژورنال فایل گمبیت دیفیوزر تونل باد مافوق صوت
	.....پیوست (ب): ژورنال فایل فلوننت دیفیوزر تونل باد مافوق صوت برای مدل اغتشاش
	.....$k - \varepsilon$
	.....پیوست (ج): ژورنال فایل فلوننت دیفیوزر تونل باد مافوق صوت برای مدل اغتشاش SST..
	.....پیوست (د): ویژگی های جریان تک آنتروپی
	.....پیوست (ه): ویژگی های موج ضربه ای قائم

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان جدول
۴۸	جدول ۳-۱- اطلاعات مربوط به منوی solver.
۴۹	جدول ۳-۲- انتخاب مدل جریان مغشوش و گزینه های مربوط به مدل انتخابی در نرم افزار فلوئنت
۵۰	جدول ۳-۳- خصوصیات فیزیکی سیال کاری انتخابی برای تحلیل دیفیوزر تونل باد در نرم افزار فلوئنت
۵۱	جدول ۳-۴- شرایط مرزی انتخاب شده برای دو مدل اغتشاش در نرم افزار فلوئنت
۵۲	جدول ۳-۵- مقادیر و شرایط انتخابی برای شرط مرزی ورودی جریان به عنوان یک شرط مرزی فشار ورودی برای هر دو مدل اغتشاش
۵۳	جدول ۳-۶- شرایط و مقادیر مرزی برای شرط مرزی خروجی به عنوان یک شرط مرزی خروجی فشار برای هر دو مدل اغتشاش
۵۴	جدول ۳-۷- شرایط و مقادیر مرزی برای شرط مرزی فشار در بی نهایت به عنوان یک شرط مرزی فشار در بی نهایت برای هر دو مدل اغتشاش
۵۸	جدول ۴-۱- ضخامت لایه مرزی برای طول های مختلف کانال ابتدایی مدل
۶۰	جدول ۴-۲- راندمان دیفیوزر تونل باد در حالات مختلف شبکه بندی جریان
۷۱	جدول ۴-۳- مقدار ماکزیمم فشار خروجی چندین دیفیوزر
۷۴	جدول ۵-۱- راندمان دیفیوزر تونل باد مافوق صوت در بهترین حالات به دست آمده با استفاده از دو مدل اغتشاش SST و $k - \varepsilon$ Realizable
۸۰	جدول ۵-۲- نسبت فشار گلوگاه به فشار ورودی به دیفیوزر $\frac{P_s}{P_\infty}$
۸۴	جدول ۵-۳- مختصات و راندمان بهترین های الگوریتم ژنتیک برای مدل اغتشاش SST

جدول ۴-۵- مقایسه مدل‌های اغتشاش در زاویه ۱۰ درجه (مقدار تجربی ۰,۰۰۱) در موقعیت

$$X=۳,۲m$$

جدول ۵-۵- راندمان دیفیوزر مادون صوت شکل ۵-۱۱ برای مدل‌های اغتشاش مختلف در زاویه

نصب ۳ درجه

جدول ۶-۵- طول ناحیه جدایش و زاویه و راندمان دیفیوزر مادون صوت

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان شکل
۳	شکل ۱-۱- نخستین تونل باد فراصوتی که به وسیله آدولف بوسمان ساخته شد
۳	شکل ۱-۲- تونل باد ابرصوتی بزرگ در آزمایشگاه هوانوردی رایت، نیروی هوایی ایالات متحده، دیتون، اهایو
۴	شکل ۱-۳- نمونه ای از تونل باد مدار باز
۶	شکل ۱-۴- تونل باد سیکل بسته
۶	شکل ۱-۵- تونل باد کیرستن در دانشگاه واشنگتن
۶	شکل ۱-۶- مدلی در تونل باد کیرستن
۷	شکل ۱-۷- فنهای تونلهای باد ایمر ناسا
۷	شکل ۱-۸- محل قرار گرفتن مدل در تونل باد سیکل باز ناسا
۱۰	شکل ۱-۹- ونتوری
۱۰	شکل ۱-۱۰- تونل باد
۱۰	شکل ۱-۱۱- یک ونتوری که همگرایی و واگرایی شدیدی دارد
۱۱	شکل ۱-۱۲- کارکرد یک تونل باد ونتوری
۱۱	شکل ۱-۱۳- ونتوری فراصوت
۱۲	شکل ۱-۱۴- تونل باد فراصوت
۱۳	شکل ۱-۱۵- تونل باد فراصوت وزشی
۱۳	شکل ۱-۱۶- تونل باد فراصوت خلأی
۱۴	شکل ۱-۱۷- تونل باد دینامیکی گذر صوت لانگلی
۱۵	شکل ۱-۱۸- شماتیک تونل باد مرکز قدر
۱۷	شکل ۱-۱۹- شیپوره ای که به مجرای مساحت ثابت با حضور موج ضربه ای قائم در خروجی مجرا، راه

- ۱۷ شکل ۲۰-۱- طرح تونل باد فراصوتی
- ۱۹ شکل ۲۱-۱- شماتیکی از خطی بودن قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد مافوق صوت مرکز قدر
- ۲۹ شکل ۱-۲- شیوه اجرای الگوریتم ژنتیک
- ۳۳ شکل ۲-۲- گزینش به کمک گردونه‌ی بخت
- ۳۵ شکل ۲-۳- پیوند تک نقطه ای در دو کروموزوم والد
- ۳۶ شکل ۲-۴- روش پیوند دو یا چند نقطه ای در دو کروموزوم والد
- ۳۶ شکل ۲-۵- نحوه اعمال ماسک و تولید کروموزوم های جدید
- ۳۷ شکل ۲-۶- پیوند همسان در دو کروموزوم والد
- ۴۱ شکل ۳-۱- نمایش قسمت همگرای دیفیوزر تونل باد با شیب ثابت
- ۵۱ شکل ۳-۲- شرایط مرزی مدل مسئله
- ۵۸ شکل ۴-۱- نمایش دیفیوزر تونل باد مرکز قدر در فلوئنت
- ۵۸ شکل ۴-۲- پروفیل سرعت در راستای خط عمود در قسمت ورودی دیفیوزر تونل باد
- ۵۹ شکل ۴-۳- نمایش رشد لایه مرزی در قسمت کانال ابتدایی مدل مسئله
- ۶۱ شکل ۴-۴- نمایش قسمتهای مختلف دیفیوزر مافوق صوت
- ۶۱ شکل ۴-۵- نمایش قسمت همگرای تونل باد و مدل مورد تحلیل در مرحله سوم
- ۶۲ شکل ۴-۶- نمایش مختصات طولی سه نقطه دیفیوزر
- ۶۴ شکل ۴-۷- ترکیب نقاط در تابع پنالتهی شماره یک
- ۶۵ شکل ۴-۸- ترکیب نقاط در تابع پنالتهی شماره دو
- ۶۷ شکل ۴-۹- نمودار میانگین M^* جمعیتها بر حسب تعداد تکرارهای الگوریتم با مدل اغتشاش rke
- ۶۸ شکل ۴-۱۰- نمودار M^* بهترینهای جمعیت بر حسب تکرارهای الگوریتم با مدل اغتشاش rke
- ۶۹ شکل ۴-۱۱- نمودار میانگین M^* جمعیتها بر حسب تعداد تکرارهای الگوریتم با مدل اغتشاش SST
- ۶۹ شکل ۴-۱۲- نمودار M^* بهترینهای جمعیت بر حسب تکرارهای الگوریتم با مدل اغتشاش SST
- ۷۱ شکل ۴-۱۳- نمایش تشکیل موجهای ضربه ای در قسمت ثابت دیفیوزر تونل باد

- شکل ۴-۱۴- نمایش جریان برگشتی در تونل باد و تشکیل موجهای ضربه ای قبل از ورود به دیفیوزر ۷۲
- شکل ۵-۱- نمایش کانتور ماک قسمت ثابت دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش SST ۷۶
- شکل ۵-۲- نمایش کانتور ماک قسمت واگرای دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش SST ۷۶
- شکل ۵-۳- نمایش کانتور ماک قسمت همگرا دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش SST ۷۷
- شکل ۵-۴- نمایش کانتور ماک قسمت ثابت دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ Realizable ۷۷
- شکل ۵-۵- نمایش کانتور ماک قسمت واگرای دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ Realizable ۷۸
- شکل ۵-۶- نمایش کانتور ماک دیفیوزر برای بهترین حالت الگوریتم ژنتیک با مدل اغتشاش $k - \varepsilon$ Realizable ۷۸
- شکل ۵-۷- نمایش کانتور ماک حالت شماتیک حال حاضر دیفیوزر مافوق صوت تونل باد مرکز قدر ۷۹
- شکل ۵-۸- نمودار رابطه بین ماک جریان آزاد و مقدار بازیافت فشار بر حسب زاویه نصب دیفیوزر ۸۰
- شکل ۵-۹- رابطه بازیافت فشار بر اثر شوک با ماک گلوگاه و ماک جریان آزاد ۸۱
- شکل ۵-۱۰- مقایسه دو پروفیل منحنی اول و دوم دیواره دیفیوزر ۸۲
- شکل ۵-۱۱- مقایسه دو پروفیل منحنی سوم و چهارم دیواره دیفیوزر ۸۳
- شکل ۵-۱۲- مقایسه دو پروفیل منحنی سوم و پنجم دیواره دیفیوزر ۸۳
- شکل ۵-۱۳- دیفیوزر مافوق صوت با زاویه نصب θ ۸۵
- شکل ۵-۱۴- مقایسه نتایج تجربی و عددی اختلاف ضریب فشار در زوایای مختلف نصب دیفیوزر تونل باد مادون صوت ۸۵
- شکل ۵-۱۵- تونل باد مادون صوت ۸۷
- شکل ۵-۱۶- دیفیوزر تونل باد مادون صوت ۸۷
- شکل ۵-۱۷- نمایش تشکیل شوک قبل از دیفیوزر (کانتور ماک) ۹۰

شکل ۵-۱۸- نمایش تشکیل پدیده جدایش در قسمت همگرای دیفیوزر بدون تاثیر غالب بر جریان
(پروفیل سرعت)

شکل ۵-۱۹- عدم تشکیل پدیده جدایش در قسمت همگرای دیفیوزر (پروفیل سرعت)

فهرست علائم

علائم لاتینی	نشانه
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت
C_f	ضریب اصطکاک
f	تابع هدف
h	آنتالپی
k_{eff}	ضریب هدایت حرارتی مؤثر
k	ضریب هدایت حرارتی سیال
L	طول ورودی تونل باد
M_{in}	ماخ
M^*	مقدار ماخ در گلوگاه
M_{out}	ماخ خروجی از دیفیوزر
M_w	وزن مولکولی هوا
p	فشار
p_{op}	فشار عملکرد
p_0^{OUT}	فشار کل در خروج از دیفیوزر
p_0^{IN}	فشار کل در ورود به دیفیوزر
Pr_t	پرانتل توربولانس
r	شعاع خمیدگی گوشه دیفیوزر
R	ثابت معادله گازها
Re	عدد رینولدز
T	دما

مولفه سرعت متوسط گیری شده جرمی	u
سرعت نوسانی	u'
سرعت در راستای x	U
سرعت در راستای y	V
سرعت در راستای z	W
مختصه طولی نقطه اول	X_1
مختصه طولی نقطه دوم	X_2
مختصه طولی نقطه سوم	X_3

علائم یونانی نشانه

زاویه انحراف	α
زاویه موج	β
ثوابت معادلات	$\beta_i, \zeta, R_\beta, \beta_\infty^*, \sigma_\omega$
ضخامت لایه مرزی	δ
راندمان دیفیوزر	η
ویسکوزیته توربولانس	μ_t
ویسکوزیته سیال	μ
ویسکوزیته موثر	μ_{eff}
زاویه نصب دیفیوزر	θ
چگالی سیال	ρ

فصل اول

تونل باد، تاریخچه و مروری بر کارهای گذشته

یکی از اساسی ترین نتایج در مباحث مکانیک سیالات و آیرودینامیک نتایج تجربی است حتی با توجه به پیشرفت رایانه های امروزی اما بازهم نتایج تجربی جایگاه خود را حفظ کرده است. بعضی اوقات نمی توان به نتایج عددی اعتماد کافی کرد لذا همچنان نتایج تجربی کاربرد و جایگاه خود را حفظ می کند.

یکی از روشهای تجربی استفاده از نتایج تونل باد می باشد و امروزه تونل های باد جایگاه وسیعی را در استخراج نتایج تجربی در بر دارد. تونل های باد از قسمتهای مختلفی تشکیل شده است اما مهمترین و حساس ترین قسمت تونل باد نازل و دیفیوزر تونل باد است. در تونل باد مافوق صوت دیفیوزر تونل باد نقش بسیار حساس و مهمی را در افزایش راندمان به عهده دارد.

آزمایشهای آیرودینامیکی حتی قبل از اولن پرواز نیز انجام می شد. اکثر تونلهای باد اولیه به منظور آزمایش حرکت سیال بوده است. دانشمندانی که چنین دستگاه هایی را ساختند به پرواز علاقه مند نبودند اما به فیزیک سیالات علاقه داشتند. برادران رایت را می توان به عنوان اولین آزمایشگران طرحهای آیرودینامیکی در تونل باد دانست. برادران رایت به ارزش اطلاعات آیرودینامیکی پی بردند و تونل باد و وسیله ای ساختند که می توانست نیروی برا را اندازه بگیرد.

۱-۲- تاریخچه تونل باد

فرانسیس^۱ عضو شورای جنگی بریتانیای بزرگ موضوعاتی را در علم آیرودینامیک مورد توجه و بررسی قرار داد و با طراحی و ساخت اولین تونل باد در سال ۱۸۷۱ اقدام نمود و راه اندازی کرد. بار دیگر محققین موفق به طراحی ابزاری شده اند که با آن می توانستند سریعاً به اطلاعات فنی دست یابند. ونهام^۲ و همکارانش با کشفیات اساسی، تجهیزات لازم شامل ابزار اندازه گیری نسبتهای نیروی برا به پسا و ... را ساختند. [۱]

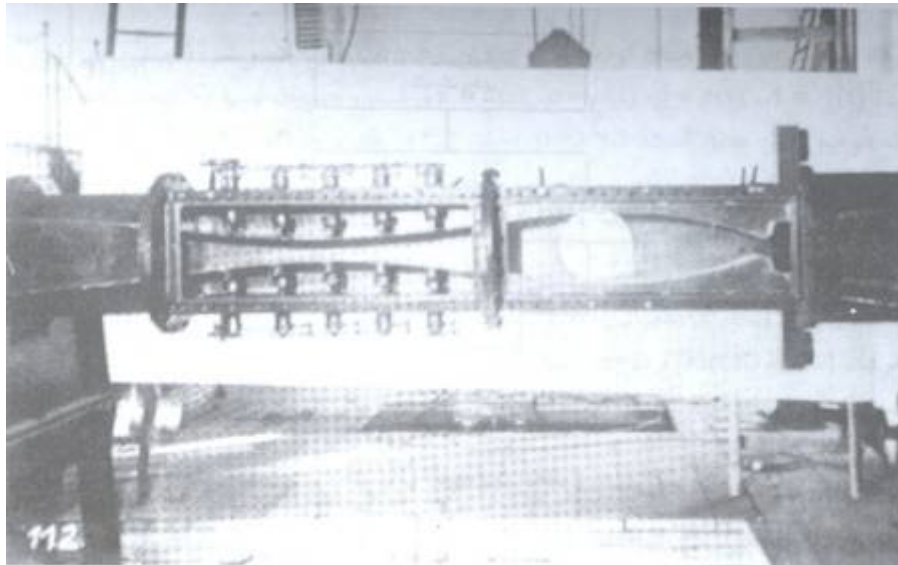
در اواسط دهه ۱۹۳۰ میلادی نخستین تونل باد فراصوتی کاربردی به وسیله آدولف بوسمان^۳ در آلمان ساخته شد، هر چند گرنتل در اوایل سال ۱۹۰۵ میلادی از تونل باد فراصوتی کوچکی برای بررسی موجهای ضربه ای استفاده کرد. در شکل تصویری از تونل باد بوسمان دیده می شود. این گونه آزمایشگاه ها در خلال جنگ جهانی دوم و پس از آن به سرعت گسترش یافتند. امروزه، همه آزمایشگاه ههای آیرودینامیکی پیشرفته

^۱ -Francis Herbert Wenham

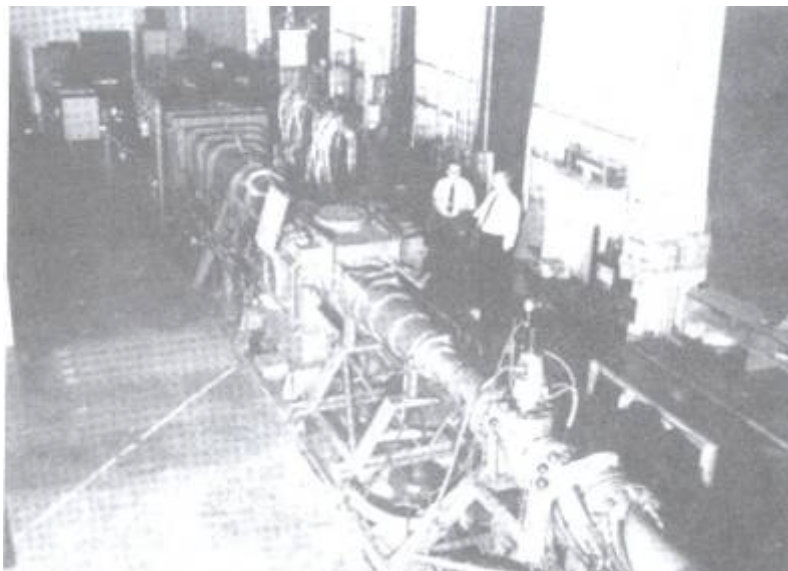
^۲ -Wenham

^۳ -Adolf Busemann

به یک یا چند تونل باید فراصوتی و بسیاری از آنها به تونلهای باد ابروتی مجهز هستند. در شکل نمونه ای از تونل باد ابرصوتی نسبتاً بزرگی دیده می شود. [۲]



شکل ۱-۱. نخستین تونل باد فراصوتی که به وسیله آدولف بوسمان ساخته شد [۱۴]



شکل ۱-۲. تونل باد ابرصوتی بزرگ در آزمایشگاه هوانوردی رایت^۱، نیروی هوایی ایالات متحده، دیتون،

اهاپو [۱۴]

^۱ - Wright