Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۳، جلد ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰۳-۱۱۲

طراحی و تحلیل محفظه آزمون جت آزاد برای تونل‌باد ابرصوتی

مصطفی هادی‌دولابی* استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
سعید قائمی کاشانی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
مهدی هاشم‌آبادی دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
عباس طربی استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش با استفاده از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، روند طراحی آیرودینامیکی برای محفظه آزمون تونل باد ابر صوتی از نوع جت آزاد بسته انجام شده است. در ابتدا با استفاده از داده‌های آماری تونل‌های باد ابرصوت موجود در جهان، طراحی مفهومی محفظه آزمون انجام شده است. سپس با شبیه‌سازی عددی نمونه طراحی شده در جریان تراکم‌پذیر، لزج (مدل $k-\omega$ SST) با استفاده از حل معادلات ناویر-استوکس در حالت متقارن محوری، کیفیت طراحی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نهایت با تغییر پارامترهای محفظه آزمون، ابعاد بهینه محفظه آزمون تعیین شده است. پارامترهای موثر در محفظه آزمون شامل طول محور محفظه آزمون، قطر محفظه آزمون، قطر ورودی دیفیوزر، میزان فرورفتگی دیفیوزر و نازل داخل محفظه آزمون هستند. موارد بررسی شده در راستای معیارهای طراحی شامل ایجاد جریان یکنواخت و پیوسته جهت ایجاد بستر مناسب برای قرارگیری مدل در محفظه آزمون است. با استفاده از روند، ابعاد، مشخصات و الزامات آیرودینامیکی محفظه آزمون تونل باد ابرصوتی درعدد ماخ عملکردی ۵ تا ۷ تعیین شده است. همچنین اثرات دو نوع نازل مخروطی و انحنادار بر کیفیت جریان داخل محفظه آزمون تونل باد ابرصوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: طراحی آیرودینامیکی، محفظه آزمون، جت آزاد، تونل باد، جریان ابرصوتی.

Design and Analysis of Closed-type Free Jet Test Section for Hypersonic Wind Tunnel

M. Hadidoolabi Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
S. Ghaemi Kashani Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
M. Hashemabadi Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
A. Tarabi Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this research, procedure of aerodynamics design for hypersonic wind tunnel test section is investigated by using computational fluid dynamics. The type of test section is chosen closed-type free jet. First, conceptual design is done by using the available statistical data in the hypersonic wind tunnel test section in the world. Then, quality of design is investigated by numerical simulation by solving Navier-Stokes equations in compressible, viscous (k-w SST model) and axisymmetric form. With changing the parameters of the test section, the test section dimensions have been optimized. The important parameters in test section are length of the test section, the test section diameter, the diameter of the inlet diffuser, the diffuser and the nozzle indentation inside the test section. Design criteria are chosen the formation of uniform flow, better swallow the slip line and the flow deflection in the test section. Finally, dimensions, specifications and aerodynamics functional requirements of the hypersonic wind tunnel test section have been determined at Mach 5 to 7. The effect of cone and curved nozzles is also investigated for flow quality in test section of wind tunnel.

Keywords: Aerodynamics Design, Test Section, Free Jet, Wind Tunnel, Hypersonic Flow.

۱- مقدمه

محفظه اصلی‌ترین بخش هر تونل‌باد بوده که تمامی آزمایش‌ها در آن انجام می‌شود. همواره طراحان تونل باد سعی کرده‌اند تمامی شرایط و خصوصیات جریان که در حالت واقعی برای مدل مورد نظر رخ می دهد را در مقطع آزمون شبیه‌سازی کنند. بنابراین در هنگام طراحی و محاسبات مربوط به بخش‌های مختلف تونل، پارامترهای این قسمت از قبیل ابعاد، سرعت هوا، دما و عدد رینولدز به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده و می‌توان گفت که طراحی تمامی قسمت‌های تونل بستگی به مشخصات ابعادی و کیفیت جریان در مقطع آزمون دارد. در بین انواع تونل‌های باد موجود، طراحی محفظه آزمون تونل‌های ابرصوت از پیچیدگی خاصی برخوردار بوده و پارامترهای زیادی باید مورد بررسی قرار بگیرند.

در زمینه طراحی، ساخت، تست و کالیبراسیون تونل‌های باد ابرصوتی، آلن پاپ [۱] اطلاعات گسترده‌ای را ارایه کرده است. ولی اطلاعات لازم برای شناخت الگوی جریان در محفظه آزمون بصورت بسیار محدود ارایه شده است.

در تونل‌های باد از دو نوع محفظه آزمون استفاده می‌شود. نوع اول، محفظه آزمون با دیواره‌های پیوسته و متصل به بخش نازل و نوع دوم محفظه آزمون به‌صورت جت آزاد است. محفظه آزمون با دیوارهای پیوسته اغلب در تونل‌های سرعت پایین و محفظه آزمون از نوع جت آزاد در تونل‌های باد سرعت بالا کاربرد دارند. محفظه آزمون به صورت

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mhadidoolabi@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۸
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۸

www.SID.ir

Archive of SID

جت آزاد به دو نوعِ جت آزاد باز و جت آزاد بسته تقسیم می‌شوند [۱]. از جمله مزایای محفظه جت آزاد نسبت به محفظه پیوسته می‌توان به کاهش اختناق و در نتیجه امکان استفاده از مدل‌های بزرگتر، بهبود دسترسی به مدل و کاهش بار حرارتی به شیشه نما و دیواره‌ها در آزمون‌های دما بالا اشاره کرد.

بررسی‌های صورت گرفته از داده‌های آماری نشان می‌دهد که محفظه آزمون مناسب برای تونل‌های باد ابرصوتی، محفظه آزمون جت آزاد بسته است. محفظه آزمون جت آزاد باز از آلودگی صوتی بسیار بالایی برخوردار است اما محفظه جت آزاد بسته از مشکل ایجاد صدا جلوگیری کرده و به نسبت تراکم (نسبت فشار) کمتری در مقایسه با جت آزاد باز برای راه‌اندازی و اجرای تونل باد نیاز دارد. نسبت فشار بیانگر میزان تلفات انرژی برای ایجاد شرایط آزمون است و کاهش مقدار آن بیانگر کاهش تلفات انرژی و کاهش هزینه‌های راه‌اندازی و اجرا است.

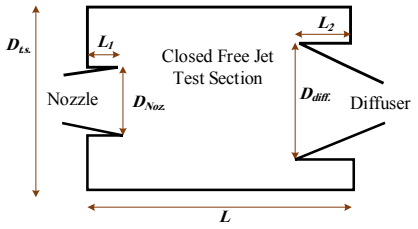
در محفظه آزمون به صورت جت آزاد، دو جریان با فیزیک کاملا متفاوت وجود دارد، یک جریان، جریان اصلی است که توسط نازل ایجاد می‌شود و جریان دیگر اطراف این جریان و دیواره‌های محفظه آزمون بوجود می‌آید که تحت عنوان جریان مرده شناخته می‌شود. خطی که این دو جریان را از هم جدا می‌کند به خط لغزش معروف است.

به دلیل راهبردی بودن تونل‌های باد ابرصوت، پژوهش‌های انجام شده در زمینه طراحی و تحلیل زیر مجموعه‌های آن به ندرت در دسترس می‌باشند. تنها کار ارایه شده در این زمینه توسط آقای محمدی‌فر و همکاران [۲] برای یک تونل باد ابرصوت آزمایشی انجام شده است. آن‌ها برای طراحی آیرودینامیکی این تونل باد آزمایشی از فرمول‌های مهندسی و روابط حاکم استفاده کردند و در نهایت با تحلیل عددی کیفیت طراحی مورد بررسی قرار دادند و تاثیر پارامترهای مختلف لحاظ نشده است.

آنچه پژوهش حاضر را نسبت به پژوهش قبلی متمایز می‌کند، ارایه یک روش جامع و نظام‌مند برای طراحی تمامی پارامترهای مهم در محفظه آزمون و استخراج ابعاد بهینه محفظه آزمون در ماخ‌های مختلف است. در ابتدا ابعاد اولیه محفظه آزمون با استفاده از داده‌های آماری چندین تونل باد ابرصوت تخمین زده شده است و تمامی مراحل طراحی و بهینه‌سازی محفظه آزمون با استفاده از تحلیل‌های عددی دقیق صورت گرفته است. فعالیت برجسته و متمایز دیگری که در این پروژه ارایه شده است بررسی اثرات نوع نازل بر کیفیت جریان داخل محفظه آزمون می‌باشد.

۲- طراحی مفهومی محفظه آزمون

در فرایند طراحی یک سامانه، بررسی و استخراج مشخصه‌های مشابه موجود به عنوان گام اول در طراحی شناخته می‌شود. در این پژوهش نیز با بررسی مقطع آزمون تعداد زیادی از تونل‌های باد ابرصوت، پارامترهای مشخصه‌ی محفظه‌های آزمون جت آزاد استخراج گردید که در شکل ۱ مشاهده می‌شوند.



شکل ۱- پارامترهای مورد نظر در طراحی محفظه آزمون جت آزاد بسته

این پارامترها عبارتنداز:

$D_{t.s.}$: قطر محفظه آزمون

L: طول محفظه آزمون

L_1: میزان فرورفتگی نازل درون محفظه آزمون

L_2: میزان فرورفتگی دیفیوزر درون محفظه آزمون

$D_{noz.}$: قطر خروجی نازل

$D_{diff.}$: قطر ورودی دیفیوزر

برای طراحی مفهومی محفظه آزمون و پارامترهای مورد نظر از داده‌های آماری استفاده شده است. لازم به‌ذکر است که ممکن است از برخی موارد داده‌هایی که پراکندگی زیادی دارند در محاسبه آن پارامتر استفاده نشود و به جای آن از کارهای پیشین و طراحی‌های گذشته و دیگر مراجع برای تعیین آن پارامتر استفاده شود. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به این‌که یکی از الزامات طراحی ما ماخ عملکردی است، بیشتر سعی شده است تا از داده‌های موجود در محدوده جریان-های ابرصوت در تخمین اولیه پارامترها استفاده شود. پس از به‌دست آوردن پارامترهای بی‌بعد شده محفظه آزمون، با استفاده از این مقادیر، هریک از پارامترهای مورد نظر در طراحی مفهومی محفظه به صورت جداگانه محاسبه گردد.

۲-۱- قطر خروجی نازل

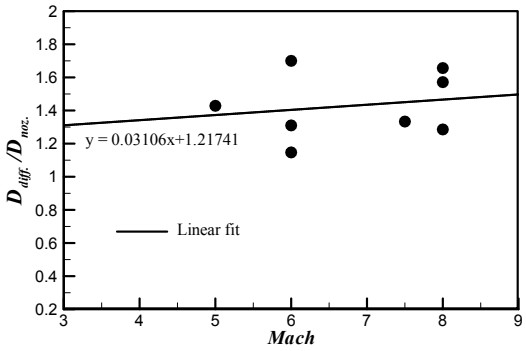
این پارامتر جزو الزامات طراحی است که در این پروژه مقدار آن ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخص بودن این پارامتر، سایر ابعاد مقطع آزمون نسبت به این پارامتر بدون بعد شده‌اند.

۲-۲- قطر ورودی دیفیوزر

داده‌های آماری مربوط به نسبت قطر دیفیوزر به قطر خروجی نازل در شکل ۲ نشان داده شده است و یک تابع خطی از این داده‌ها عبور کرده است. با توجه به شکل و عددماخ عملکردی، به‌نظر می‌رسد که $D_{Diff.}/D_{Nozz.} = 1.45$ مقدار قابل قبول برای تخمین اولیه این پارامتر است و با توجه به این‌که اندازه قطر خروجی نازل ۵۰ سانتی‌متر است بنابراین قطر ورودی دیفیوزر ۷۲/۵ سانتی‌متر به‌دست می‌آید.

www.SID.ir

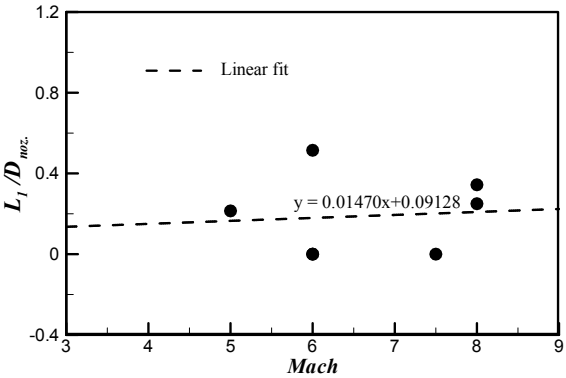
Archive of SID



شکل ۲- نسبت قطر ورودی دیفیوزر به قطر خروجی نازل در تونل‌های باد با اعدادماخ عملکردی مختلف

۲-۳- میزان فرورفتگی نازل درون محفظه آزمون

میزان فرورفتگی نازل و هندسه لبه‌های اتصال در بخش آزمون یکی از پارامترهایی است که ممکن است بر کیفیت جریان تاثیر داشته باشد. اگر نازل در محفظه آزمون وارد نشود، جریان چرخان شده در محفظه جانبی مستقیما به جت خروجی از نازل برخورد می‌کند و این امر باعث می‌شود که جت خروجی زاویه مناسب خود را از دست بدهد و کیفیت جریان در خروج از نازل پایین بیاید. برخی داده‌های آماری مربوط به این پارامتر که پراکندگی زیادی داشتند حذف شدند و در نهایت شکل ۳ داده‌های آماری نسبت این پارامتر به قطر خروجی نازل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نسبت مناسب این پارامتر با توجه به ماخ عملکردی در حدود ۰/۱۸ است. از طرفی با توجه به این‌که در دو مرجع [۲] و [۳] حدود این نسبت برای اعدادماخ ابرصوت طول قسمت فرورفتگی نازل حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدِ قطر خروجی نازل در نظر گرفته شده است بنابراین در اینجا نیز از مقدار ۰/۲ برای این نسبت استفاده می‌گردد در نتیجه با توجه به این‌که قطر خروجی نازل ۵۰ سانتی‌متر است، طول L_1 برابر با ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود.



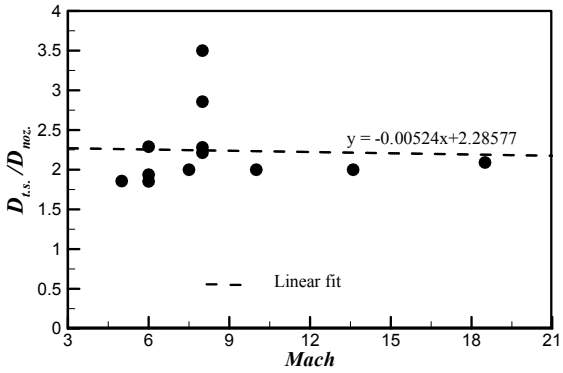
شکل ۳- نسبت فرورفتگی نازل درون محفظه آزمون به قطر خروجی نازل در تونل‌های باد با ماخ عملکردی مختلف

۲-۴- میزان فرورفتگی دیفیوزر درون محفظه آزمون

میزان فرورفتگی دیفیوزر درون محفظه آزمون نیز یکی از پارامترهای مهم طراحی محفظه آزمون است. با توجه به این‌که داده‌های آماری ارایه شده برای نسبت میزان فرورفتگی دیفیوزر درون محفظه آزمون به قطر خروجی نازل پراکندگی زیادی داشتند که ممکن است ناشی از عدم دسترسی به ابعاد درست و واقعی باشد به همین دلیل برای این پارامتر از داده‌های دو مرجع [۲] و [۳] استفاده می‌شود که مقدار فرورفتگی مناسبِ دیفیوزر درون مقطع آزمون را حدود ۵۰ تا ۶۰ درصدِ قطر خروجی نازل معرفی کرده‌اند. به همین دلیل در این پژوهش، مقدار فرورفتگی دیفیوزر درون مقطع آزمون را ۵۰ درصدِ قطر خروجی نازل در نظر می‌گیریم. در نتیجه با توجه به این‌که قطر خروجی نازل ۵۰ سانتی‌متر است، طول L_2 برابر با ۲۵ سانتی‌متر تعیین می‌گردد.

۲-۵- قطر مقطع آزمون

قطر مقطع آزمون پارامتری است که به تجهیزات آشکارسازی جریان و مکانیزم مهارکننده مدل وابسته است. داده‌های آماری مربوط به نسبت قطر مقطع آزمون به قطر خروجی نازل در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل و محدوده عدد ماخ عملکردی به‌نظر می‌رسد که $D_{t.s.}/D_{Nozz.} = 2.1$ مقدار قابل قبول برای طراحی باشد [۱]. با توجه به این‌که اندازه قطر خروجی نازل ۵۰ سانتی‌متر است بنابراین قطر مقطع آزمون ۱۰۵ سانتی‌متر به‌دست می‌آید.



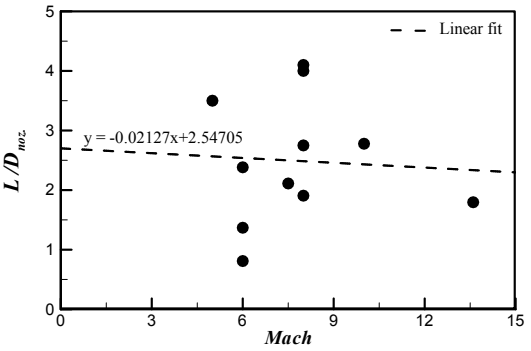
شکل ۴- نسبت قطر محفظه آزمون به قطر خروجی نازل در تونل‌های باد بااعداد ماخ عملکردی مختلف

۲-۶- طول مقطع آزمون

طول مقطع آزمون نیز پارامتری است که به تجهیزات آشکارسازی جریان و مکانیزم مهارکننده مدل وابسته است. داده‌های آماری مربوط به نسبت طول مقطع آزمون به قطر خروجی نازل در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این‌که در ماخ عملکردی ۵ تا ۷ این نسبت حدود ۲/۵ است، بنابراین $L/D_{Nozz.} = 2.5$ مقدار قابل قبول برای این طراحی می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به این‌که اندازه قطر خروجی نازل ۵۰ سانتی‌متر است بنابراین طول مقطع آزمون ۱۲۵ سانتی‌متر به‌دست می‌آید. از طرفی در مرجع [۱] گفته شده‌است که طول مقطع آزمون نباید از ۱/۵ برابر قطر محفظه آزمون بزرگتر باشد، که برای محفظه طراحی شده این قید رعایت شده است. با توجه به پارامترهای به‌دست آمده در این بخش، ابعاد اولیه مقطع آزمون تونل‌باد موردنظر در ماخ عملکردی ۵ تا ۷ در جدول ۱ ارایه شده است. در شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب مدل هندسی تونل‌باد به‌صورت کامل و مدل برش‌خورده نشان داده شده است.

www.SID.ir

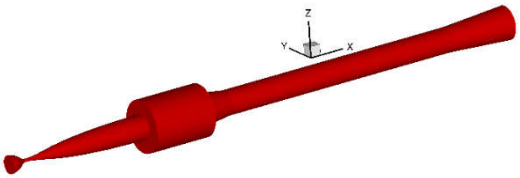
Archive of SID



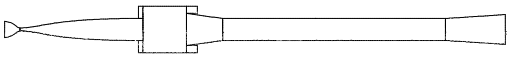
شکل۵- نسبت طول محفظه آزمون به قطر خروجی نازل در تونل‌های باد بااعداد ماخ عملکردی مختلف

جدول ۱- ابعاد اولیه محفظه آزمون (ابعاد به سانتی‌متر)

$D_{noz.}$	D_{diff}	$D_{t.s.}$	L	L_1	L_2
۵۰	۷۲/۵	۱۰۵	۱۲۵	۱۰	۲۵



شکل ۶- نمای کلی تونل باد

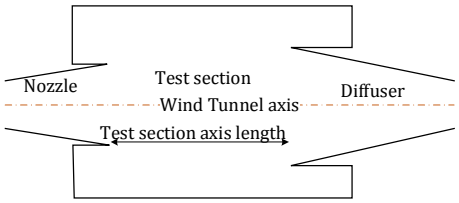


شکل ۷- نمای کلی تونل باد (برش خورده)

۳- تحلیل عددی مقطع آزمون طراحی

پس از استخراج ابعاد اولیه مقطع آزمون در ادامه و جهت تعیین مقدار بهینه آن‌ها از تحلیل عددی استفاده شده است. برای اینکه الگوی جریان ورودی و خروجی از محفظه آزمون به واقعیت نزدیک‌تر باشد، مدل کاملی از تونل‌باد، از ورودی نازل تا خروجی دیفیوزر در نظر گرفته شده است. ابعاد هندسه‌های نازل و دیفیوزر از مراجع [۴] و [۵] استخراج شده‌اند. معیار همگرایی، برابری دبی ورودی به نازل و دبی خروجی از دیفیوزر در نظر گرفته شده است. تغییرات ایجاد شده در جهت بلعیدن بهتر خط لغزش، ایجاد جریان یکنواخت در محفظه آزمون، کمترین میزان انحراف جریان در محدوده قرارگیری مدل و قدرت گردابه داخل محفظه آزمون به عنوان معیار طراحی محفظه آزمون در نظر گرفته شده است. مخروط لغزش باید توسط دیفیوزر بلعیده شود، در غیر اینصورت دیفیوزر کارایی خود را از دست خواهد داد و جریان به سمت قسمت بالای محفظه آزمون خواهد رفت که این موضوع باعث خطا در نتایج می‌شود. در بخش‌های بعدی ابتدا استقلال از شبکه و اعتبارسنجی انجام شده است و سپس طراحی و بررسی نتایج در ماخ ۵ انجام شده است و روند طراحی برای دو ماخ ۶ و ۷ نیز انجام شده است که نتایج نهایی برای این دوعدد ماخ نیز ارایه شده است. تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است.

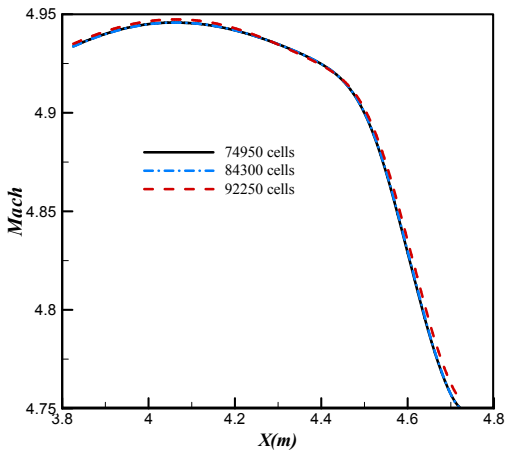
لازم به ذکر است که در بخش‌های بعدی منظور از طول محور محفظه آزمون، فاصله خروجی نازل تا ورودی دیفیوزر است که در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به اینکه میزان فرورفتگی نازل و دیفیوزر داخل محفظه آزمون به ترتیب ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متر است و طول کل محفظه آزمون به‌دست آمده از داده‌های آماری برابر با ۱۲۵ سانتی‌متر است، در نتیجه طول محور محفظه آزمون برابر با ۹۰ سانتی‌متر می‌شود.



شکل ۸- نمایی از طول محور محفظه آزمون

۳-۱- استقلال از شبکه

برای دستیابی به حل دقیق و نتایج معقول در تحلیل جریان داخل تونل‌باد نیاز به شبکه‌بندی مناسب است. برای این منظور سه شبکه با سازمان با تعداد ۷۴۹۵۰، ۸۴۳۰۰ و ۹۲۲۵۰ سلول در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ریز شدن شبکه تنها در داخل محفظه آزمون انجام شده است نه در کل تونل باد. با توجه به اهمیت عدد ماخ و تغییرات فشار از این پارامترها برای بررسی استقلال از شبکه استفاده می‌کنیم. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب منحنی تغییرات عدد ماخ و فشار استاتیک را روی محور محفظه آزمون نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، با تغییر تعداد شبکه، تفاوت زیادی در نتایج به‌وجود نمی‌آید. در نهایت از تعداد شبکه ۸۴۳۰۰ سلول استفاده شده است. لازم به ذکر است که تغییرات عدد ماخ و فشار استاتیک در این شکل‌ها به دلیل این است که محفظه آزمون جت آزاد به دلیل داشتن ناحیه آزاد در اطراف آن و ایجاد ناحیه مرده در اطراف محفظه آزمون سبب می‌شود که جریان به سمت این ناحیه مرده کشیده شود و به دلیل سرعت بالا، شکل هندسه محفظه و تاثیرات ناحیه مرده، جریان در طول محفظه آزمون تغییر کند و تغییراتی در فشار و عدد ماخ در طول مقطع کاری پدیدار شود. البته لازم به ذکر است که مطابق شکل ۹ درصد تغییرات عدد ماخ حدود ۴ درصد است که قابل قبول می‌باشد.



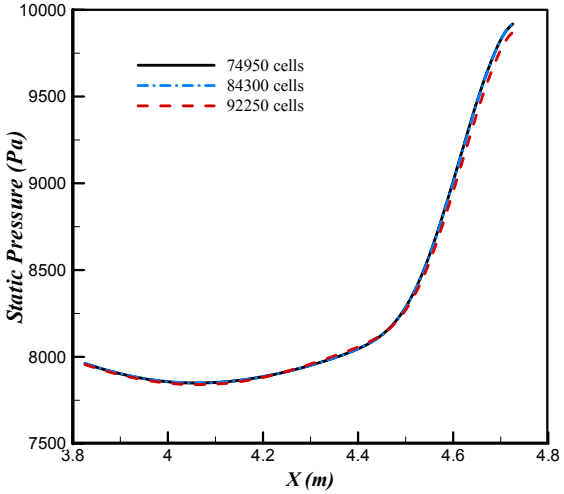
شکل ۹- منحنی تغییرات عدد ماخ روی محور محفظه آزمون

www.SID.ir

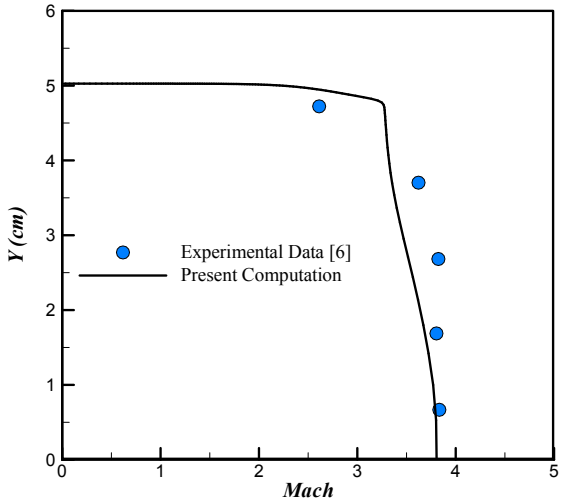
Archive of SID

۳-۲- اعتبارسنجی

با توجه به این‌که جریان در داخل محفظه آزمون از طریق خروجی نازل تامین می‌شود بنابراین تخمین دقیق جریان در خروجی نازل سبب تحلیل دقیق جریان در درون محفظه آزمون خواهد شد. برای اعتبارسنجی، از داده‌های خروجی نازل تونل‌باد ویرجینیا استفاده شده است [۶]. تحلیل انجام شده در تونل‌باد ویرجینا به صورت آشفته و پایا است. نازل تونل‌باد ویرجینیا که داده‌های پروفیل عدد ماخ در خروجی نازل آن به صورت تجربی موجود است، به تنهایی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی در شکل ۱۱ مقایسه شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج بسیار به‌هم نزدیک هستند و بنابراین تحلیل انجام شده در کار حاظر مورد تایید است و شرایط ورودی جریان به درون محفظه آزمون به درستی تخمین زده شده است.



شکل ۱۰- منحنی تغییرات فشار استاتیک روی محور محفظه آزمون



شکل ۱۱- پروفیل عدد ماخ در خروجی نازل

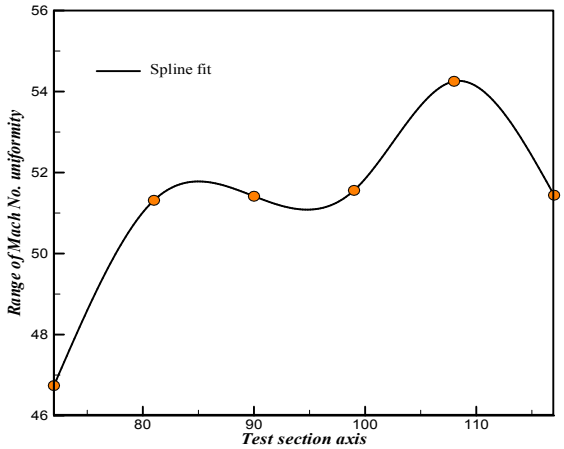
۴- طراحی محفظه آزمون با بهینه‌سازی پارامترهای طراحی درعدد ماخ ۵

۴-۱- بهینه‌سازی طول محور محفظه آزمون

برای به‌دست آوردن بهینه‌ترین حالت برای طول محور محفظه آزمون، با کاهش ۱۰ و ۲۰ درصدی و افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدیِ طول محور محفظه آزمون و با توجه به خط لغزش در داخل محفظه آزمون و بیشترین طول و قطر محدوده‌ای که مدل می‌تواند در آن قرار بگیرد، به بررسی این پارامتر پرداخته شد. در جدول ۲ و شکل ۱۲ نتایج به‌دست آمده از تحلیل جریان با طول‌های مختلف محور محفظه آزمون نشان داده شده است. با توجه به این‌که عدد ماخ عملکردی تونل ۵ است، در این‌جا محدوده‌ای که دارای عدد ماخ یکنواخت ۴/۹۳ است به عنوان محدوده مورد نظر ما انتخاب شده است و با تغییر طول محور محفظه آزمون، این محدوده محاسبه شده است و مناسب‌ترین طول محور محفظه آزمون تعیین شده است. با تغییر طول محور محفظه آزمون، این محدوده‌ها محاسبه و مناسب‌ترین طول محور محفظه آزمون تعیین شده است. در شکل ۱۳ شدت و قدرت گردابه‌ها در X=۴۴۰ سانتی‌متر برای تغییرات مختلف طول محور محفظه آزمون نشان داده شده است. در شکل ۱۴ موقعیت مکانی X=۴۴۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.

جدول ۲- محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت در طول‌های مختلف محور محفظه آزمون-باعدد ماخ ۵

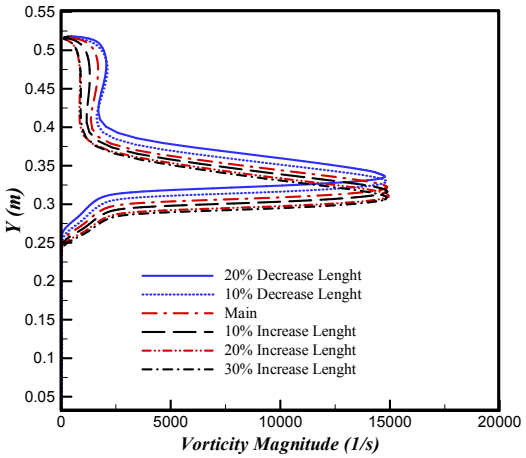
قطر محدوده‌ای که دارای ماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	طول محدوده‌ای که دارای ماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	درصد تغییر طول محور	طول محورمحفظه آزمون (سانتی‌متر)
۱۴/۹۶	۴۶/۷۴	-۲۰	۷۲
۱۵/۶۴	۵۱/۳۱	-۱۰	۸۱
۱۵/۶۸	۵۱/۴۱	-	۹۰
۱۵/۷۲	۵۱/۵۶	۱۰	۹۹
۱۶/۵۶	۵۴/۲۵	۲۰	۱۰۸
۱۵/۷۰	۵۱/۴۴	۳۰	۱۱۷



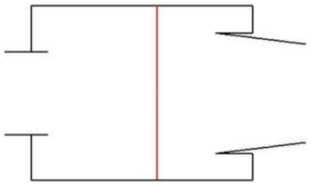
شکل ۱۲- محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به محور محفظه آزمون-ماخ۵

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۳- توزیع گردابه برای مقاطع مختلف طول محور محفظه آزمون در x=۴۴۰ cm



شکل ۱۴- موقعیت مکانی x=۴۴۰ cm در تونل باد- با عدد ۵

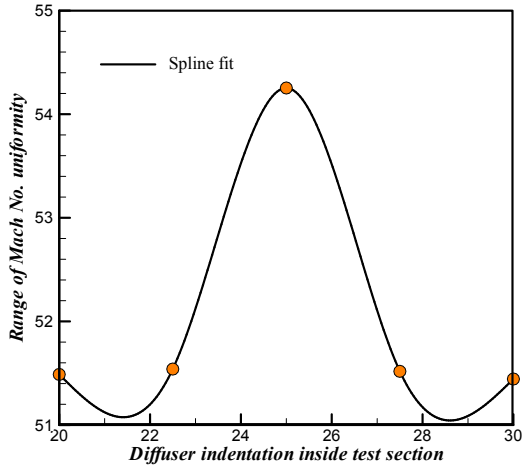
همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، گردابه‌ها در ناحیه مرده جریان (قسمت بین خط لغزش و دیواره محفظه آزمون) از شدت و قدرت بالایی برخوردار هستند و هیچ‌گونه تداخلی با ناحیه یکنواخت جریان و محل قرار گیری مدل ندارد که این امر برای انجام آزمایش مطلوب است. با توجه به جدول ۲، قطر محدوده یکنواخت برای حالتی که طول محور محفظه برابر با ۱۰۸ سانتی‌متر است از بقیه طول‌ها بیشتر است. همچنین همانطور که در جدول ۲ و شکل ۱۲ نشان داده شده است، بیشترین طول محدوده یکنواخت عدد ماخ نسبت به محور محفظه آزمون نیز برای حالتی اتفاق می‌افتد که طول محور محفظه برابر با ۱۰۸ سانتی‌متر است.

۴-۲- بهینه‌سازی میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون

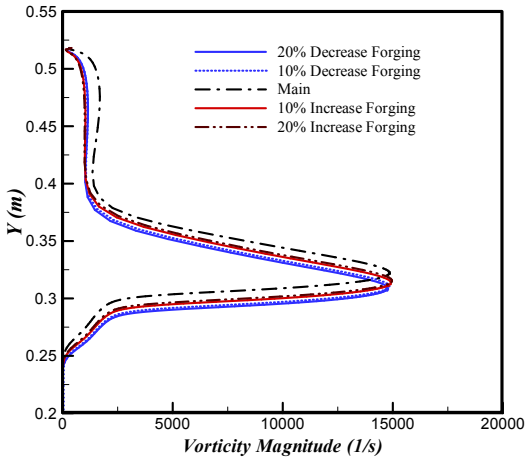
میزان فرورفتگی دیفیوزر درون محفظه آزمون نیز یکی از پارامترهای مهم طراحی محفظه آزمون است. میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون از داده‌های آماری به‌دست آمد که این مقدار برابر با ۲۵ سانتی‌متر است. در این قسمت با کاهش و افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدیِ میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه با توجه به قدرت ورتیسیته و بیشترین طول و قطر محدوده‌ای که مدل می‌تواند در آن قرار بگیرد، به بررسی این پارامتر پرداخته شد. در جدول ۳ و شکل ۱۵ نتایج به‌دست آمده از تحلیل جریان نسبت به میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون نشان داده شده است. در شکل ۱۶ شدت و قدرت گردابه‌ها در x=۴۴۰ cm برای تغییرات مختلف میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون نشان داده شده است.

جدول ۳- محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون-با عدد ماخ ۵

قطر محدوده‌ای که دارای ماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	طول محدوده‌ای که دارای ماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	درصد تغییر میزان فرورفتگی	میزان فرورفتگی دیفیوزر (سانتی‌متر)
۱۵/۶۸	۵۱/۴۸	-۲۰	۲۰
۱۵/۶۸	۵۱/۵۴	-۱۰	۲۲/۵
۱۵/۶۸	۵۴/۲۵	-	۲۵
۱۵/۶۸	۵۱/۵۱	۱۰	۲۷/۵
۱۵/۶۸	۵۱/۴۴	۲۰	۳۰



شکل ۱۵- محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون- با عدد ماخ ۵



شکل ۱۶- توزیع گردابه برای فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون در x=۴۴۰ cm -با عدد ماخ ۵

همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، گردابه‌ها در ناحیه مرده جریان (قسمت بین خط لغزش و دیواره محفظه آزمون) از شدت و قدرت بالایی برخوردار هستند و هیچ‌گونه تداخلی با ناحیه یکنواخت جریان و محل قرار گیری مدل ندارد که این امر برای انجام آزمایش مطلوب است. با توجه به جدول ۳ قطر محدوده یکنواخت با افزایش و کاهش میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون، تغییری نمی‌کند. پس در این قسمت فقط با توجه به محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون، بهینه

www.SID.ir

Archive of SID

ترین حالت را برای این پارامتر تعیین می‌کنیم. با توجه به جدول ۳ و شکل ۱۵ بیش‌ترین محدوده یکنواختی عدد ماخ برای حالتی رخ می‌دهد که میزان فرورفتگی دیفیوزر برابر با ۲۵ سانتی‌متر است.

۴-۳- بهینه‌سازی قطر محفظه آزمون

قطر محفظه آزمون از داده‌های آماری ۱۰۵ سانتی‌متر به‌دست آمد. در این قسمت با کاهش و اضافه کردن ۱۰ و ۲۰ درصدی قطر محفظه آزمون با توجه به قدرت ورتیسیته در داخل محفظه آزمون و بیشترین طول و قطر محدوده‌ای که مدل می‌تواند در آن قرار بگیرد، بهینه‌ترین حالت برای این پارامتر به‌دست آمده است. در جدول ۴ و شکل ۱۷ نتایج به‌دست آمده از تحلیل جریان نسبت به تغییرات قطر محفظه آزمون نشان داده شده است.

در شکل ۱۸ شدت و قدرت گردابه‌ها در x=۴۴۰ cm برای تغییرات مختلف قطر محفظه آزمون نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، گردابه‌ها در ناحیه مرده جریان (قسمت بین خط لغزش و دیواره محفظه آزمون) از شدت و قدرت بالایی برخوردار هستند و هیچ‌گونه تداخلی با ناحیه یکنواخت جریان و محل قرار گیری مدل ندارد که این امر برای انجام آزمایش مطلوب است. با توجه به جدول ۴ قطر محدوده یکنواخت با افزایش و کاهش قطر محفظه آزمون، تغییری نمی‌کند، پس در این قسمت با توجه به محدوده یکنواخت عدد ماخ، بهینه ترین حالت را برای قطر محفظه آزمون تعیین می‌کنیم. با توجه به جدول ۴ و شکل ۱۷ بیش‌ترین محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به محور محفظه آزمون، برای حالتی رخ می‌دهد که میزان قطر محفظه آزمون برابر با ۱۰۵ سانتی‌متر است. در جدول ۵ ابعاد اولیه محفظه آزمون نشان داده شده است و با توجه به پارامترهای به‌دست آمده در بخش‌های قبلی، ابعاد مقطع آزمون تونل باد موردنظر ما در ماخ عملکردی ۵ به‌دست آمد که همه این پارامترها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۴- محدوده یکنواختی با عدد ماخ نسبت به قطر محفظه آزمون-با عدد ماخ ۵

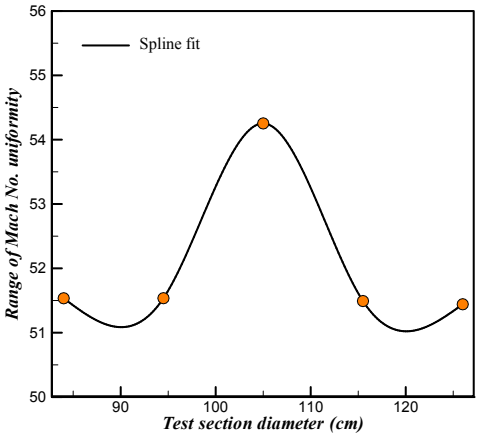
قطر محدوده‌ای که دارای عددماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	طول محدوده‌ای که دارای عددماخ ۴/۹۳ است (سانتی‌متر)	درصد تغییر قطر محفظه آزمون	قطر محفظه آزمون (سانتی‌متر)
۱۵/۶۸	۵۱/۵۳۵	-۲۰	۸۴
۱۵/۶۸	۵۱/۴۳۶	-۱۰	۹۴/۵
۱۵/۶۸	۵۱/۲۵۳	-	۱۰۵
۱۵/۶۸	۵۱/۴۹۲	۱۰	۱۱۵/۵
۱۵/۶۸	۵۱/۴۴۲	۲۰	۱۲۶

جدول ۵- ابعاد اولیه محفظه آزمون (ابعاد به سانتی‌متر)

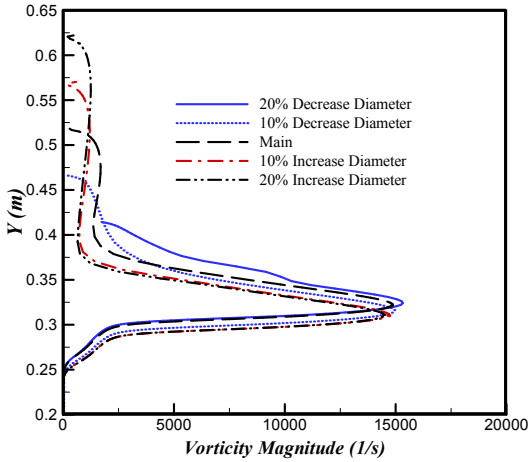
$D_{noz.}$	D_{diff}	$D_{t.s.}$	L	L_1	L_2
۵۰	۷۲/۵	۱۰۵	۱۲۵	۱۰	۲۵

۴-۴- بررسی کیفیت جریان

یکی از معیارهای طراحی، میزان انحراف جریان بود. در شکل ۱۹ خطوط جریان داخل محفظه آزمون و در شکل ۲۰ زاویه جریان نسبت



شکل ۱۷- محدوده یکنواختی عدد ماخ نسبت به تغییرات قطر محفظه آزمون-باعدد ماخ ۵



شکل ۱۸- توزیع ورتیسیته برای تغییرات قطر محفظه آزمون در x=۴۴۰ cm - باعدد ماخ ۵

جدول ۶- ابعاد نهایی محفظه آزمون طراحی شده برای با عدد ماخ ۵ (ابعاد به سانتی‌متر)

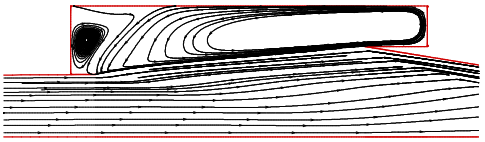
$D_{noz.}$	D_{diff}	$D_{t.s.}$	L	L_1	L_2
۵۰	۷۲/۵	۱۰۵	۱۴۳	۱۰	۲۵

به مقطعی در محدوده یکنواخت جریان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان انحراف جریان بسیار ناچیز می‌باشد. در نتیجه محدوده مورد نظر برای قرارگیری مدل مناسب می‌باشد. در شکل ۲۱ منحنی تغییرات عدد ماخ روی محور محفظه آزمون نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، عدد ماخ تحلیل عددی از عدد ماخ اسمی کمتر می‌باشد که این موضوع به علت تاثیرات لزجت و لایه مرزی می‌باشد. در شکل ۲۲ منحنی تغییرات فشار استاتیک در خروجی نازل نشان داده شده است. در شکل ۲۳ منحنی تغییرات فشار استاتیکی روی محور محفظه آزمون نشان داده شده است. تعیین همگرایی حل با معیار برابری دبی ورودی از نازل و

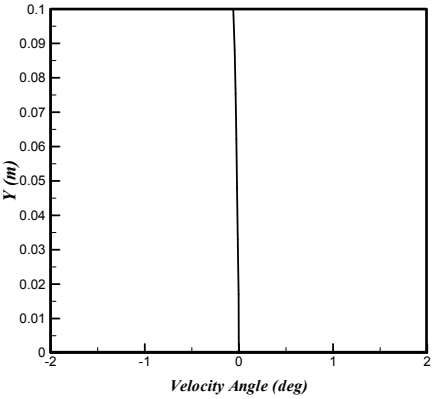
www.SID.ir

Archive of SID

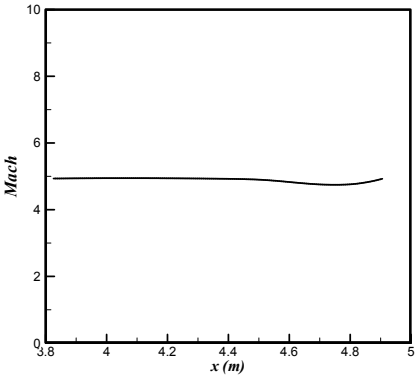
دبی خروجی از دیفیوزر در نظر گرفته شده است. شکل ۲۴ نمودار همگرایی تفاضل دبی ورودی نازل و خروجی دیفیوزر را نشان می‌دهد.



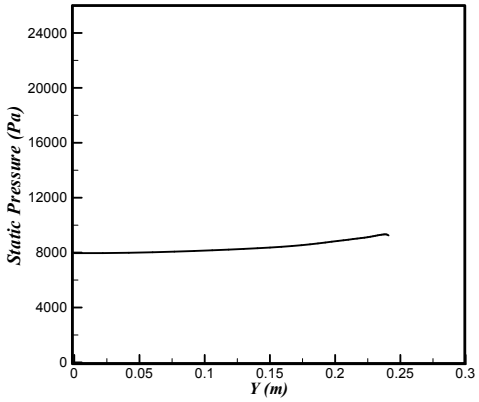
شکل ۱۹- خطوط جریان داخل محفظه آزمون-باعدد ماخ ۵



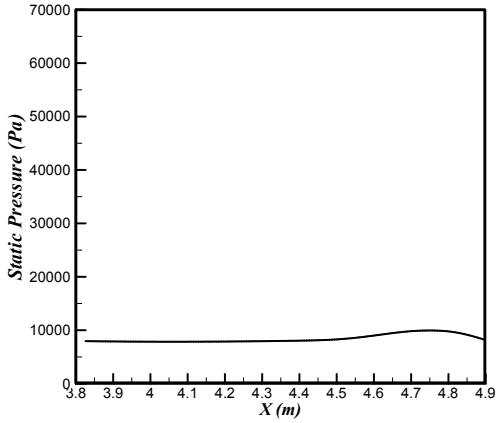
شکل ۲۰- میزان انحراف جریان نسبت به مقطعی در محدوده یکنواخت عدد ماخ - باعدد ماخ ۵



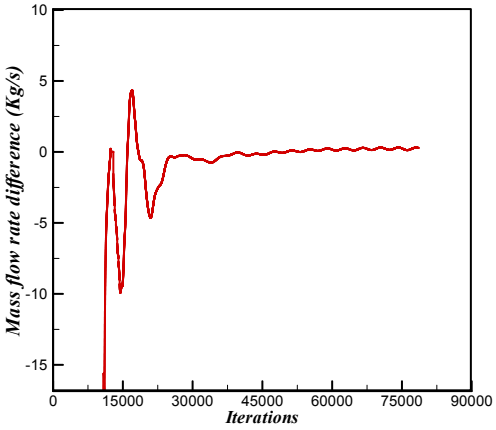
شکل ۱۹- منحنی تغییرات عدد ماخ روی طول محور محفظه آزمون- باعدد ماخ ۵



شکل ۲۰- منحنی تغییرات فشار استاتیک در خروجی نازل- باعدد ماخ ۵

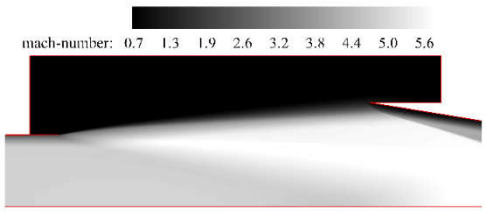


شکل ۲۱- منحنی تغییرات فشار استاتیکی روی طول محور محفظه آزمون- باعدد ماخ ۵



شکل ۲۴- تفاضل دبی ورودی از نازل و خروجی از دیفیوزر- باعدد ماخ ۵

محدوده یکنواخت جریان، خط جریان و نحوه بلعیدن جریان توسط دیفیوزر در شکل ۲۵ نشان داده شده است. الگوی خط جریان در ناحیه بالای خط لغزش (ناحیه مرده) در شکل ۲۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود، جریان در قسمت بالای محفظه آزمون هیچ‌گونه تداخلی با جریان اصلی (جریان خروجی از نازل) ندارد. در شکل ۲۷ کانتور فشار داخل محفظه آزمون و شوک‌های انعکاسی داخل دیفیوزر نشان داده شده است.

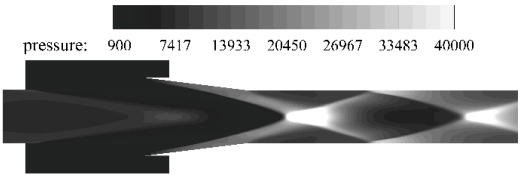


شکل ۲۵- کانتور عددماخ و خطوط جریان داخل محفظه آزمون

شکل ۲۶- خطوط جریان در ناحیه مرده محفظه آزمون

www.SID.ir

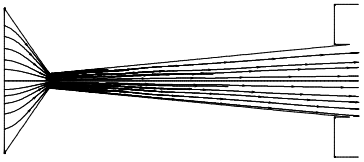
Archive of SID



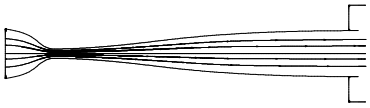
شکل ۲۷- کانتور فشار داخل محفظه آزمون و دیفیوزر

۵- مقایسه کیفیت جریان در حضور نازل مخروطی و منحنی‌دار

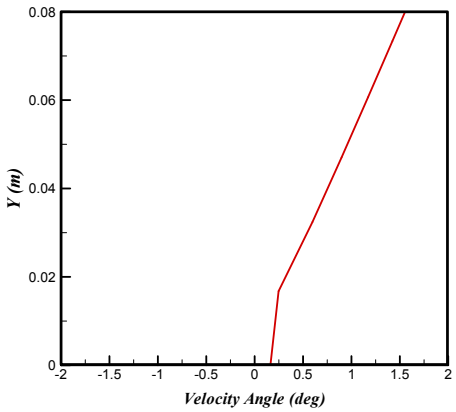
با توجه به این‌که نازل تونل باد تولیدکننده جریان با ماخ مورد نظر در محفظه آزمون است، بنابراین نوع این نازل و جریانی که در محفظه آزمون ایجاد می‌کند می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. به همین دلیل تاثیر دو نوع نازل مخروطی و انحنادار در خصوصیات جریان محفظه آزمون مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲۸ و شکل ۲۹ به ترتیب مدل هندسی نازل مخروطی و منحنی‌دار به همراه خطوط جریان نشان داده شده است. طراحی نازل منحنی‌دار برای عددماخ ۵ در مرجع [۵] انجام شده است و از داده‌های این مرجع استفاده شده است. در شکل ۳۰ و شکل ۳۱ به ترتیب زاویه جریان نسبت به محور مرکزی محفظه آزمون برای نازل مخروطی و منحنی‌دار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نازل مخروطی میزان انحراف جریان نسبت به محور مرکزی محفظه آزمون قابل ملاحظه است در صورتی‌که در نازل منحنی‌دار این مقدار تقریبا برابر صفر می‌باشد.



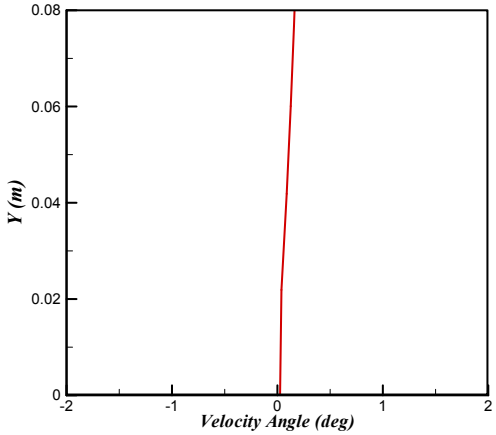
شکل ۲۸- مدل هندسی نازل مخروطی و خطوط جریان داخل آن



شکل ۲۹- مدل هندسی نازل منحنی‌دار و خطوط جریان داخل آن



شکل ۳۰- میزان انحراف جریان در مقطع محدوده یکنواختی عدد ماخ برای تونل باد با نازل مخروطی – باعدد ماخ ۵



شکل ۳۱- میزان انحراف جریان در مقطع محدوده یکنواختی عدد ماخ برای تونل باد با نازل منحنی‌دار- باعدد ماخ ۵

در شکل ۳۲ و شکل ۳۳ به ترتیب نمودار سرعت در نازل مخروطی و منحنی‌دار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت خروجی از نازل مخروطی به صورت مداوم در حال افزایش است ولی در نازل منحنی‌دار تغییرات سرعت کم‌تر است.

در شکل ۳۴ بردارهای سرعت نزدیک دیواره (لایه مرزی) در نازل مخروطی و منحنی‌دار را نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بردارهای سرعت در نازل مخروطی نسبت به محور افقی نازل انحراف دارند ولی در نازل منحنی‌دار میزان انحراف بسیار کم می‌باشد.

۶- طراحی محفظه آزمون در اعدادماخ‌های ۶ و ۷

مشابه روندی که برای عددماخ ۵ انجام شد، برای اعدادماخ ۶ و ۷ هم انجام شد. پارامترهای نهایی برای اعدادماخ۶ و ۷ به ترتیب در جدول ۷ و ۸ آورده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر اولیه‌ای که برای این دو عدد ماخ در نظر گرفته شد همان مقادیر جدول ۵ است.

جدول۷- ابعاد نهایی محفظه آزمون طراحی شده برای عدد ماخ ۶ (ابعاد به سانتی‌متر)

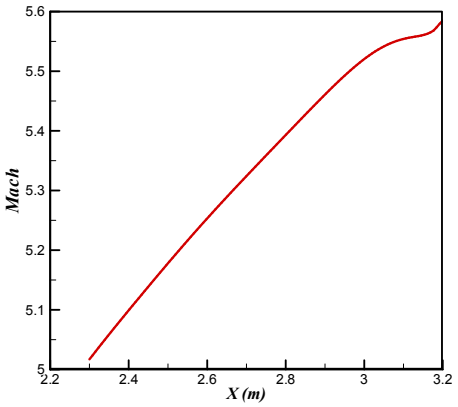
$D_{noz.}$	D_{diff}	$D_{t.s.}$	L	L_1	L_2
۵۰	۷۲/۵	۱۰۵	۱۲۵	۱۰	۲۵

جدول۸- ابعاد نهایی محفظه آزمون طراحی شده برای عدد ماخ ۷ (ابعاد به سانتی‌متر)

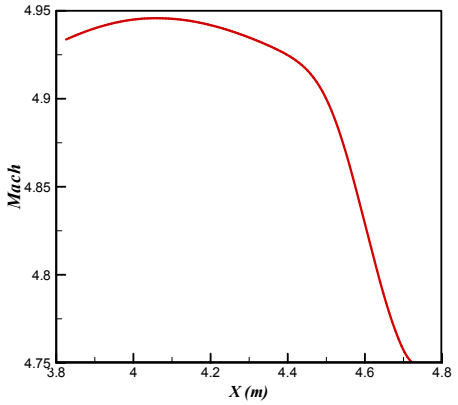
$D_{noz.}$	D_{diff}	$D_{t.s.}$	L	L_1	L_2
۵۰	۷۲/۵	۱۰۵	۱۳۴	۱۰	۲۲/۵

www.SID.ir

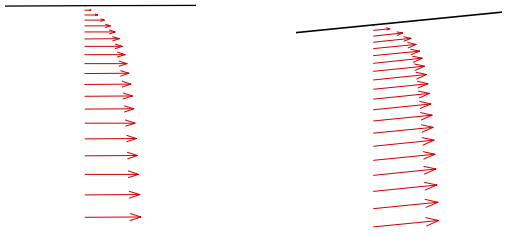
Archive of SID



شکل ۳۲- نمودار عدد ماخ روی محور محفظه آزمون با نازل مخروطی- باعدد ماخ ۵



شکل ۳۳- نمودار عدد ماخ روی محور محفظه آزمون با نازل منحنی‌دار باعدد ماخ ۵



شکل ۳۴- بردارهای سرعت در نزدیک دیواره نازل مخروطی و منحنی‌دار

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که قرارگیری مدل در تونل باد در محفظه آزمون قرار می‌گیرد، همواره سعی طراحان تونل باد این است که ابعاد دقیقی از محفظه آزمون به منظور انجام آزمایش داشته باشند. در پژوهش حاضر، از اطلاعات آماری برای تخمین مقادیر اولیه پارامترهای محفظه آزمون استفاده شده است و سپس با تحلیل عددی جریان و تصحیح هندسه، محدوده یکنواخت (طول و قطر) برای قرارگیری مدل تعیین شد و ابعاد نهایی و مناسب برای محفظه آزمون دراعداد ماخ ۵، ۶ و ۷ به دست آمد. در این تحلیل‌ها، خط لغزش و میزان انحراف جریان نیز تعیین شدند. همچنین تاثیر نوع نازل در مشخصات جریان در محفظه آزمون نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده برای تغییر هر یک از پارامترهای محفظه آزمون به صورت زیر است:

طول محور محفظه آزمون و میزان فرورفتگی دیفیوزر داخل محفظه آزمون تاثیر زیادی در نتایج دارد و قطر محفظه آزمون تاثیر چندانی روی نتایج نمی‌گذارد.

با افزایش عدد ماخ، محدوده یکنواخت به منظور قرارگیری مدل داخل محفظه آزمون نیز افزایش می‌یابد.

در محفظه آزمون جت آزاد با توجه به اینکه لایه مرزی در قسمت مرده جریان است و به محدوده قرارگیری مدل ارتباطی ندارد، می‌توان از مدل‌های بزرگ‌تری استفاده کرد.

نازل انحنادار نسبت به نازل مخروطی، شرایط جریان مناسب‌تری را در محفظه آزمون ایجاد می‌کند.

طول کل محفظه آزمون برای اعدادماخ ۵، ۶ و ۷ به ترتیب ۱۴۳، ۱۲۵ و ۱۳۴ سانتی‌متر به‌دست آمد. با توجه به اینکه طول کل محفظه آزمون نباید بزرگتر از ۱/۵ برابر قطر محفظه آزمون باشد [۱] (قطر محفظه آزمون برابر با ۱۰۵ سانتی‌متر است)، مقادیر به‌دست آمده قابل قبول هستند.

۸- مراجع

[1] Pope A., Goin K., *High-speed wind tunnel testing*, Wiley, pp. 365-369, 1965.

[۲] محمدی‌فرد ف.، کرمی م.، حیدری م.ر.، طراحی آیرودینامیکی محفظه آزمون یک تونل باد ابرصوتی آزمایشگاهی. *نخستین همایش منطقه ای مهندسی مکانیک*، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، ۱۳۸۹.

[3] Zhang J., Morishita E., Okunuki T., Itoh H., Experimental and computational investigation of supersonic cavity flows, *10th AIAA/NAL-NASDA-ISAS International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, Kyoto,Japan, April 24-27, 2001.

[۳] یوسفی ا.، *طراحی دیفیوزر تونل باد ابر صوت ماخ ۵ و ۶ و ۷*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش فضایی، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه مالک اشتر، زمستان ۱۳۹۴.

[۴] مقیم نژاد ع.، *طراحی نازل تونل باد ابر صوت ماخ ۵ و۶ و ۷*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.

[6] Chen R., Computational studies of the Virginia Tech hypersonic wind tunnel, *Proceedings of the Virginia Tech Symposium for undergraduate research in engineering*, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, October, 2004.

www.SID.ir