ساختار و پارامترهای عملکردی تونل های باد مافوق صوت

عباس طربی[1]، سعیده خطیبی راد[2]

۱ استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، abbastarabi@mut.ac.ir

۲ دکتری مهندسی هوافضا، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۹

چکیده

از دههٔ ۴۰ م تاکنون، تونل‌های باد مافوق صوت به‌عنوان ابزاری مؤثر و کارآمد برای انجام تست‌های ائرودینامیکی، پیشرانشی و اکوستیکی وسائل پرنده در صنعت هوافضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیشرفت عمدهٔ انسان در زمینهٔ دستیابی به پرنده‌ها، پرتابه‌ها و موشک‌هایی با سرعت‌های بالا پیامد استفادهٔ روزافزون از تونل‌های باد مافوق صوت بوده است. در این تحقیق، ساختار کلی تونل‌های باد مافوق صوت از نظر جریان (پیوسته و متناوب) همراه با مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به گسترهٔ وسیع تغییرات پارامترهای عملکردی تونل‌های باد مافوق صوت، در این پژوهش تحلیلی آماری براساس نمودارهای درصد فراوانی پارامترهای اصلی انجام و نتایج حاصل ارائه شده است. براساس مطالعات آماری صورت‌گرفته، به‌طور تقریبی ۷۷ درصد از تونل‌های باد مافوق صوت موجود در دنیا از نوع دمشی، ۱۳ درصد از نوع مکشی و ۱۰ درصد از سایر انواع می‌باشند. اکثر تونل‌های باد مافوق صوت، محدودهٔ ماخ تا زیر ۳/۵ را پوشش می‌دهند و فقط ۱۹ درصد آنها در ماخ بیش از ۳/۵ نیز عمل می‌کنند. بیش از ۹۰ درصد از تونل‌های باد مافوق صوت دمشی دارای مقطع آزمون مربعی‌شکل و زمان کارکرد بین ۶۰ تا ۸۰ ثانیه هستند.

واژگان کلیدی

تونل باد، مافوق صوت، مکشی و دمشی، فشار - خلأ، جریان پیوسته و متناوب

۱. مقدمه

در تدارک مقدمات پرواز هر وسیلهٔ پرنده اعم از هواپیما، پهپاد، موشک و پرتابه علوم متنوعی دخیل است؛ یکی از پرکاربردترین آنها، ائرودینامیک است. این شاخه از دانش، خود دارای شاخه‌های متنوع دیگری چون ائرودینامیک تجربی، عددی و تحلیلی می‌باشد. در ائرودینامیک تجربی، یکی از ابزارهایی که طی سالیان متمادی قابلیت خود را اثبات کرده تونل باد می‌باشد. این وسیله از آن جهت مورد توجه قرار می‌گیرد که می‌توان توسط آن مدلی از جسم اصلی را با شرایط دلخواه آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی

قرار داد و نتایج حاصل را برای نمونهٔ اصلی وسیلهٔ پرنده، استفاده کرد. امروزه به‌علت گسترش روزافزون نقش وسائل پرنده در جهان، خصوصاً نقش تعیین‌کنندهٔ آنها در جنگ‌های پیشرفته، انجام تحقیقات مختلف ائرودینامیکی و هوافضایی از اهمیت بسزایی برخوردار شده است. در واقع همین امر، زمینهٔ افزایش سرمایه‌گذاری در ساخت و تجهیز انواع تونل‌های باد را فراهم نموده است [۱].

محاسبات مربوط به طراحی ائرودینامیکی انواع پرنده‌ها و داده‌های ائرودینامیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی پرواز این وسائل پرنده معمولاً با چند آزمایش در تونل باد اعتبارسنجی می‌گردند. در واقع اگرچه در حوزهٔ دینامیک سیالات عددی و تحلیل عددی ائرودینامیک اجسام پرنده، چه در شاخهٔ نرم‌افزار و چه در شاخهٔ سخت‌افزار پیشرفت‌های شایانی صورت گرفته، اما هنوز صحه‌گذاری نهایی این تحلیل‌ها بدون انجام آزمایش‌های تونل باد امکان‌پذیر نیست [۲].

پژوهشگران زیادی داخل کشور، در زمینهٔ تونل‌های باد مافوق صوت تحقیقات تجربی و عددی متعددی انجام داده‌اند که به بعضی از انها در مراجع [۳] تا [۹] اشاره شده است. در تحقیق حاضر نیز ساختار اصلی تونل‌های باد مافوق صوت مورد بررسی قرار گرفته و مطالعات آماری در مورد پارامترهای اصلی آنها انجام شده است.

۲. تاریخچهٔ تونل باد

نخستین تونل باد با مفهوم امروزی آن، در سال ۱۸۷۱ م توسط فرانسیس ونهام[۱]، در شهر گرینویچ انگلستان، ساخته شد. نخستین تونل باد تحقیقاتی و بزرگ ساخت ناکا[۲] در سال ۱۹۲۰ م در آزمایشگاه هوانوردی لانگلی مورد استفاده قرار گرفت. این تونل با مقطع آزمونی به قطر ۱/۵۳ متر می‌توانست مدل‌هایی با پهنای حداکثر ۱/۱ متر را در خود جای دهد. در سال ۱۹۳۶ م، در همین آزمایشگاه تونل بزرگی با مقطعی به ضلع ۲/۴ متر و سرعت ۲۲۴ متر بر ثانیه ساخته شد که در سال ۱۹۴۵ سرعت آن به ۳۴۰ متر بر ثانیه افزایش یافت. در سال ۱۹۴۱ در مرکز تحقیقاتی ایمز[۳] تونلی با سرعت بالا ساخته شد که دارای مقطعی به ضلع ۴/۹ متر و سرعت ۳۰۴ متر بر ثانیه بود. نخستین تونل باد مافوق صوت ایالات متحدهٔ امریکا توسط تئودور ون‌کارمن[۴] و همکارانش از دانشگاه کالیفرنیا طراحی و در آزمایشگاه تحقیقات بالستیک ارتش در شهر آبردین ایالت مریلند[۵] ساخته شد. همچنین در سال ۱۹۵۰ یکی از بزرگترین تونل‌های باد مافوق صوت پیوسته با مقطع آزمونی به ابعاد ۴/۹×۴/۹ متر در مرکز توسعهٔ مهندسی آرنولد[۶] در تنسی امریکا به‌کار گرفته شد. در دهه ۶۰، با افزایش چشمگیر برنامه‌های فضایی و پیشرفت موشک‌های بالستیک، تونل‌های باد با سرعت زیاد مطرح شدند. نخستین تونل باد ابرصوت توسط ناکا در سال ۱۹۴۷ در لانگلی طراحی و ساخته شد. این تونل دارای مقطع آزمون ۲۸ سانتی‌متر مربع و حداکثر سرعتی برابر ۶/۹ ماخ بود. سه سال بعد، تونل بادی با عدد ماخ ۸/۲۵ و دمای سکون زیاد توسط آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا ساخته و معرفی شد [۱۰].

۳. نقش تونل‌های باد در فرایند طراحی وسائل پرنده

فایند طراحی وسائل پرنده ترکیبی از نتایج برنامه‌های محاسباتی و آزمایش‌های تجربی است. آزمایش‌های تجربی توسط تونل‌های باد و آزمایش‌های پروازی با بررسی میدان جریان اطراف وسیلهٔ پرنده انجام می‌شود. در روش‌های محاسباتی (تحلیلی و عددی) با شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف پرنده و استفاده از معادلات حاکم بر جریان هوا نظیر معادله‌های ناویر استوکس و نیز با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه، با استفاده از روش‌های گوناگون، جریان هوا در اطراف مدل بررسی می‌شود.

اگرچه در دهه‌های اخیر رایانه‌ها رشد نموده و درپی آن کاربرد روش‌های عددی ارتقاء یافته است، اما برای تأیید داده‌های به‌دست‌آمده از روش عددی به استفاده از روش‌های تجربی نیاز است. برای طراحی و بهینه‌نمودن روند طراحی وسائل پرنده بهتر است هم از روش محاساتی (عددی) و هم از روش تجربی (آزمایش تونل باد) استفاده نمود. روش‌های محاسباتی و روش آزمایش تونل باد مکمل یکدیگر می‌باشند. در مراحل اولیهٔ طراحی یک وسیلهٔ پرنده، با استفاده از کدهای عددی می‌توان رفتار جریان هوا را روی مدل‌های پیشنهادی بررسی نمود و تعداد گزینه‌های طراحی را کاهش داد. در مرحلهٔ دوم طراحی، نمونه‌ها باید در تونل باد آزمایش شوند که تنها چند مورد برای انجام آزمایش‌های تونل باد پذیرفته می‌شوند. از اینرو به‌کمک روش عددی، تعداد آزمایش‌هایی که باید در تونل باد انجام شود کاهش می‌یابد و هزینهٔ کمتر می‌شود. همچنین با مقایسهٔ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تونل باد، کدها و

مدل‌های شبیه‌سازی عددی اصلاح می‌شوند. پس از به‌دست آوردن نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش تونل باد، با استفاده از آزمایش پرواز آزاد می‌توان اصلاحات لازم در طراحی را ایجاد نمود و دوباره آزمایش‌های تونل باد را تکرار کرد. مراحل آزمایش و بهینه‌نمودن طراحی می‌تواند به همین ترتیب ادامه یابد تا به نتیجه مطلوب برسد [۱۱].

۴. دسته‌بندی تونل‌های باد

دسته‌بندی تونل‌های باد از جهات مختلفی می‌تواند صورت گیرد؛ این نوع دسته‌بندی معمولاً براساس عدد ماخ کاری، روند کارکرد، موارد استفاده و نمونه‌هایی از این قبیل می‌باشد [۱۲].

۴-۱. دسته‌بندی بر اساس عدد ماخ

تونل‌های باد از نظر سرعت جریان هوا در مقطع آزمون به چهار دستهٔ اصلی (زیرصوت[۷]، گذر صوت[۸]، مافوق صوت[۹] و ابرصوت[۱۰]) تقسیم می‌شوند (جدول ۱). تونل‌های باد مافوق صوت و ابرصوت را تونل‌های باد با سرعت بالا[۱۱] نیز می‌نامند. بعضی از کاربردهای تونل‌های باد مافوق صوت شامل اندازه‌گیری نیروها و گشتاور با استفاده از سیستم بالانس، اندازه‌گیری توزیع فشار روی مدل، مشاهدهٔ الگوی جریان حول یک مدل با استفاده از سیستم نوری (اپتیک شلرین[۱۲])، مشاهدهٔ شکل امواج ضربه‌ای حول مدل با استفاده از سیستم نوری و مطالعهٔ آثار لایهٔ مرزی روی مدل می‌باشد.

جدول ۱. دسته‌بندی انواع تونل‌های باد بر اساس عدد ماخ

بازهٔ تقریبی تغییر عدد ماخ در بخش آزمون	نوع تونل باد براساس عدد ماخ آزمون
$M<0.8$	زیرصوت
$0.8<M<1.2$	گذرصوت
$1.2<M<5$	مافوق‌صوت
$M>5$	ابرصوت

٤-۲. دسته‌بندی از نظر کاربرد

تونل‌های باد کاربردهای آموزشی[۱۳]، آزمایشگاهی[۱۴]، صنعتی[۱۵] و تحقیقاتی[۱۶] دارند. هدف از نوع آموزشی تونل باد، نمایش چگونگی عملکرد تونل و انجام آزمایشات محدودی در آن برای نمایش هرچه بهتر کاربردهای تونل و خواص ائرودینامیکی اجسام به افراد می‌باشد. این نوع تونل بیشتر در دانشگاه‌ها و مراکز علمی به‌منظور آموزش افراد و آشناکردن آنها با این وسیله می‌باشد. در نوع آزمایشگاهی، هدف بررسی و مطالعهٔ نتایج حاصل از آن در زمینهٔ پدیده‌های مختلف ائرودینامیکی و صنعتی است. این نوع مطالعات در سطح متوسطی انجام می‌پذیرد و مفاهیم گوناگونی چون ایجاد لایهٔ مرزی و آثار هوا و باد بر جسم متحرک یا ساکن، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در تونل‌های با کاربرد صنعتی، استفاده‌های مختلف آن در صنعت مورد توجه قرار می‌گیرد و از نتایج حاصل از تونل باد، برای بهینه‌سازی و ایجاد طرح‌های مناسب صنعتی بهره‌برداری می‌شود. این تونل‌ها در شکل‌های متفاوت و تنها برای کسب نتایج ویژه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند. در نوع تحقیقاتی تونل، این وسیله برای طراحی و کسب نتایج مطلوب روی یک جسم متحرک یا ساکن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۳. انواع تونل‌های باد با کاربردهای ویژه

در کاربردهای صنعتی و هوافضایی، برای رفع نیازهای ویژه و احتیاجات معین، تونل‌هایی با کاربردهایی ویژه طراحی و ساخته می‌شوند که معمولاً عملکرد محدودی دارند و تنها نتایج مشخصی ارائه می‌دهند. به‌علت وجود مسائل مختلف در کلیهٔ شاخه‌های صنعتی در ارتباط با تونل باد، این تونل‌ها گسترش و توسعهٔ نسبتاً زیادی یافته‌اند. از جمله این تونل‌ها می‌توان به تونل چگالی متغیر، تونل با عدد رینولدز بالا، تونل پرواز آزاد، تونل چرخش، تونل پرنده‌های عمودپرواز، تونل پایداری، تونل دوبعدی، تونل یخ، تونل چندمنظوره، تونل اتومبیل، تونل ملخی، تونل دود، تونل القایی، تونل موتور احتراقی، تونل لایهٔ مرزی، تونل سازه‌ها ، تونل تند باد، تونل ائروالاستیک و جز این‌ها اشاره کرد.

۵. ارزیابی ساختارهای مختلف تونل‌های مافوق صوت

تونل‌های باد مافوق صوت به دو دستهٔ اصلی، شامل تونل‌های باد با جریان هوای پیوسته[۱۷] و تونل‌های باد با جریان هوای لحظه‌ای (متناوب)[۱۸] تقسیم می‌شوند. در ادامه این بخش، در مورد هر یک از این تونل‌ها و مزایا و معایب هر کدام در محدوده‌های مختلف کاری توضیح مختصری ارائه می‌شود [۱۳].

۵-۱. تونل‌های مافوق صوت جریان پیوسته

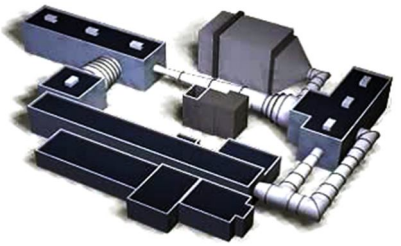
یک تونل باد جریان پیوسته می‌تواند از نوع مدار بسته[۱۹] یا باز[۲۰] باشد [۱۳]. این تونل از قسمت‌هایی چون کمپرسور، خنک‌کن، انقباض‌کننده، نازل، مقطع آزمون، دیفیوزر، کانال برگشت (در حالت مدار بسته) و سیستم خشک‌کن تشکیل شده است. کمپرسور

اختلاف فشار لازم در مدار را ایجاد می‌کند. همچنین باید از یک خنک‌کن در مدار این نوع از تونل باد به‌منظور ثابت نگه داشتن مقدار دمای سکون (گرمای اضافه‌شده به هوا توسط عبور هوا از کمپرسور) استفاده شود. به‌دلیل توان مورد نیاز و حجم هوای زیادی که باید به‌طور پیوسته خشک شود، عموماً این تونل‌ها از نوع مدار باز نمی‌باشند. در شکل ۱ نمونه‌ای از تونل باد پیوسته نمایش داده شده است. برخی از مزایای تونل‌های جریان پیوسته عبارت‌اند از:

۱. کنترل پارامترها و شرایط تست راحت‌تر است (نسبت به تونل باد جریان لحظه‌ای)؛ زیرا زمان بیشتری برای استخراج اطلاعات وجود دارد
۲. شرایط آزمایش را برای مدت زیادی می‌توان ثابت نگه داشت

همچنین برخی از معایب این تونل‌ها عبارت‌اند از:

۱. هزینهٔ بسیار بالای ساخت نسبت به تونل‌های باد جریان لحظه‌ای
۲. اگر زمان انجام تست زیاد باشد، به خنک‌کاری هوا یا ابزاری برای تهویه نیاز دارند



شکل۱. نمایی از تونل باد جریان پیوسته [۱۴]

۵-۲. تونل‌های باد مافوق صوت جریان لحظه‌ای (متناوب)

این دسته از تونل‌ها خود به سه دستهٔ تونل‌های دمشی[۲۱]، تونل‌های مکنده[۲۲] و تونل‌های فشار خلأ[۲۳] تقسیم می‌شوند. از بزرگترین مشخصه‌های این دسته از تونل‌ها، زمان تست محدود (به‌دلیل محدودیت ظرفیت مخازن هوا) می‌باشد. زمان تست می‌تواند از چند ثانیه تا چند دقیقه تغییر کند که به میزان فشار، ظرفیت مخزن و دبی جرمی که در واحد زمان از مقطع آزمون می‌گذرد، وابسته است. پس از هر تست، مخازن توسط کمپرسورها یا پمپ‌های خلأ به شرایط قبل از تست بازمی‌گردند. این تونل‌های باد در مقایسه با تونل‌های جریان پیوسته با همان مقطع آزمون و مشخصه‌های ائرودینامیکی به توان کمتری نیاز دارند. عموماً زمان بین تست‌ها، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از زمان انجام خود تست می‌باشد. برخی از مزایای تونل‌های جریان لحظه‌ای عبارت‌تند از [۱۳]:

۱. طراحی نسبتاً ساده‌ای دارند و معمولاً هزینهٔ ساخت آن کم است (نسبت به تونل‌های جریان پیوسته)
۲. با یک بار تأمین هوای مورد نیاز در مخازن می‌توان چندین تونل با قابلیت‌های متعدد را در زمانی مشخص فعال نمود
۳. توان اضافی برای فعال‌سازی تونل در دسترس می‌باشد
۴. به‌دلیل به‌کار افتادن سریع تونل، بار وارده بر مدل در زمان رسیدن به جریان ابرصوت کمتر می‌باشد

از طرفی برخی از معایب تونل‌های جریان لحظه‌ای (ناپیوسته) عبارت‌اند از:

۱. شرایط تست را نمی‌توان برای مدت زیادی ثابت نگه داشت
۲. همواره باید از ابزار کنترلی دقیق با قابلیت عملکرد سریع استفاده کرد؛ زیرا زمان انجام تست کوتاه است
۳. پیچیدگی ساخت مخازن ذخیرهٔ هوا به‌خصوص برای فشارهای بالا

همانطور که گفته شد، تونل‌های باد جریان لحظه‌ای به سه دستهٔ تونل‌های دمشی، تونل‌های مکنده و تونل‌های فشار خلأ تقسیم می‌شوند. در ادامه دربارهٔ هر یک از تونل‌های باد توضیحاتی ارائه می‌شود.

۵-۲-۱. تونل‌های باد مافوق صوت دمشی

یک تونل باد جریان لحظه‌ای دمشی مطابق شکل ۲ شامل قسمت‌های زیر می‌باشد [۱۵]:

۱. یک مخزن یا تعدادی از مخازن که سیستم ذخیره نامیده می‌شود و تحت فشار می‌باشد. وزن هوای ذخیره‌شده در این مخازن تابعی از ماکزیمم فشار بهره‌برداری و حجم آن است. دمای هوا در سیستم ذخیره در شروع تست نزدیک به دمای محیط است.
۲. سیستم پمپاژ که شامل یک کمپرسور یا سیستمی از کمپرسورها با خنک‌کن، فیلتر روغن و یک خشک‌کن می‌باشد. توان سیستم کمپرسور، زمان بین تست‌ها را برای یک دبی جرمی داده شده تعیین می‌کند. همچنین

خشک‌کن معمولاً بین کمپرسور و سیستم ذخیره هوا قرار می‌گیرد.

۳. یک تنظیم‌کنندهٔ فشار که معمولاً در پایین‌دست خشک‌کن قرار داده می‌شود تا خشک‌کن همواره در فشار ثابت مستقل از فشار سیستم ذخیره نگه داشته شود.

۴. یک سیستم کنترل فشار و دما به‌همراه لوله‌های فشار قوی که تونل باد را به مخزن هوا وصل می‌کند. فشار و دمای هوای مخزن در خلال تست تغییر می‌کند. لذا برای اینکه شرایط در مقطع آزمون ثابت نگه داشته شود، به یک سیستم کنترل نیاز است. با استفاده از شیرهای تنظیم‌کننده فشار، میزان فشار ثابت نگه داشته می‌شود.

۵. محفظهٔ آرامش که معمولاً هوا پس از عبور از کنترل‌کننده‌های فشار و دما به‌وسیلهٔ لوله‌های فشار بالا وارد آن می‌شود. همچنین لانه‌زنبوری‌ها و توری‌ها جهت یکنواختی جریان در این ناحیه نصب می‌شوند.

۶. نازل، مقطع آزمون، دیفیوزر و صداخفه‌کن که در انتها جریان هوا با سرعت نسبتاً کم مجدداً وارد اتمسفر می‌شود.

۵-۲-۲. تونل‌های باد مافوق صوت مکشی

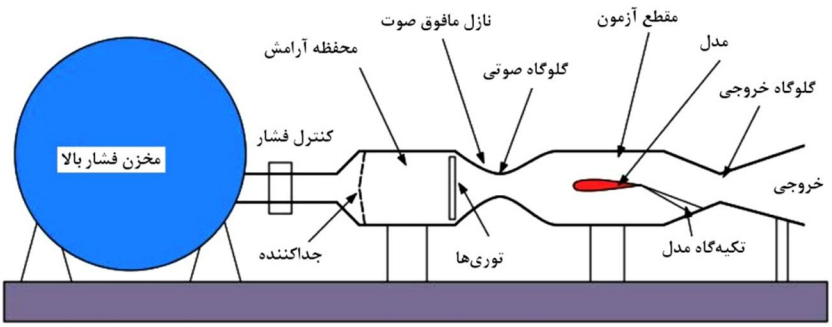
در این نوع از تونل‌های باد، هوا از اتمسفر گرفته شده و به داخل یک مخزن خلأ، مکیده می‌شود. در واقع این نوع از تونل‌ها دارای قسمت‌های مشابه با تونل‌های باد دمشی هستند. تنها تفاوت این تونل‌ها با نوع دمشی این است که به‌جای سیستم ذخیرهٔ هوا داری مخزن خلأ و پمپ خلأ می‌باشند (شکل ۳).

۵-۲-۳. تونل‌های باد فشار - خلأ

تونل‌های فشار - خلأ (شکل ۴) ترکیبی از تونل‌های باد دمشی و تونل‌های باد مکنده هستند. در این نوع از تونل‌ها هوای فشرده‌شده پس از جاری‌شدن در داخل تونل، از آن خارج می‌شود و به‌سمت مخازن خلأ می‌رود. تونل‌های فشار - خلأ بیشتر در مواقعی به‌کار می‌روند که فشارهای مورد نیاز برای عملکرد یک تونل باد مافوق صوت بسیار زیاد باشد. در این‌صورت می‌توان با تخلیه هوای تونل به‌سمت یک مخزن فشار پایین، نسبت فشار کلی مورد نیاز در تونل را (بدون بالا بردن بیش‌ازحد فشار مخازن) بالا برد.

۶. تونل‌های باد موجود در دنیا و مطالعات آماری آنها

در جدول ۲ آمار تونل‌های باد مهم موجود در دنیا براساس کشورها و مناطق مختلف آمده است. با بررسی مشخصات کامل حدود ۲۰۰ تونل باد مافوق صوت که اکثر آنها از مراجع [۱۶] و [۱۷] بوده، نمودارهای درصد فراوانی تونل‌های باد مافوق صوت براساس پارامترهای اصلی در بخش‌های بعدی رسم شده است. در ادامه، برای شناخت و آشنایی بیشتر از نحوهٔ رسم نمودارها، برای نمونهٔ مشخصات بعضی از تونل‌های باد مافوق صوت دنیا آورده شده است.



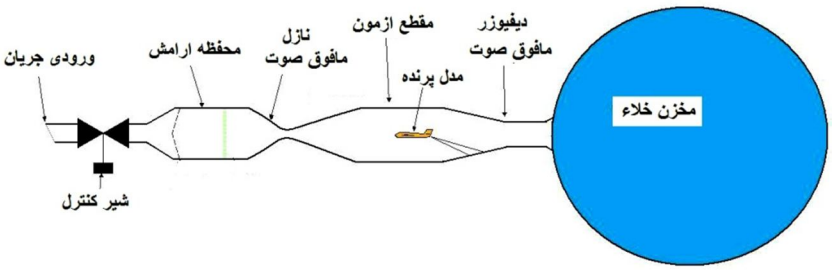
شکل ۲. تونل باد مافوق صوت دمشی [۱۵]

۶-۱. معرفی چند تونل باد مافوق صوت

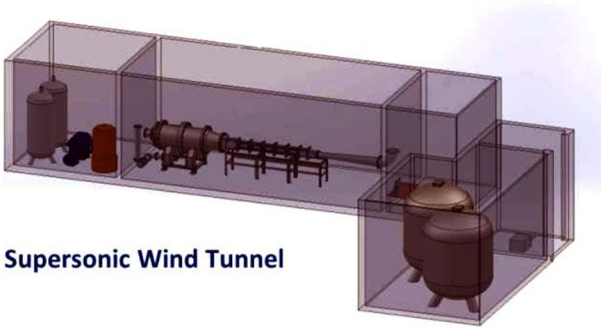
۶-۱-۱. تونل باد مافوق صوت یک در یک متر ژاپن

تونل باد مافوق صوت ژاپن با مقطع آزمون ۱×۱ متر، در سال ۱۹۶۱ م ساخته شد و در سال ۱۹۹۰ م توسعه یافت و در مرکز فناوری تونل باد آژانس اکتشافات هوافضایی در توکیو ژاپن قرار گرفت. این تونل از نوع دمشی تناوبی است و محدودهٔ ماخ ۱/۴ تا ۴

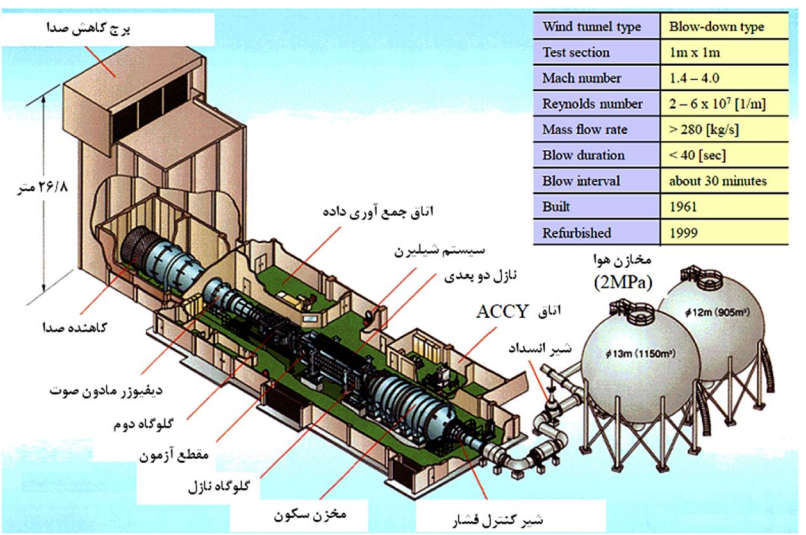
را پوشش می‌دهد. زمان کارکرد تونل باد مذکور ۴۰ ثانیه است و بین دو کارکرد متوالی باید ۳۰ دقیقه فاصلهٔ زمانی باشد. نازل دوبعدی انعطاف‌پذیر آن با چندین جک الکتریکی عمل می‌کند. دبی جرمی جریان در این تونل ۲۸۰ کیلوگرم بر ثانیه است [۱۸].



شکل ۳. تونل باد مافوق صوت مکنده [۱۵]



شکل ۴. نمونه‌ای از یک تونل باد فشار - خلأ [۱۶]



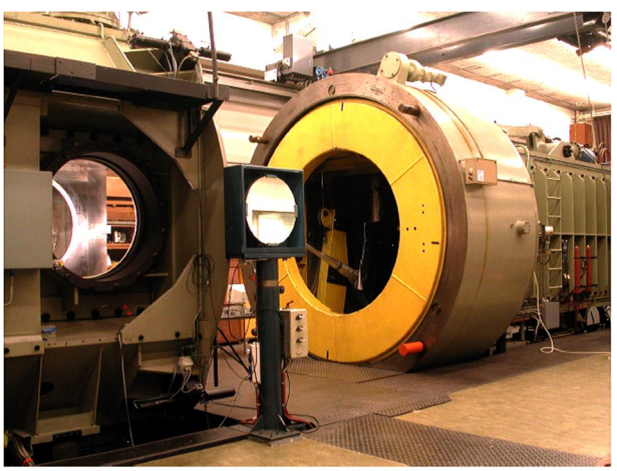
شکل ۵. نمایی از تونل باد مافوق صوت ۱×۱ متر ژاپن [۱۸]

۶-۱-۲. تونل باد مافوق صوت *DNW-SST* آمستردام

تونل باد SST هلند در سال ۱۹۶۴ م ساخته و در سال ۱۹۷۳ دیواره‌های بالایی و پایینی انعطاف‌پذیر به آن اضافه شد و در سال ۱۹۹۹ تعمیرات اساسی روی آن صورت گرفت (شکل ۶). این تونل باد مافوق صوت از نوع دمشی است و توسط یک مخزن ذخیره هوا با حجم ۶۰۰ متر مکعب هوای خشک در فشار ماکزیمم ۴،۰۰۰ کیلوپاسکال تغذیه می‌شود. هوای فشرده با ظرفیت ۸ کیلوگرم بر ثانیه به‌طور پیوسته به تونل تغذیه می‌شود. اندازهٔ طول و عرض مقطع آزمون این تونل ۱/۲×۱/۲ متر می‌باشد. محدودهٔ سرعت آن از ماخ ۱/۲ تا ماخ ۴ و ماکزیمم فشار کل آن ۱،۴۷۰ کیلوپاسکال است. زمان کارکرد تونل به عدد ماخ و سطح فشار بستگی داشته و حداکثر ۵۰ ثانیه است [۱۷].

جدول ۲. آمار تونل‌های باد اصلی در مناطق مختلف زمین [۱۷]

محل	مادون صوت	مافوق صوت	ماوراء صوت	نامعین	مجموع
آسیا	۴۸	۲۸	۱۸	۵	۹۹
استرالیا	۸	۴	۷	۱	۲۰
چین	۱۴	۱۶	۷	۴	۴۱
اندونزی	۱	۰	۰	۰	۱
ژاپن	۳	۷	۴	۰	۱۴
مالزی	۱	۰	۰	۰	۱
سنگاپور	۰	۱	۰	۰	۱
کره جنوبی	۲۱	۰	۰	۰	۲۱
اروپا	۵۶	۴۶	۳۷	۱	۱۴۰
بلژیک	۴	۲	۲	۰	۸
فرانسه	۵	۴	۵	۰	۱۴
آلمان	۹	۳	۶	۰	۱۸
ایتالیا	۲	۱	۱	۰	۴
هلند	۴	۵	۱	۰	۱۰
رومانی	۱	۲	۰	۰	۳
روسیه	۱۴	۲۳	۲۱	۰	۵۸
سوئد	۱	۱	۱	۰	۳
اوکراین	۰	۰	۰	۱	۱
انگلستان	۱۶	۵	۰	۰	۲۱
افریقا، خاورمیانه و خاور نزدیک	۲۶	۱۳	۴	۴	۴۷
هند	۱۱	۵	۳	۱	۲۰
ایران	۴	۲	۰	۱	۷
اسرائیل	۲	۴	۱	۰	۷
پاکستان	۱	۰	۰	۲	۳
افریقای جنوبی	۷	۲	۰	۰	۹
ترکیه	۱	۰	۰	۰	۱
امریکا	۵۲	۳۰	۳۲	۷	۱۲۱
آرژانتین	۱	۰	۰	۰	۱
برزیل	۴	۰	۱	۲	۷
کانادا	۶	۲	۰	۰	۸
ایالات متحده	۴۴	۲۸	۳۱	۷	۱۱۰
جمع کل	۱۸۲	۱۱۷	۹۱	۱۷	۴۰۷



شکل ۶. تونل باد مافوق صوت SST آمستردام هلند [۱۷]

٦-١-٣. تونل باد دمشی سه‌رژیمی بخارست رومانی

تونل باد دمشی سه‌رژیمی با مقطع آزمون ۱/۲×۱/۲ متری، بزرگترین تأسیسات تجربی در مؤسسه ملی هوافضای[۲۴] الی کارافولی در بخارست رومانی می‌باشد (شکل ۷). این تونل توسط شرکت کانادایی DSMA در سال ۱۹۷۸ م ساخته شده است و از آن زمان آزمایشات ایرودینامیکی سرعت بالا را برای بیش از ۱۲۰ پروژه هواپیمایی، پرتابه‌ای و جز این‌ها انجام داده است. محدودهٔ سرعت این تونل باد مدار باز، بین ماخ ۰/۱ تا ۳/۵ است. تونل دارای سه مقطع آزمون است: مقطعی با دیوارهای صلب برای سرعت‌های مادون / مافوق صوت و مقطعی با دیوارهای سوراخ‌دار سه‌بعدی برای سرعت‌های گذر صوت، ابعاد دو مقطع مذکور ۱/۲×۱/۲ متر است؛ سومین مقطع آزمون با ابعاد ۱/۲×۰/۴۸ متر دارای دیوارهای بالایی و پایینی سوراخ‌دار می‌باشد. برای ماخ‌های ۱/۱ تا ۳/۵ از نازل انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود [۱۹].

٦-١-٤. تونل باد مافوق صوت *T-333* روسیه

تونل باد T-333 از نوع دمشی است و در مؤسسه ائرودینامیک نظری و کاربردی در نووسیبیرسک روسیه قرار دارد. این تونل باد شامل گرمکن هوای اهمی با قدرت ۸ مگاوات و نازل مخروطی در یک پیکربندی جت باز می‌باشد. مقطع آزمون آن از نوع جت باز بوده و قطر ۸۰ سانتی‌متری دارد، در حالی‌که قطر جریان مرکزی حدود ۳۰ سانتی‌متر است. محدودهٔ ماخ آن بین ۲ تا ۵ است و از پنج نازل برای ماخ‌های ۲، ۲/۵، ۳، ۴ و ۵ استفاده می‌کند. زمان کارکرد تونل به مقدار دبی جرمی جریان بستگی دارد، برای دبی ۷۰ کیلوگرم بر ثانیه زمان کارکرد ۶۰ ثانیه و برای دبی ۱۵ کیلوگرم بر ثانیه زمان کارکرد ۶۰۰ ثانیه است [۱۷].

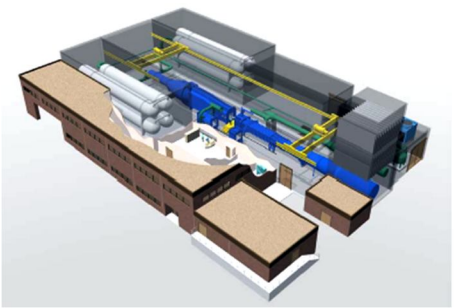
شکل۷. تونل باد سه‌رژیمی بخارست رومانی [۱۹]

٦-١-٥. تونل باد سه‌رژیمی *DSO* سنگاپور

تونل باد سه‌رژیمی سنگاپور در سال ۲۰۰۲ م با هزینه ۳۰ میلیون دلار امریکا ساخته شد و در دانشکدهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه ملی سنگاپور قرار گرفت (شکل ۸). ابعاد مقطع آزمون این تونل ۱/۲×۱/۲ متر و طول تونل ۱۰۰ متر است. محدودهٔ سرعت در این تونل، ماخ بین ۰/۲۵ تا ۴ است [۱۷].

٦-١-٦. تونل باد *TWG* آلمان

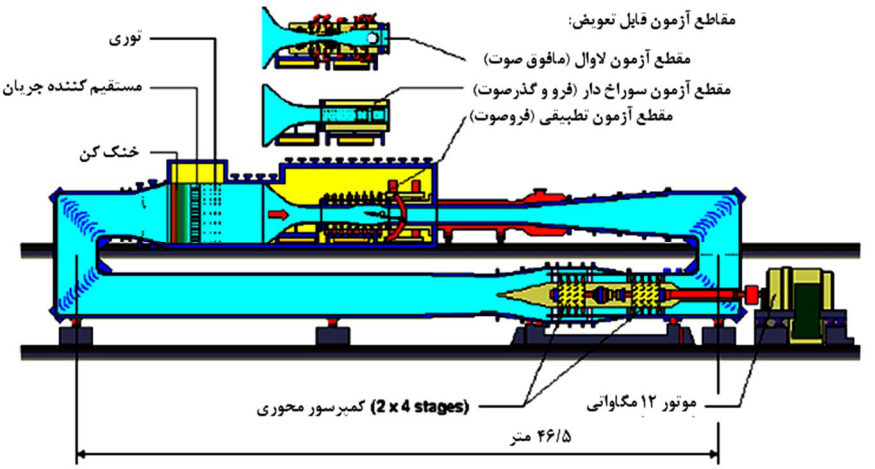
تونل باد گذر صوت TWG از سال ۲۰۰۵ م در مرکز تونل‌های باد جرمن - داچ در گوتینگن آلمان قرار دارد. تونل TWG از نوع مدار بسته بوده و جریان‌های با ماخ ۰/۳ تا ۲/۲ را تولید می‌کند (شکل ۹). این تونل برای دستیابی به اعداد ماخ مختلف دارای سه مقطع آزمون است، این مقاطع عبارت‌اند از: مقطع آزمون سوراخ‌دار برای رژیم گذر صوت، مقطع آزمون با دیوارهای تطبیقی برای رژیم زیرصوت (ماخ ۰/۳ تا ۰/۹)، و مقطع آزمون نازل همگرا - واگرا قابل انعطاف برای رژیم مافوق صوت. محدودهٔ فشار کل بین ۰/۳ تا ۱/۵ بار است [۱۷].



شکل ۸ طرح کلی تونل باد دی. اس. او. سنگاپور [۱۷]

٦-١-٧. تونل باد مافوق صوت *FL-2* چین

تونل باد مافوق صوت FL-2 در سال ۱۹۹۳ م در مرکز تحقیق و توسعهٔ ائرودینامیک چین در شهر میانیانگ چین راه‌اندازی شد. این تونل از نوع نیمه - دمشی است و یک مقطع آزمون مربعی به ابعاد ۱/۲×۱/۲ متر و طول ۳/۸ متر دارد. محدودهٔ ماخ آن بین ۰/۳ تا ۴ است که ماخ‌های ۰/۳ تا ۲ را به‌طور پیوسته و ماخ‌های گسسته ۱/۳۵، ۱/۵، ۱/۸ و ۲ را پوشش می‌دهد (شکل ۱۰). مجموعه‌ای از مقاطع آزمون مختلف را می‌توان در این تأسیسات به‌کار برد: مقطع سه‌بعدی متغیر سوراخ‌دار؛ مقطع سه‌بعدی ثابت سوراخ‌دار؛ مقطع مافوق صوت با دیوارهای ثابت هوا از مخازن ذخیره با فشار ۲۵ اتمسفر تأمین می‌شود [۱۷].



شکل ۹. نمایی از تونل باد گذر صوت TWG [۱۷]

شکل ۱۰. تونل باد مافوق صوت FL-2 چین [۱۷]

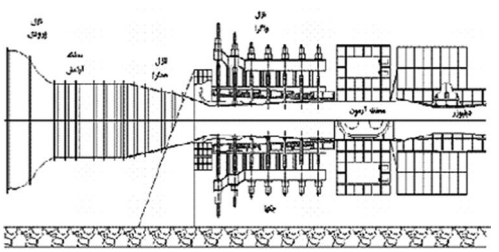
۶-۱-۸. تونل باد سرعت بالای لاکهید مارتین

تونل باد سرعت بالای شرکت لاکهید مارتین[۲۵] واقع در دالاس تگزاس، با ابعاد ۱/۲۳×۱/۲۳ متر از نوع دمشی است و محدودهٔ ماخ ۰/۳ تا ۵ را پوشش می‌دهد. این تونل باد از سال ۱۹۵۸ م تاکنون بیش از ۱۵۰۰ آزمایش برای مشتریان هوایی، دفاعی و فضایی انجام داده است. یک کمپرسور چندطبقه، هوا با فشار ۴۵۰ پوند بر اینچ مربع را در مخازن ذخیره با حجم ۴۰،۰۰۰ فوت مکعب ذخیره می‌کند؛ لذا زمان کارکرد بین ۵۰ تا ۱۱۰ ثانیه را برای هر آزمایش فراهم می‌کند [۲۰].

۶-۱-۹. تونل باد سه‌منظورهٔ مکشی دانشگاه امام حسین (ع)

تونل باد سه‌منظورهٔ دانشگاه امام حسین (ع) از نوع مدار باز و مکشی است. این تونل باد برای انجام آزمایش روی اجسام پرنده اعم از موشک و هواپیما در شرایط پروازی مختلف در محدودهٔ سرعت‌های مادون تا مافوق صوت به‌کار می‌رود. ابعاد مقطع آزمون این تونل باد ۶۰×۶۰×۱۴۰ سانتی‌متر و محدودهٔ عملیاتی تونل از عدد ماخ ۰/۳ تا حدود ۳/۲ می‌باشد [۲۱]. در شکل ۱۲ نمایی از تونل باد سه‌منظوره دانشگاه امام حسین (ع) نمایش داده شده است.

شکل ۱۱. تونل باد سرعت بالای لاکهید مارتین [۲۰]



شکل ۱۲. تونل باد سه‌منظورهٔ دانشگاه امام حسین (ع) [۲۱]

٦-٢. رسم نمودارهای درصد فراوانی تونل‌های باد مافوق صوت

طبق موارد پیش‌گفته با بررسی حدود ۲۰۰ نوع تونل، نمودارهای مربوط به درصد فراوانی تونل های باد مافوق صوت براساس پارامترهای عملکردی آنها شامل محدودهٔ عدد ماخ، زمان کارکرد و ابعاد مقطع آزمون رسم شده است. در ادامه در مورد هر یک از نمودارها توضیح داده می‌شود.

٦-٢-١. نمودار درصد فراوانی ساختارهای تونل باد مافوق صوت

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرایند طراحی تونل باد مافوق صوت، نوع ساختار تونل باد است. در این بین، تونل‌های جریان لحظه‌ای با توجه به هزینه‌های نسبتاً پایین‌تر در بین سایر ساختارها از کاربرد بیشتری برخوردارند. در این تونل‌ها برای ایجاد اختلاف فشار مورد نیاز جهت ایجاد جریان مافوق صوت، از سه روش مختلف می‌توان استفاده نمود که عبارت‌اند از: استفاده از مخازن فشار، استفاده از مخازن خلأ و استفاده از ترکیب مخازن فشار و مخازن خلأ. در نمودار ۱۳ توزیع فراوانی انواع ساختارهای ذکرشده برای تونل‌های باد مافوق صوت که به‌ترتیب تونل‌های دمشی، مکشی و فشار خلأ نامیده می‌شوند مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، اکثر تونل‌های باد مافوق صوت از نوع دمشی می‌باشند. علت این موضوع آن است که برای ایجاد جریان مافوق صوت تا حدود ماخ ۴، اختلاف فشار به‌حدی است که تأمین آن با استفاده از مخازن هوای فشرده و تخلیهٔ آن در اتمسفر امکان‌پذیر بوده و نیازی به تخلیهٔ آن در مخازن خلأ نمی‌باشد. از طرفی در تونل‌های دمشی با توجه به بالا بودن فشار سکون جریان و امکان کنترل آن، می‌توان به اعداد رینولدز بالاتری نسبت به تونل‌های مکشی دست یافت.

٦-٢-٢. نمودار درصد فراوانی انواع مقطع هندسی تونل‌های باد مافوق صوت

یکی دیگر از پارامترهای ساختاری تونل‌های باد مافوق صوت، شکل هندسی مقطع آن است. بر اساس هندسهٔ مقطع، تونل‌های باد را می‌توان به دو دستهٔ مقطع چهارضلعی و مقطع دایروی تقسیم کرد. در نمودار ۱۴ فراوانی شکل مقطع آزمون تونل‌های باد مافوق صوت دمشی آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، اکثر تونل‌های باد مافوق صوت دمشی مقطع آزمون چهارضلعی دارند که به آنها مقطع دوبعدی نیز گفته می‌شود. علت این امر آن است طراحی و ساخت این تونل‌ها بسیار ساده‌تر از نوع مقطع دایروی بوده و از طرفی در این تونل‌ها می‌توان از نازل‌های متغییر برای دستیابی به اعداد ماخ مختلف دست یافت. کاربرد مقاطع دایروی بیشتر در تونل‌های باد ابر صوت به‌دلیل مشکلات خاصی که در آنها وجود دارد، می‌باشد.

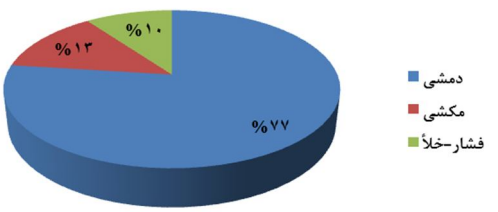
۶-۲-۳. نمودار درصد فراوانی محدوده‌های اعداد ماخ در تونل‌های باد مافوق صوت

محدودهٔ عدد ماخ کاری تونل باد، یکی از پارامترهای عملکردی تونل‌های باد بوده که جزء اصلی‌ترین این پارامترها می‌باشد و تأثیر فراوانی در طراحی تونل و زیرسیستم‌های آن دارد. نسبت فشار مورد نیاز تونل و نیز هندسهٔ نازل از مشخصه‌های وابسته به این پارامتر می‌باشند. در یک تعریف کلی محدودهٔ اعداد ماخ مافوق صوت را می‌توان بین ۱/۲ تا ۴/۵ در نظر گرفت. در نمودار ۱۵ فراوانی محدوده‌های اعداد ماخ در نظر گرفته شده در ناحیهٔ مافوق صوت مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شکل ناحیهٔ مافوق صوت به سه محدوده تقسیم شده است، از ماخ ۱/۲ تا ۲، از ۲ تا ۳/۵ و از ۳/۵ تا ۴/۵. در نمودار نشان داده شده، درصد تعداد تونل‌های باد مافوق صوت موجود در دنیا در سه محدودهٔ فوق باهم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، بیشتر تونل‌های باد محدودهٔ ماخ زیر ۳/۵ را پوشش می‌دهند. این نمودار نشان‌دهندهٔ این است که کاربرد تونل‌های باد مافوق صوت تا ماخ ۳/۵ بیشتر بوده و لذا تعداد بیشتری از این تونل‌ها در دنیا موجود می‌باشد. البته تونل‌های باد مافوق صوت با عدد ماخ بالاتر ۳/۵ نیز کاربردهای خاص خود را دارند اما با توجه به هزینه‌های بالای طراحی و ساخت آنها، تعداد محدودتری از آنها ساخته شده است.

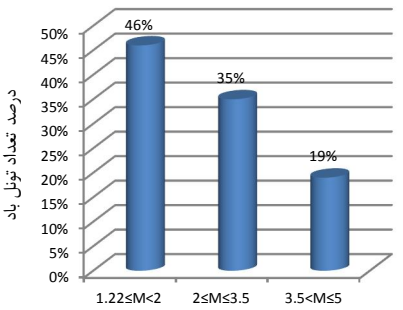
۶-۲-۴. نمودار درصد فراوانی اندازهٔ مقطع آزمون در تونل‌های باد مافوق صوت

یکی دیگر از پارامترهای عملکردی تونل‌های باد مافوق صوت، که بر ابعاد تونل باد و نیز هزینه‌های آن تأثیر مستقیم دارد، اندازهٔ مقطع آزمون تونل باد است. ایده‌آل آن است که مقطع آزمون به‌قدری بزرگ باشد که بتوان جسم پرنده را با ابعاد کامل آن داخل

تونل باد قرار داد. اما واقعیت آن است که هزینهٔ ساخت چنین تونل‌هایی به‌خصوص در جریان‌های مافوق صوت، به‌قدری بالاست که تعداد بسیار انگشت‌شماری از آنها ساخته شده است. برای بررسی درصد فراوانی اندازه‌های مختلف مقطع آزمون تونل‌های باد مافوق صوت، می‌توان این تونل‌ها را به تونل‌های اندازهٔ متوسط با مقطع کوچکتر از ۶۰ سانتی‌متر، اندازهٔ بزرگ با مقطع بزرگتر از ۶۰ و کوچکتر از ۱۵۰ سانتی‌متر و اندازهٔ خیلی



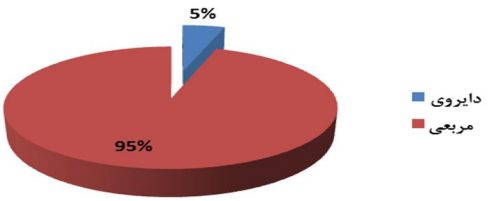
شکل ۱۳. نمودار توزیع فراوانی انواع تونل باد مافوق صوت



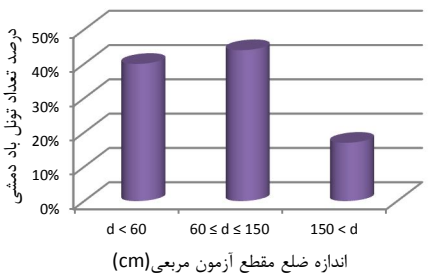
شکل ۱۵. نمودار فراوانی محدودهٔ عدد ماخ در تونل‌های مافوق صوت

۶-۲-۵. نمودار درصد فراوانی زمان کارکرد در تونل‌های باد مافوق صوت

آخرین پارامتر عملکردی تونل‌های باد مافوق صوت که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد، زمان کارکرد تونل می‌باشد. این پارامتر نیز بر هزینهٔ ایجاد تونل بسیار تأثیرگذار می‌باشد. بالا بودن این زمان نیز بسیار مطلوب می‌باشد؛ زیرا زمان بیشتری در اختیار پژوهشگران و طراحان اجسام پرنده، جهت اندازه‌گیری پارامترهای ائرودینامیکی قرار می‌شود. اما از طرفی بالا رفتن این زمان هزینه‌های ساخت تونل را تا حد زیادی بالا می‌برد. در نمودار ۱۷ فراوانی زمان کارکرد تونل‌های باد مافوق صوت دمشی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان کارکرد اکثر تونل‌ها بین ۳۰ تا ۸۰ ثانیه می‌باشد. این نمودار نشان‌دهندهٔ آن است که زمان کمتر از ۳۰ ثانیه به‌دلیل محدودیت ایجادشده در استخراج بزرگ با مقطع بزرگتر از ۱۵۰ سانتی‌متر تقسیم کرد. در نمودار ۱۶ فراوانی اندازه مقطع آزمون در تونل‌های باد مافوق صوت دمشی آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، اندازهٔ مقطع آزمون بیشتر تونل‌های باد مافوق صوت دمشی بین ۶۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. علت این فراوانی آن است که اولاً تونل‌های در این محدوده کاربرد صنعتی بالاتری داشته و در عین حال هزینهٔ طراحی و توسعهٔ آنها منطقی‌تر می‌باشد.

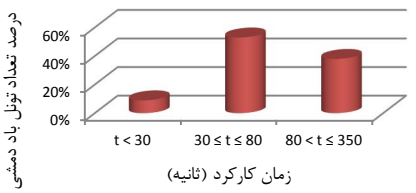


شکل ۱۴. نمودار فراوانی شکل مقطع آزمون تونل‌های باد مافوق صوت دمشی



شکل۱۶. فراوانی اندازهٔ مقطع آزمون تونل‌های باد مافوق صوت دمشی

نتایج مد نظر چندان مطلوب نبوده و از فراوانی بسیار پایینی برخوردار است.



شکل ۱۷. نمودار فراوانی زمان کارکرد در تونل‌های مافوق صوت دمشی

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی جامعی روی تونل‌های مافوق صوت موجود در کشورهای جهان انجام شد. نتایج این بررسی بیانگر آن است که بیشتر کشورهای پیشرفته و در حال توسعه یک یا چند تونل باد

مافوق صوت در اختیار دارند. این تونل‌ها دارای کاربرد فراوانی در فرایند طراحی و توسعهٔ اجسام پرندهٔ مافوق صوت هستند. این تونل‌ها ساختارهای مختلفی دارند و پارامترهای عملکردی آنها شامل محدودهٔ عدد ماخ، زمان کارکرد و ابعاد مقطع آزمون، دامنهٔ وسیعی را شامل می‌شوند. به‌منظور کمک به انتخاب این پارامترهای عملکردی یک بررسی آماری براساس نمودارهای درصد فراوانی روی این پارامترها انجام شده است. نتایج حاصل از این تحلیل آماری و نیز بررسی ساختارهای تونل باد را می‌توان به‌صورت ذیل بیان کرد: به‌طور تقریبی می‌توان گفت ۷۷ درصد از تونل‌های باد مافوق صوت موجود در دنیا از نوع دمشی، ۱۳ درصد از نوع مکشی و ۱۰ درصد از سایر انواع می‌باشد. اکثر تونل‌های باد مافوق صوت، محدودهٔ ماخ تا زیر ۳/۵ را پوشش می‌دهند و فقط ۱۹ درصد آنها در ماخ بیش از ۳/۵ نیز عمل می‌کنند. اکثر تونل-های باد مافوق صوت و بیش از ۹۰ درصد از تونل‌های باد مافوق صوت دمشی دارای مقطع آزمون مربعی شکل می‌باشند. در تونل‌های باد مافوق صوت دمشی، اندازهٔ ضلع مقطع آزمون اکثر تونل‌های مربعی بین ۶۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. ۵. زمان کارکرد اکثر تونل‌های باد مافوق صوت دمشی، بین ۶۰ تا ۸۰ ثانیه می‌باشد. برای تغییر سرعت جریان در مقطع آزمون (تغییر عدد ماخ)، از نازل‌های قابل تعویض یا نازل‌های با شکل متغیر استفاده می‌شود. برخی تونل‌ها قابلیت استفاده از چند نوع مقطع آزمون را دارا می‌باشند.

۸. مآخذ

[۶] م. حسنی اهنگر، م. کنگاوری، م. سلطانی. پایش بلادرنگ داده های آزمون های کالیبراسیون تونل باد و تعمیم آن مبتنی بر شبکه عصبی رگرسیون عمومی، *نشریه مکانیک و هوافضا*، س. ۶، ش. ۳، ص ۱۱-۲۳، ۱۳۸۹.

[۷] م. نیلی احمد ابادی، م. روشنی، ع. ربیعی. طراحی یک بعدی اجکتور یک، دو و سه مرحله ای تونل باد فراصوتی، *نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره ها*، س. ۱، ش. ۲، ص ۵۷-۶۸، مهر ۱۳۹۰.

[۸] م. جوادپور، س. فراهت، ا. حسام الدین. بهینه سازی یک دیفیوزر تونل باد مافوق صوت با دیواره های انعطاف پذیر با کمک الگوریتم ژنتیک، *نشریه مدلسازی در مهندسی*، س. ۱۰، ش. ۲۸، بهار ۱۳۹۱.

[۹] م. سلطانی، م. عابدی، ج. سپاهی یونسی. بررسی تجربی چرخه موج - نوسان در ورودی مافوق صوت تقارن محوری، *نشریه مهندسی مکانیک مدرس*، س. ۱۴، ش. ۱۶، ص. ۳۱۱-۳۲۰، اسفند ۱۳۹۳.

[10] A. K. Mills, *History of Wind Tunnels*, Glenn Research Center, NASA, 2012.

[11] J. D. McAlpine, *Computational Fluid Dynamics or Wind Tunnel Modeling*, 2004.

[12] K. C. Y. Elton, *Design of Wind Tunnel*, A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the Degree of Bachelor of

[1] B. K Bharath, Design and Fabrication of a Supersonic Wind Tunnel, *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS),* Vol. 2, No. 5, 2015.

[2] C. Cattafesta, B. Chris, M. Jose, Fundamentals of Wind-Tunnel Design, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, USA, John Wiley & Sons, 2010.

[۳] م. حسنی اهنگر، م. دهقان، خ. واحدی. ارزیابی و تحلیل عملکرد یک بالانس نیرویی در تونل باد از دید قابلیت اطمینان، *نشریه مکانیک و هوافضا*، س. ۱، ش. ۲، ص ۲۱-۳۰، آبان ۱۳۸۴.

[۴] م. حسنی اهنگر، ن. مزینی، ا. حمیدی حسام الدین. طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل کننده فازی یک نازل تونل باد مافوق صورت ST2، *نشریه مکانیک و هوافضا*، س. ۲، ش ۳، ص. ۶۷-۷۸، اسفند ۱۳۸۵.

[۵] م. حسنی اهنگر، ع. عادل، ع. حقیری، م. کنگاوری. ارزیابی و تحلیل سیگنال های آزمون مدل استاندارد دینامیکی در یک تونل باد و طراحی فیلتر دیجیتال بهینه براساس آلگوریتم ژنتیک، *نشریه مکانیک و هوافضا*، س. ۳، ش. ۱، ص ۷۱-۸۱، خرداد ۱۳۸۶.

Manufacturing Engineering, Faculty of Manufacturing Engineering, University Malaysia Pahang, JUNE 2012.

[13] P. Alan, K. L. Goin, *High-speed wind tunnel testing*, John Wiley& Sons Inc., New York, 1965.

[14] B. Kelly, D. Cancel, B. Earley, S. Morin, E. Morrison, M. Sangenario, Design and Construction of a Supersonic Wind Tunnel, *Worcester: Worcester Polytechnic Institute-JB3-SWT2*, 2010.

[15] M. Peter, Design of a Supersonic Wind Tunnel, Major Qualifying Project. Worcester Polytechnic Institute, 2009.

[16] G. Malinda, J. Gorham, Wind tunnels of the western hemisphere, In *Federal Research Division Library of Congress, Washington, DC*, 2008.

[17] G. Malinda, J. Gorham, W.N. Ivey, S. Kim, M. Lewis, C. Minkus, Wind tunnels of the Eastern hemisphere, In *Federal Research Division Library of Congress, Washington, DC*, 2008.

[18] M. Yoshikazu, M. Noguchi, Near Field Pressure Measurements of Several Models in JAXA's 1m x 1m Supersonic Wind Tunnel, In *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, p. 648, 2013.

[19] M. Florin, INCAS Trisonic wind tunnel, *National Institute for Aerospace Research, Bucharest, Romania, INCAS-BULLETIN*, 2009.

[20] *High Speed Wind Tunnel and Test Systems Design Handbook*, Publication number AER-EIR-13552-E, Lockheed Martin Missile and Fire Control, 2002.

[۲۱] ح. گل پور، ع. حقیری. محاسبه سطح موثر محفظه آزمون تونل باد سه منظوره برای جریان تراکم پذیر به روش تجربی، شانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۴-۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۷.

پی‌نوشت

1 . Fransis Vanham

۲. کمیتهٔ رایزنی ملی هوانوردی امریکا (National Advisory Committee for Aeronautics) یا همان ناکا سازمانی دولتی در ایالات متحده امریکاست که در سوم مارس ۱۹۱۵ بنیان‌گذاری شد و به پژوهش‌های دربارهٔ حمل‌ونقل پرداخت. در یکم اکتبر ۱۹۵۸، ناکا برچیده و سازمان ناسا جایگزین آن شد [ویراستار].

3. Ames
4. Theodor Von Karman
5. Aberdeen/Mary Land
6. Arnold Engineering Development Center (AEDC)
7. Subsonic Wind Tunnel
8. Transonic Wind Tunnel
9. Supersonic Wind Tunnel
10. Hypersonic Wind Tunnel
11. High Speed Wind Tunnels
12. Schlieren optic
13. Technical Application
14. Laboratorial Application
15. Industrial Application
16. Research Application
17. Continuous Wind Tunnel
18. Intermittent Wind Tunnel
19. Close-Circuit Tunnel
20. Open-Circuit Tunnel
21. Blow-Down Tunnel
22. Indraft- Tunnel
23. Pressure-Vacuum Tunnel
24. INCAS
25. High Speed Wind Tunnel (HSWT)