

مهندسی مکانیک و هوافضا

سومین کنفرانس بین المللی

اردیبهشت ماه ۹۷ - تهران - ایران

3rd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering

با مجوز شماره از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

گواهی ارائه مقاله
سومین کنفرانس بین المللی
مهندسی مکانیک و هوافضا
دین و سید کوی می شود مقاله با عنوان:
بررسی تجربی اثر مساحت دهانه ورودی مجرای مکش بر روی عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی
نویسنده: انوشیروان: محمد علی طحانی جواد سپاهی یونسی
در سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، با مجوز شماره ۹۶۳/۱۲۷۰۹۶۳ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در ۳۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷
در محل دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی با حضور ایشان به صورت سخنرانی ارائه گردید.
این مقاله در پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC) و کنسرسیوم محتوای ملی (CIVILICA) نمایه خواهد شد. توفیق روز افزون ثاراد عمره بی علمی و اجرایی کشور عزیزمان ایران آرزو مندیم.

محل: تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی / ۳۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷

Certificate
WWW.MECHAERO.IR
ID:2072
Code:mechaero1817-20720079

3rd International Conference on Mechanical & Aerospace Engineering

This is to certify that
Mohammadali Maljaee, Javad Sepahi-Younsi
gave an oral presentation of their paper entitled
'Experimental Investigation of Effects of Bleed Entrance Area on the Performance of a Supersonic Air Intake'
at the **"3rd International Conference on Mechanical & Aerospace Engineering"**
held on May 11, 2018 at K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
The paper will be indexed in the ISC and CIVILICA data base.

Dr.S.Mojtaba Mosavi Nainian
Conference Chairman
Dr. S. Mohammad Hosein Sharifi
Executive Secretary
Dr. A. Kabinejad
Conference Secretary

K. N. Toosi University of Technology - Tehran - Iran / May, 11, 2018

بررسی تجربی اثر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بر روی عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی

محمد علی ملجائی*^۱، جواد سپاهی یونسی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

آ نویسندة مسئول: jsepahi@um.ac.ir

خلاصه

یک ورودی هوای فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی با هندسه‌ی متقارن محوری در عدد ماخ ۲ و زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه به صورت تجربی در تونل باد آزمایش شده است. در این ورودی با ایجاد مکش لایه‌ی مرزی بر روی سطح تراکمی در بالادست گلوگاه، اثرات تغییر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بر پارامترهای عملکردی ورودی از قبیل نسبت دبی جرمی، بازیافت فشار کل، اعوجاج جریان و نسبت دبی جرمی مجرای مکش مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش، بازیافت فشار کل در شرایط بحرانی و فروبحرانی افزایش می‌یابد اما اگر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بیش از حد زیاد شود می‌تواند اثر معکوسی بر عملکرد ورودی داشته و خصوصاً در شرایط بحرانی حتی بیشتر از زمانی که دهانه‌ی ورودی مجرای مکش کاملاً بسته است، موجب افت کمیت‌های عملکردی ورودی شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استفاده از دهانه‌ی ورودی باریک برای مجرای مکش موجب جلوگیری از افت کمیت‌های ورودی می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استفاده از دهانه‌ی ورودی باریک برای مجرای مکش موجب جلوگیری از افت کمیت‌های ورودی می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استفاده از دهانه‌ی ورودی باریک برای مجرای مکش موجب جلوگیری از افت کمیت‌های ورودی می‌شود.

کلمات کلیدی: ورودی فراصوتی، عملکرد ورودی، مجرای مکش لایه‌ی مرزی، بازیافت فشار کل، نسبت دبی جرمی

۱. مقدمه

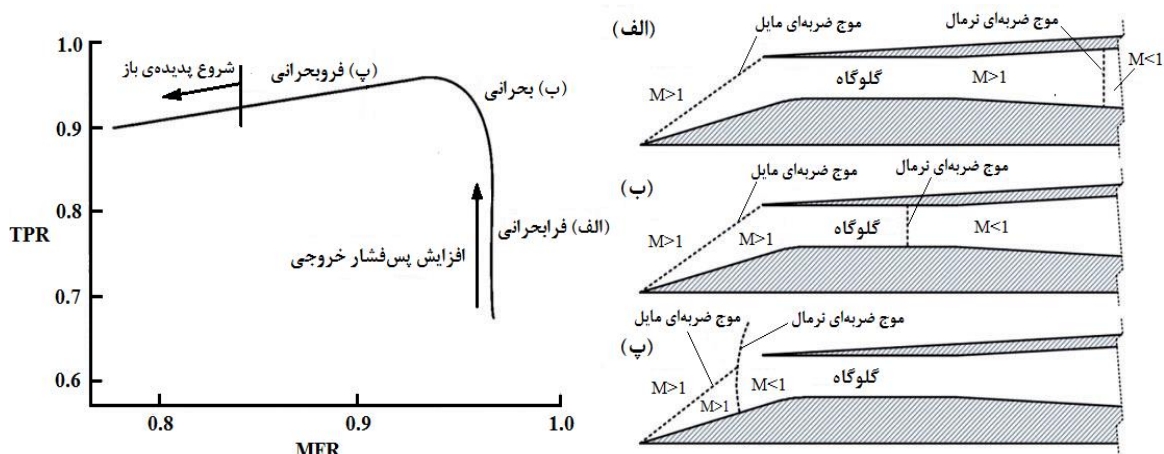
در پروازهای فراصوتی، ورودی هوای موتور همانند یک کمپرسور عمل می‌کند به گونه‌ای که هوا را با همان شرایط اولیه‌ی جریان آزاد گرفته و با ایجاد امواج ضربه‌ای و تغییرات مساحت جریان، عدد ماخ جریان را کاهش داده و فشار آن را بالا می‌برد و در نهایت با یک شرایط مطلوب تحویل قسمت بعدی موتور می‌دهد. با توجه به اینکه جریان داخلی ورودی دچار کاهش سرعت می‌شود لایه‌های مرزی موجود بر روی سطوح داخلی ورودی و همچنین بر روی سطوح تراکمی، همگی در معرض گرادیان فشار معکوس هستند که شرط و وضعیتی کلاسیک برای ایجاد جدایش جریان است. تداخل لایه‌ی

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش جلوبرندگی

Email: mmaljaee@yahoo.com

مرزی و امواج ضربه‌ای نیز جدایش جریان را تسهیل می‌کند. از لحاظ تاریخی اغلب مشکلات مرتبط با توسعه‌ی ورودی‌ها را می‌توان به مسئله‌ی گفته شده و یا سایر رفتارهای لایه‌ی مرزی نسبت داد [۱].

در ورودی‌های فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی، بخشی از جریان با استفاده از سطوح تراکمی در خارج از دهانه‌ی ورودی و بخش دیگر آن طی عبور از مجرای ورودی متراکم می‌شود. منحنی عملکردی برای این نوع ورودی به همراه شکل شماتیک جریان در حالت‌های کاری مختلف ورودی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی عملکردی ورودی فراصوتی به همراه شکل شماتیک جریان در حالت‌های کاری مختلف [۱۲]

هنگامی که میزان پس فشار ورودی پایین است، شرایط کاری در ورودی فرابحرانی است. در این حالت که در شکل ۱- الف نشان داده شده است، یک موج ضربه‌ای نرمال در پایین دست گلوگاه قرار می‌گیرد. این موج ضربه‌ای نرمال نسبتاً قوی و در نتیجه بازیافت فشار ورودی کم است. با افزایش پس فشار، موج ضربه‌ای نرمال شروع به حرکت به طرف بالادست کرده و به تدریج در اثر کاهش سطح مقطع جریان از قدرت آن کاسته می‌شود. هنگامی که پس فشار به اندازه‌ی کافی افزایش یابد، موج ضربه‌ای نرمال در گلوگاه قرار گرفته و شرایط بحرانی حاصل می‌شود (شکل ۱-ب). در این حالت موج ضربه‌ای نرمال در ضعیف‌ترین حالت خود و در نتیجه بازیافت فشار ورودی بیشینه است. افزایش بیشتر پس فشار موجب بیرون افتادن موج ضربه‌ای نرمال و تحصیل شرایط فرابحرانی می‌شود (شکل ۱-پ). قرارگیری موج ضربه‌ای نرمال خارج از دهانه‌ی ورودی، قدرت آن را افزایش داده و موجب افت فشار کل می‌شود. همچنین به دلیل فاصله گرفتن موج ضربه‌ای نرمال از لبه‌ی پوسته، سرریز جریان افزایش و در نتیجه نسبت دبی جرمی ورودی کم می‌شود. در شرایط فرابحرانی اگر نسبت دبی جرمی ورودی کمتر از مقدار معینی شود، همزمان با افت زیادی که ممکن است در فشار کل حاصل شود، ورودی از حالت پایدار خارج شده و پدیده‌ی باز^۱ رخ می‌دهد. وقوع پدیده‌ی باز مهم‌ترین مشخصه‌ی فاز ناپایداری ورودی است که در طی آن امواج ضربه‌ای ورودی و همچنین دبی جرمی و فشار جریان دائماً در حال نوسان هستند.

همان‌طور که اشاره شد موج ضربه‌ای نرمال در شرایط فرابحرانی و فرابحرانی نسبتاً قوی است و در اثر تداخل با لایه‌ی مرزی می‌تواند موجب رشد و یا حتی جدایش لایه‌ی مرزی شود. در صورت وقوع جدایش مشخصه‌های عملکردی ورودی از قبیل نسبت دبی جرمی و بازیافت فشار کل نسبت به حالت بدون جدایش کم می‌شود. حال اینکه میزان افت فشار کل و نسبت دبی جرمی در اثر جدایش چقدر ممکن است باشد به ترکیب یک سری از پارامترهای هندسی و آیرودینامیکی

¹ Buzz

بستگی دارد. در برخی موارد ممکن است با اعمال یک سری تغییرات هندسی کوچک نیاز استفاده از مجرای مکش^۱ را از بین برد اما در بسیاری از موارد دیگر مکش جریان لازم بوده و اثر مطلوب بیشتری دارد.

اهمیت استفاده از مجرای مکش برای کنترل و از بین بردن جدایش جریان در ورودی‌های فراصوتی باعث شده که مطالعات زیادی به صورت تجربی، عددی و یا هر دو توسط پژوهشگران مختلف انجام گیرد. سازمان فضایی ناسا طی دهه-های ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰ میلادی تحقیقات زیادی اکثراً به صورت تجربی در رابطه با به‌کارگیری روش مکش برای کنترل جریان در ورودی‌های فراصوتی انجام داد. اثرات نوع دهانه‌ی مجرای مکش (شکافی و متخلخل^۲) بر عملکرد ورودی [۴-۲]، اثر تغییرات پس‌فشار خروجی مجرای مکش بر عملکرد ورودی [۵]، اثر موقعیت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش نسبت به نقاط برخورد امواج ضربه‌ای بر عملکرد و پایداری ورودی [۶]، تأثیر مکش لایه‌ی مرزی بر عملکرد ورودی در زوایای حمله-ی مختلف [۷]، قرار گرفتن دهانه‌ی مجرای مکش در بالادست گلوگاه و تأثیر آن بر دبی جرمی مجرای مکش و پارامترهای عملکردی ورودی [۸]، از جمله مواردی است که توسط محققان ناسا انجام شده است. در دهه‌ی اخیر نیز استفاده از روش مکش برای کنترل و بهبود جریان داخلی و خارجی ورودی‌های فراصوتی در حیطه‌ی کاری برخی از پژوهشگران قرار داشته است. افزایش زاویه‌ی حمله و قابلیت مانورپذیری با به‌کارگیری مجرای مکش در قسمت گلوگاه یک ورودی متقارن-محوری [۹]، تغییر موقعیت عمودی لبه‌ی عقبی دهانه‌ی مجرای مکش در یک ورودی فراصوتی و تأثیر آن بر کیفیت جریان داخلی و عملکرد ورودی [۱۰]، بررسی تغییر مساحت دهانه‌ی ورودی و خروجی مجرای مکش در قسمت گلوگاه و اثراتش بر عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی با هندسه‌ی مستطیلی [۱۱] و بررسی اثرات مجرای مکش و پارامترهای هندسی آن بر عملکرد و پایداری یک ورودی فراصوتی متقارن‌محوری [۱۲-۱۴] از جمله‌ی این تحقیقات است.

با مطالعه و بررسی مراجع ذکر شده در بالا در زمینه‌ی استفاده از مجرای مکش در ورودی‌های فراصوتی برای بهبود عملکرد و پایداری آن‌ها و همچنین فعالیت‌های دیگر مرتبط با این موضوع کاملاً مشخص است که میزان اثربخشی و کارایی سیستم مجرای مکش در عملکرد و پایداری ورودی‌ها وابسته به مواردی همچون شکل هندسی مجرای مکش، مساحت دهانه‌ی ورودی و خروجی، موقعیت و زاویه‌ی دهانه‌ی ورودی، میزان پس‌فشار خروجی و برخی دیگر از پارامترهای هندسی و عملیاتی مرتبط با مجرای مکش است. در مورد تأثیر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بر روی عملکرد و پایداری ورودی می‌توان گفت که نه تنها در کشور ما بلکه حتی در سطح جهانی نیز فعالیت چندانی در رابطه با آن انجام نشده است. مسائلی از قبیل تداخل امواج ضربه‌ای با لایه‌ی مرزی و گرادیان فشار معکوس در ورودی‌های فراصوتی وجود دارد که خصوصیات آن برای هر ورودی با توجه به هندسه، موقعیت قرارگیری امواج ضربه‌ای و شرایط عملیاتی فرق می‌کند. بنابراین به منظور توسعه‌ی دانش در این زمینه و همچنین گسترش داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی کدهای عددی، در این پژوهش یک ورودی فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی با هندسه‌ی متقارن‌محوری برای عدد ماخ ۲ طراحی شده و با تغییر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش، تأثیر هر یک از هندسه‌های به‌دست‌آمده بر مشخصه‌های عملکردی این ورودی مورد بررسی و ارزیابی قرار داده شده است. کلیه‌ی آزمایش‌ها در زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه و عدد ماخ ۲ در تونل باد فراصوتی دانشگاه امام حسین (ع) انجام شده است.

۲. تجهیزات و فرایند آزمایش‌ها

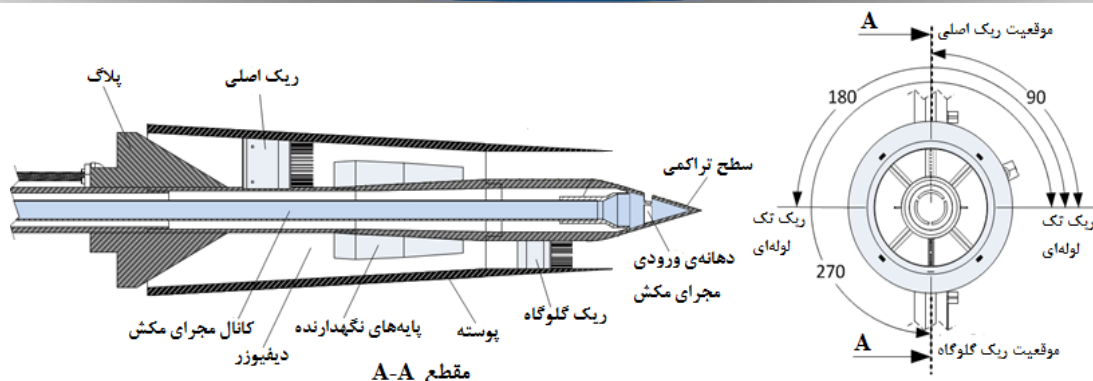
¹ Bleed

² Slot and Porous

در این قسمت فرایند و کلیه‌ی تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌ها از قبیل تونل باد، مدل ورودی فراصوتی و سنسورهای اندازه‌گیری فشار معرفی می‌شوند. آزمایش‌های مربوط به این پژوهش در تونل باد چند منظوره‌ی مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر دانشگاه امام حسین (ع) انجام شده است. این تونل باد از نوع مدار باز و مکشی بوده و به منظور هدایت جریان هوا به داخل محفظه‌ی آزمون از دو موتور توربوفن پرقدرت که در قسمت انتهایی تونل قرار دارد، استفاده می‌کند به‌گونه‌ای که هوا به صورت مداوم از اتمسفر آزاد مکیده شده و پس از عبور از قسمت‌های مختلف کانال تونل و مقطع آزمون دوباره به محیط آزاد تخلیه می‌شود. محدوده‌ی عدد ماخ قابل دستیابی در این تونل باد از ۰/۴ تا ۳/۰ است و بر همین اساس رژیم‌های سرعت فراصوتی، گذرصوتی و فراصوتی (تا عدد ماخ ۳) را می‌تواند در محفظه‌ی آزمون به‌وجود آورد. محفظه‌ی آزمون دارای ابعاد $60 \times 60 \times 120$ سانتی‌متر است. عدد رینولدز در محفظه‌ی آزمون از $10^6 \times 6/5$ تا $10^7 \times 1/3$ بر واحد متر و شدت آشفتگی در آن از ۰/۴ تا ۱/۴ بسته به عدد ماخ جریان تغییر می‌کند. همچنین حداکثر زاویه‌ی جریان در عدد ماخ ۲ در مقطع آزمون حدود ۰/۵ درجه است [۱۳]. دیواره‌های جانبی محفظه‌ی آزمون مجهز به پنجره‌هایی با شیشه‌های مناسب بوده که امکان مشاهده‌ی جریان و امواج ضربه‌ای را به وسیله‌ی سیستم سایه‌نگاری فراهم می‌کنند. دیواره‌های بالا و پایین محفظه‌ی آزمون به‌شکل متخلخل بوده و برای ایجاد مکش و باریک نگه‌داشتن یا حذف لایه‌ی مرزی در داخل محفظه‌ی آزمون و جلوگیری از خفگی جریان و انعکاس امواج از روی دیواره‌ها در رژیم‌های گذرصوت استفاده می‌شود تا بتواند به بهترین شکل شرایط یک وسیله‌ی در حال حرکت در جریان هوا را بازسازی نماید. از آنجا که هوای وارد شده به تونل از هوای آزاد تأمین می‌شود، فشار و دمای کل هوای عبوری از تونل برابر با فشار و دمای استاتیک محیط بوده که قبل از انجام هر آزمایش به صورت دقیق اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش آزمایش‌ها در عدد ماخ ۲ و در زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه انجام شده‌اند. با توجه به اینکه دما و فشار محیط در بازه‌ی انجام آزمایش‌ها به‌صورت متوسط برابر با ۸۴۰۰۰ پاسکال و ۳۰۳ کلوین بوده است، عدد رینولدز آزمایش‌ها در عدد ماخ ۲ برابر با $10^6 \times 6/6$ است. مدل استفاده شده در طی آزمایش‌ها یک ورودی فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی بوده که برای عدد ماخ ۲ و به شکل متقارن محوری طراحی و ساخته شده است. شکل ۲ مدل ورودی را بعد از نصب در محفظه‌ی آزمون و شکل ۳ جرئیات هندسی و اجزای داخلی آن را نشان می‌دهد.

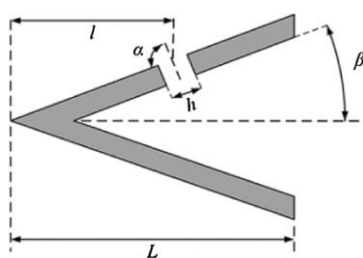


شکل ۲- مدل ورودی هوا داخل تونل باد



شکل ۳- تصویر شماتیک مدل ورودی هوا به همراه اجزای آن

در انتهای مدل یک قطعه‌ی مخروطی شکل (پلاگ) قرار داده شده است که با استفاده از یک موتور DC و یک بال-اسکرو^۱ قابلیت حرکت در راستای طولی را داشته و برای تغییر مساحت خروجی و در نتیجه تغییر فشار انتهایی ورودی استفاده می‌شود. میزان مساحت خروجی جریان در انتهای ورودی تعیین‌کننده‌ی موقعیت موج ضربه‌ای نرمال و دستیابی به شرایط مختلف عملکردی ورودی (فرابحرانی، بحرانی و فروبحرانی) است. در این آزمایش‌ها به منظور بررسی اثر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بر پارامترهای عملکردی ورودی از سه دماغه‌ی مخروطی شکل در ابتدای اسپایک استفاده شده است که قابلیت تعویض داشته و مساحت دهانه‌ی ورودی مکش در آن‌ها با یکدیگر فرق می‌کند. برای مقایسه و بررسی بیشتر از یک دماغه‌ی دیگر نیز در آزمایش‌ها استفاده شده است که بر خلاف سه مورد مذکور ورودی مکش در آن کاملاً بسته بوده و قابلیت مکش جریان را ندارد. در شکل ۴ دماغه‌های استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است و در جدول ۱ مشخصات هندسی آن‌ها ذکر گردیده است. در تمام دماغه‌های دارای مکش موقعیت مرکز دهانه‌ی ورودی مجرای مکش (l) ثابت است. مساحت خروجی مجرای مکش چهار برابر مساحت داخلی لوله‌ی مجرای مکش در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- دماغه‌های استفاده شده در این پژوهش به همراه پارامترهای هندسی آن

¹ Ball Screw

جدول ۱- مشخصات هندسی دماغه‌های مختلف

α°	h/L	l/L	اندازه‌ی دهانه‌ی ورودی مکش	شماره‌ی دماغه
۹۰	۰/۰۵۷	۰/۶۴۹	دهانه‌ی باریک (Narrow Bleed)	۱
۹۰	۰/۰۸۶	۰/۶۴۹	دهانه‌ی متوسط (Mediocre Bleed)	۲
۹۰	۰/۱۱۴	۰/۶۴۹	دهانه‌ی بزرگ (Wide Bleed)	۳
-	-	-	بدون مکش (No Bleed)	۴

یک ریک ۱۲ لوله‌ای در گلوگاه و یک ریک ۱۷ لوله‌ای (ریک اصلی) در انتهای ورودی برای اندازه‌گیری پروفیل فشار کل نصب شده است (شکل ۳). در امتداد سطح اسپایک و در راستای ریک اصلی روزه‌های فشار استاتیک با فاصله‌های مشخصی نسبت به هم تعبیه شده‌اند که برای ثبت مقادیر فشار استاتیک در امتداد کانال ورودی استفاده می‌شود (شکل ۲). البته دو ریک تک لوله‌ای نیز برای اندازه‌گیری افت فشار کل و عدد ماخ محلی جریان در قسمت دیفیوزر فروصوتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در محل ریک گلوگاه و ریک اصلی یک سنسور فشار استاتیک نیز وجود دارد که می‌توان با استفاده از داده‌های این سنسورها به همراه داده‌های فشار کل، پروفیل عدد ماخ را نیز در این دو مقطع به دست آورد. در انتهای مجرای مکش یک سنسور فشار کل و یک سنسور فشار استاتیک وجود دارد که برای محاسبه‌ی عدد ماخ و دبی جرمی مجرای مکش استفاده می‌شود.

در ابتدای هر آزمایش موقعیت پلاگ به گونه‌ای است که مساحت خروجی جریان در انتهای ورودی بیشترین مقدار را دارد. سپس با حرکت پلاگ به سمت بالادست مساحت خروجی به تدریج کم می‌شود. در طی هر یک از آزمایش‌ها ۸ موقعیت برای پلاگ در نظر گرفته شده و داده‌های تمامی سنسورها برای هر موقعیت پلاگ به صورت همزمان جمع‌آوری و ثبت شده‌اند. مدت زمان انجام آزمایش برای هر موقعیت پلاگ ۲ ثانیه بوده و در این بازه‌ی زمانی تقریباً ۵۰۰۰ داده برای هر سنسور فشار ثبت شده است. بعلاوه همزمان با داده‌برداری سنسورها اقدام به آشکارسازی و تصویربرداری از جریان با استفاده از سیستم سایه‌نگاری شده است. با توجه به اینکه خروجی سنسورهای فشار به صورت آنالوگ است، برای این که در رایانه قابل استفاده باشند باید به دیجیتال تبدیل شوند. بنابراین از یک برد داده‌برداری در حین انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. در نهایت پس از اخذ و ثبت داده‌ها در رایانه، اقدام به استخراج کمیت‌های عملکردی ورودی شده است.

۳. نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای عملکردی ورودی

برای محاسبه و ارزیابی عملکرد ورودی از پارامترهایی نظیر بازیافت فشار کل، نسبت دبی جرمی، اعوجاج جریان و نسبت دبی جرمی مجرای مکش استفاده شده است که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها در ادامه بیان خواهد شد. بازیافت فشار کل که به صورت نسبت فشار کل در انتهای ورودی به فشار کل جریان آزاد تعریف می‌شود با TPR نشان داده شده و با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود. فشار کل در انتهای ورودی به روش میانگین وزنی سطح با استفاده از داده‌های ریک اصلی بدست می‌آید.

$$TPR = \frac{(P_t)_e}{(P_t)_\infty} \quad (1)$$

نسبت دبی جرمی ورودی پارامتر دیگری برای ارزیابی عملکرد ورودی بوده و عبارت است از نسبت دبی جرمی واقعی ورودی به بیشترین دبی جرمی که ورودی می‌تواند داشته باشد. این کمیت با MFR نشان داده شده و به کمک داده‌های ریک اصلی با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$MFR = \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_c} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا \dot{m}_c بیانگر دبی جرمی لوله‌ی جریانی است که بدون تغییر مساحت و با قطری برابر با قطر لبه‌ی پوسته به دهانه‌ی ورودی برسد.

اعوجاج جریان بیانگر میزان غیریکنواختی جریان در انتهای ورودی است. این کمیت با FD نشان داده شده و به کمک داده‌های ریک اصلی با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

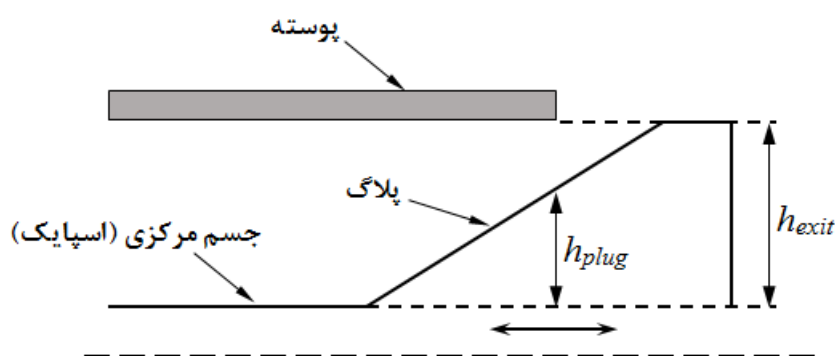
$$FD = \frac{(P_t)_{\max} - (P_t)_{\min}}{(P_t)_{\text{avg}}} \quad (3)$$

چهارمین پارامتر بررسی شده در این پژوهش نسبت دبی جرمی مجرای مکش است که به صورت نسبت دبی جرمی مجرای مکش به دبی جرمی واقعی ورودی تعریف می‌شود. این کمیت با BMFR نشان داده شده و با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

$$BMFR = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_\infty} \quad (4)$$

کمیت دیگری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته و با EBR نشان داده شده است، نسبت انسداد خروجی مدل است که بیانگر میزان گرفتگی مساحت خروجی جریان در اثر حرکت رو به جلوی پلاگ است و با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه و بر حسب درصد بیان می‌شود. در این رابطه h_{plug} ارتفاع مسدود شده توسط پلاگ در صفحه‌ی خروجی و h_{exit} ارتفاع کل صفحه‌ی خروجی است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$EBR = \frac{h_{plug}}{h_{exit}} \times 100 \quad (5)$$



شکل ۵ - تعریف پارامترهای مرتبط با نسبت انسداد خروجی

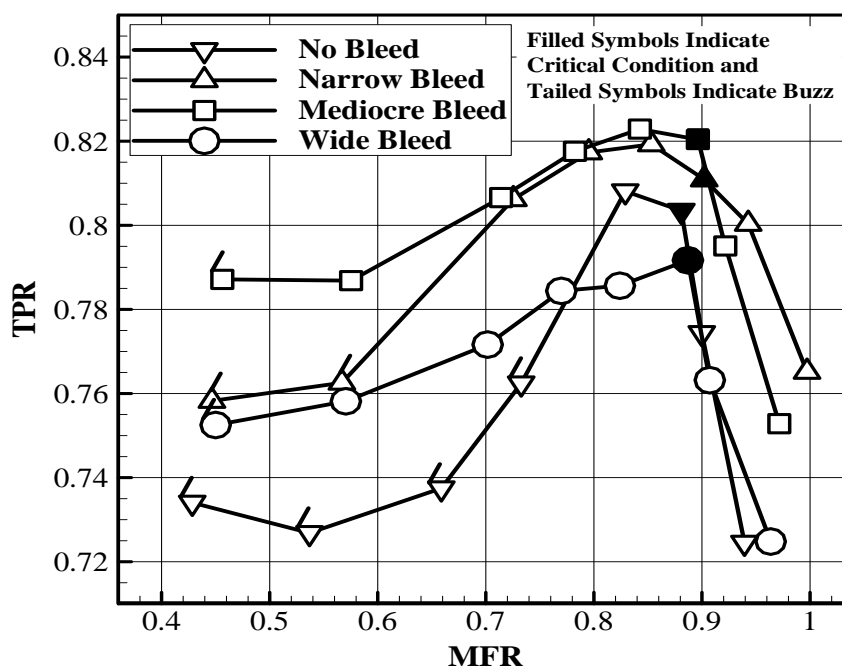
عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده و پارامترهای عملکردی ورودی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها از دو نوع سنسور فشار استفاده شده است در این جدول برای بیان عدم قطعیت داده‌های فشاری دو مقدار ذکر شده است.

جدول ۲- عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری [۱۳]

کمیت	عدم قطعیت (%)
$\Delta P/P$	۱/۴۲۱ و ۰/۹۲۹
$\Delta(TPR)/TPR$	۱/۴۲۱
$\Delta(MFR)/MFR$	۲/۴۱۸
$\Delta(FD)/FD$	۲/۴۶۱
$\Delta(BMFR)/BMFR$	۲/۰۴۴
$\Delta(M_\infty)/M_\infty$	۱/۱۶۲

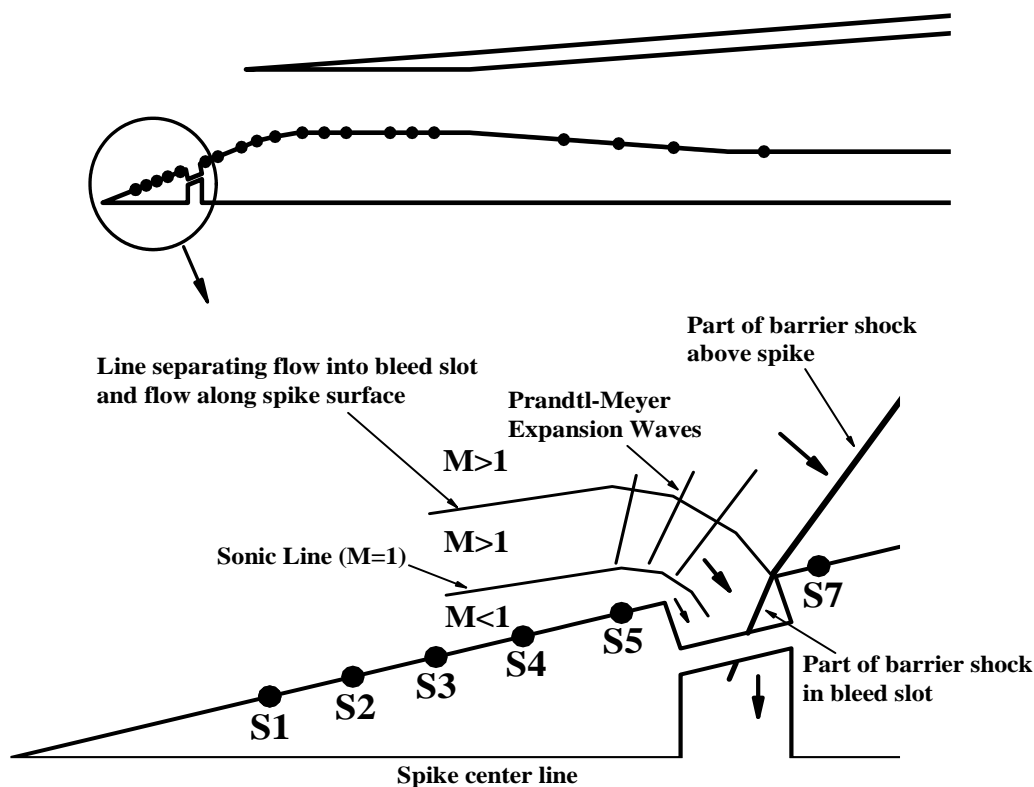
۴. نتایج

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود برای هر دماغه‌ی آزمایش‌شده شماره‌ای در نظر گرفته شده است. در اینجا برای سهولت هنگام اشاره به هر دماغه از شماره‌ی آن استفاده خواهد شد. نتایج دماغه‌های ۱، ۲ و ۳ که به ترتیب دهانه‌ی مجرای مکش در آن‌ها باریک، متوسط و بزرگ است به همراه نتایج دماغه‌ی بدون مکش در شکل‌ها نشان داده شده است. شکل ۶ منحنی عملکردی ورودی را برای هر یک از دماغه‌ها نشان می‌دهد.



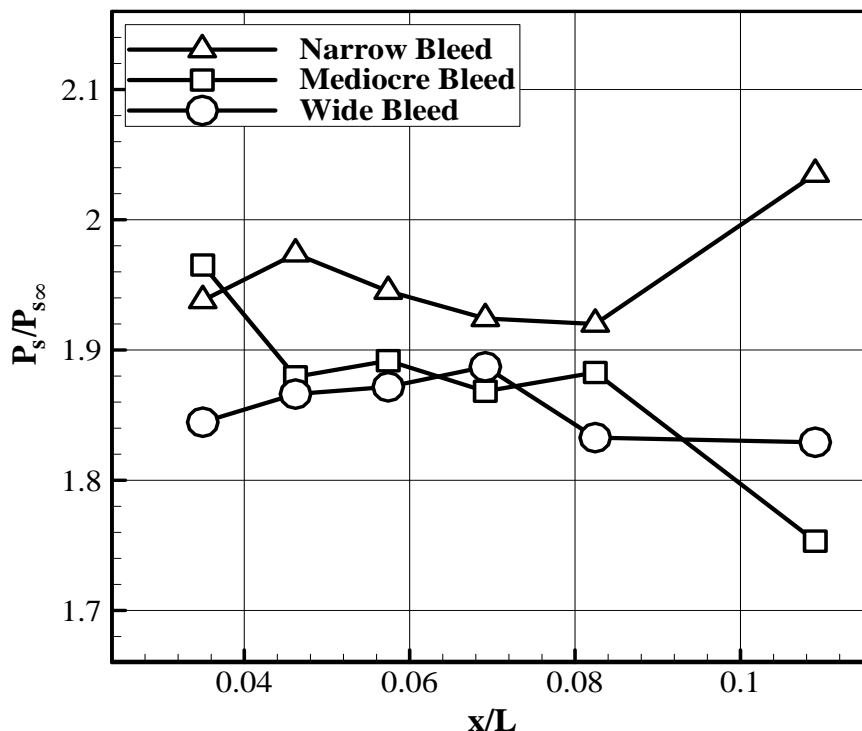
شکل ۶- منحنی عملکردی ورودی برای تمام دماغه‌های آزمایش‌شده

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از مجرای مکش باعث بهبود محسوس عملکرد ورودی و تأخیر در شروع باز شده است. در نسبت‌های انسداد پایین و در شرایط فرابحرانی موج ضربه‌ای نرمال در پایین‌دست گلوگاه قرار داشته و نسبتاً قوی است به همین دلیل و همچنین در اثر تداخل آن با لایه‌ی مرزی بازیافت فشار ورودی کاهش می‌یابد. شکل ۶ نشان می‌دهد که برای دماغه‌ی سه، بازیافت فشار کل و نسبت دبی جرمی در شرایط فرابحرانی نسبت به دماغه‌های یک و دو کمتر بوده و عملکرد آن در شرایط فرابحرانی تقریباً مشابه دماغه‌ی بدون مکش است. برای تشخیص علت این رفتار خصوصیات فیزیکی جریان در اطراف دهانه‌ی ورودی مجرای مکش و همچنین تغییرات فشار استاتیک در راستای مخروط اسپایک برای سنسورهای S1 تا S7 در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. در شکل ۸ محور افقی بیانگر فاصله‌ی محوری سنسورها تا نوک اسپایک بوده که با استفاده از طول کل ورودی (L) بی‌بعد شده است.



شکل ۷- خصوصیات فیزیکی جریان در اطراف دهانه‌ی مجرای مکش^۱ [۱۵]

^۱ اقتباس و بازسازی شده از مرجع [۱۵]

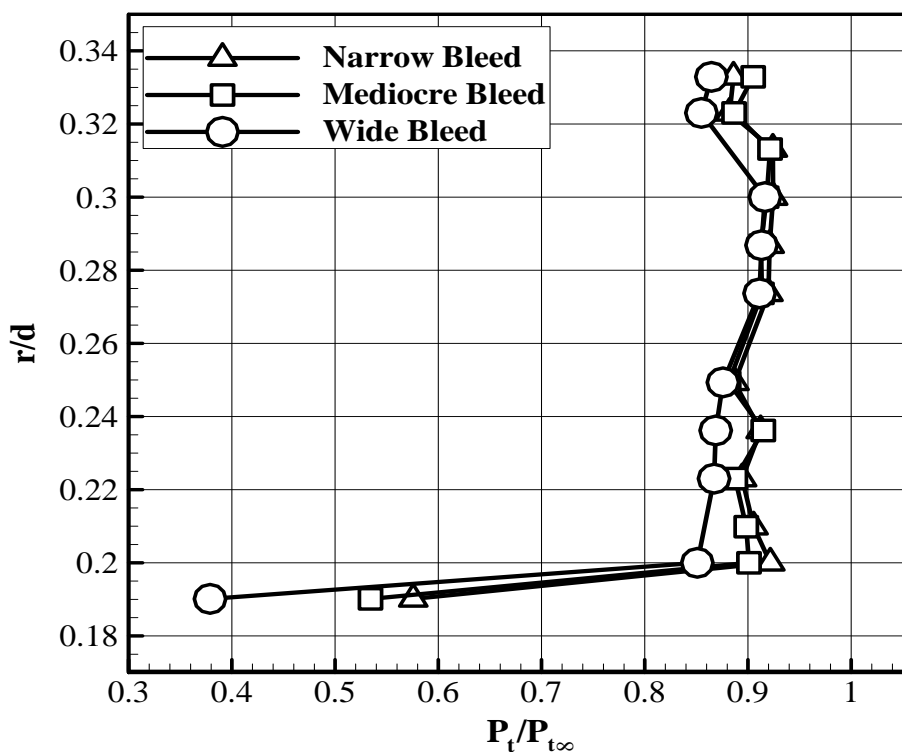


شکل ۸- تغییرات فشار استاتیک در امتداد دماغه‌ی اسپایک برای سنسورهای S1 تا S7 در شرایط فراهبرانی

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود یک موج ضربه‌ای مایل به نام موج ضربه‌ای جلوگیر شامل دو قسمت در نزدیکی لبه‌ی عقبی دهانه‌ی ورودی مجرای مکش تشکیل شده است. شی و همکاران [۱۵] نشان دادند که اگر فشار انتهایی مجرای مکش به اندازه‌ی کافی پایین باشد، در طی فرایند مکش و چرخش جریان به سمت دهانه‌ی مجرای مکش، یک موج ضربه‌ای مایل شامل دو قسمت نزدیک به لبه‌ی عقبی دهانه‌ی مجرای مکش تشکیل می‌شود که قسمت فوقانی آن در خارج از مجرای مکش و قسمت تحتانی آن در داخل مجرا قرار می‌گیرد. اگر قدرت این موج ضربه‌ای مایل به اندازه‌ی کافی زیاد باشد می‌تواند به عنوان یک موج ضربه‌ای جلوگیر و بازدارنده^۱ عمل کند و از انتشار اطلاعات پایین‌دست به بالادست جریان جلوگیری کند [۱۵]. در این پژوهش فشار انتهایی مجرای مکش اساساً همان فشار جریان آزاد بوده و داده‌های سنسورهای فشار بر روی دماغه‌ی اسپایک نشان می‌دهد که در اغلب حالات اختلاف فشار دهانه‌ی ورودی مجرای مکش با خروجی آن به اندازه‌ی کافی زیاد بوده و این موج ضربه‌ای جلوگیر همواره حضور دارد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برای دهانه‌ی مکش باریک، فشار جریان در پایین‌دست دهانه بیشتر از بالادست آن است که نشان‌دهنده‌ی افزایش قدرت موج ضربه‌ای جلوگیر و کاهش عدد ماخ جریان در پشت آن بوده که در نهایت موجب کاهش قدرت موج ضربه‌ای نرمال بعدی که سهم اصلی را در افت فشار کل دارد، می‌شود و در نتیجه بازیافت فشار ورودی افزایش می‌یابد. چرخش جریان فراصوتی به سمت دهانه‌ی مجرای مکش و در نتیجه افزایش سرعت و همین‌طور کاهش فشار آن خصوصاً برای لایه‌های بیرونی جریان ممکن است به حدی زیاد باشد که بخش راه نیافته به مجرای مکش پس از عبور از قسمت فوقانی موج ضربه‌ای جلوگیر دوباره نتواند به فشار اولیه‌ی خود و یا بیشتر از آن (همانند دماغه‌ی یک) دست یابد و فشار آن کمتر از فشار بالادست دهانه‌ی مکش باشد. همان‌گونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌کنید حالت مذکور برای دماغه‌ی دو اتفاق افتاده است. اما توجه داشته باشید که این حالت لزوماً نامطلوب نبوده بلکه می‌تواند حتی موجب بهبود کیفیت جریان در پایین-

¹ Barrier Shock

دست دهانه‌ی ورودی مجرای مکش شود. گرادیان فشار ایجادشده بوسیله‌ی حضور موج ضربه‌ای جلوگیری موجب جدایش جریان نمی‌شود. زیرا فقط جریان فراصوتی از طریق قسمت فوقانی موج ضربه‌ای جلوگیری عبور می‌کند و دیگر قسمت فراصوتی جریان وجود ندارد. در مورد دماغه‌ی دو باید گفت که سرعت زیاد جریان در پشت موج ضربه‌ای جلوگیری در مقایسه با سرعت آن قبل از رسیدن به دهانه‌ی مجرای مکش، اولاً می‌تواند با زیاد کردن مومنتوم سیال در نزدیکی دیواره موجب افزایش مقاومت لایه‌ی مرزی بدون وقوع جدایش در برابر گرادیان‌های فشار معکوس شدیدتری شود و ثانیاً می‌تواند نایکنواختی‌ها در پروفیل لایه‌ی مرزی و اعوجاج جریان در پایین‌دست را کنترل کند. برای این منظور پروفیل فشار کل در قسمت گلوگاه برای هر سه دماغه رسم شده و در شکل ۹ نشان داده شده است. در اینجا محور عمودی بیانگر فاصله‌ی شعاعی سنسورها تا محور مرکزی ورودی بوده که با استفاده از قطر انتهایی ورودی (d) بی‌بعد شده است.



شکل ۹- تغییرات فشار کل در قسمت گلوگاه در شرایط فرا بحرانی برای تمام دماغه‌های دارای مکش

همان‌گونه که مشاهده می‌شود فشار کل در گلوگاه برای دماغه‌های یک و دو بیشتر از دماغه‌ی سه است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که تغییرات فشار کل برای دماغه‌ی سه نسبت به دماغه‌ی یک و دو بیشتر بوده و اعوجاج جریان در حدود ۷۰ درصد است. حال آنکه این مقدار برای دماغه‌های یک و دو به ترتیب برابر با ۴۰ و ۴۴ درصد است. بالا بودن فشار کل و یکنواختی جریان در قسمت گلوگاه برای دماغه‌های یک و دو موجب شده که در نهایت بازیافت فشار کل انتهایی ورودی در شرایط فرا بحرانی وضعیت بهتری داشته باشد. برای دماغه‌ی سوم، همان‌گونه که شکل ۸ نشان می‌دهد فشار جریان در پایین‌دست دهانه‌ی مجرای مکش تقریباً برابر با مقدار آن در بالادست است. بنابراین برای این دماغه، فرایند مکش نمی‌تواند نقش مؤثری در بهبود بازیافت فشار داشته باشد و عملکرد آن تقریباً مشابه دماغه‌ی بدون مکش است.

با افزایش بیشتر نسبت انسداد خروجی، موج ضربه‌ای نرمال در گلوگاه ورودی قرار می‌گیرد و حالت بحرانی حاصل می‌شود. شکل ۶ نشان می‌دهد که حالت بحرانی برای تمام دماغه‌ها در نسبت انسداد $62/5$ درصد اتفاق افتاده است. دماغه-ی دوم بیشترین بازیافت فشار را در حالت بحرانی در مقایسه با سایر دماغه‌ها دارد. بازیافت فشار برای دماغه‌ی سوم حتی نسبت به دماغه‌ی بدون مکش نیز کمتر است و عملکرد آن تا زمانی که دماغه‌ی بدون مکش وارد شرایط باز نشده، ضعیف‌تر از آن است. بیشینه‌ی بازیافت فشار برای دماغه‌های یک و دو و همچنین دماغه‌ی بدون مکش در نسبت انسداد 65 درصد حاصل شده است. در حالت عادی و طبق نمودار عملکردی ورودی فراصوتی انتظار می‌رود که بیش‌ترین بازیافت فشار در حالت بحرانی حاصل شود ولی در تمام دماغه‌های مذکور بازیافت فشار بعد از شرایط بحرانی ابتدا افزایش یافته و به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده و سپس کاهش یافته است. برای تشخیص علت این رفتار از تصاویر سایه‌نگاری استفاده می‌شود. برای نمونه تصاویر مربوط به دماغه‌ی یک در نسبت‌های انسداد $62/5$ ، 65 و $67/5$ درصد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. توجه شود که زمان ثبت برای هر سه تصویر یکسان است.

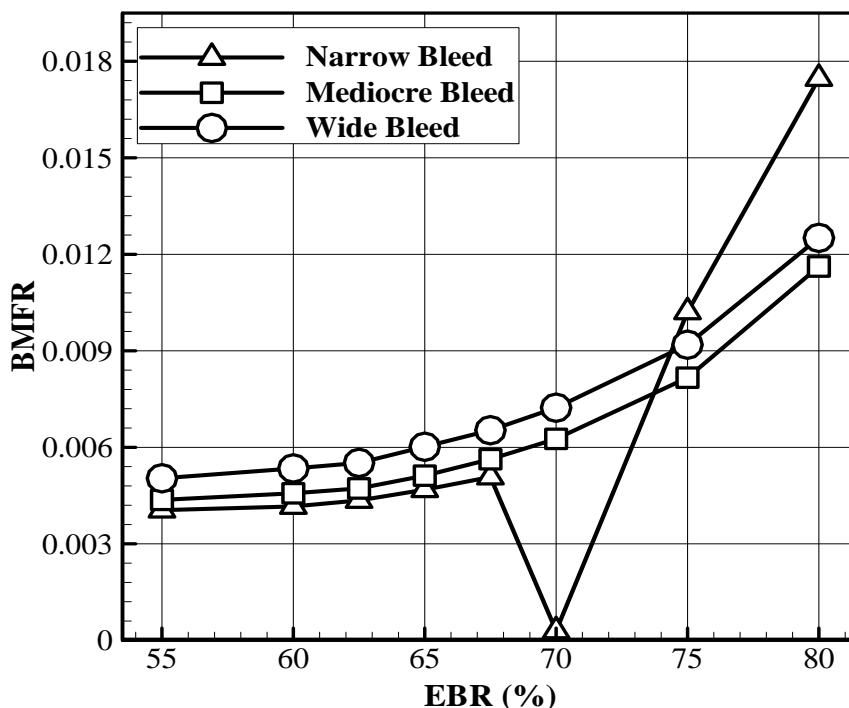


شکل ۱۰- تصاویر سایه‌نگاری برای دماغه‌ی یک در سه نسبت انسداد مختلف

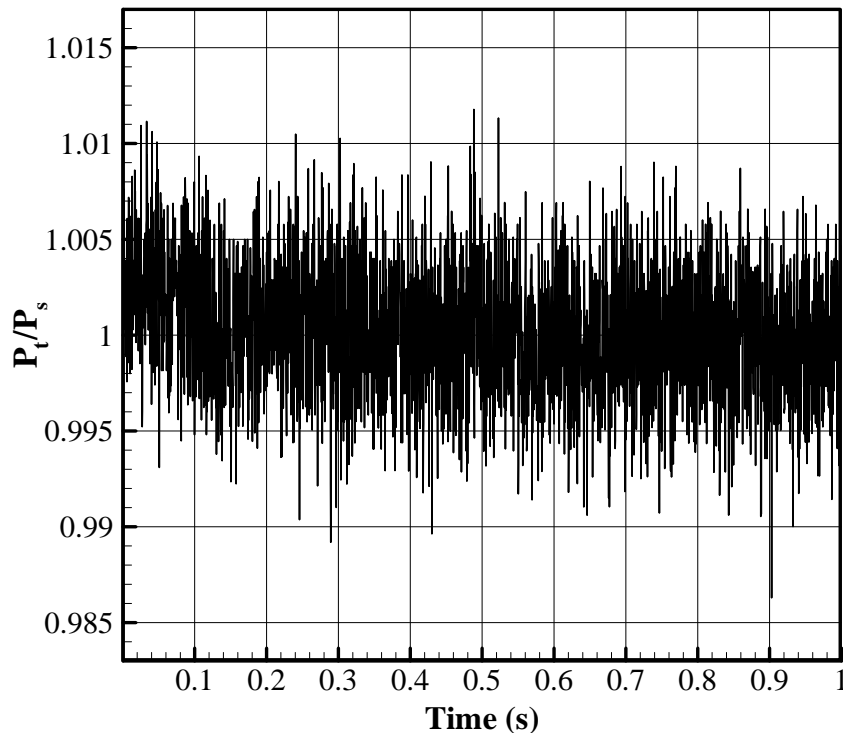
همان‌گونه که مشاهده می‌شود در نسبت انسداد $62/5$ درصد ارتفاع موج ضربه‌ای مایل دوم به اندازه‌ای است که نقطه‌ی برخورد آن با موج ضربه‌ای نرمال تقریباً در میانه‌ی دهانه‌ی ورودی قرار می‌گیرد. اما فاصله‌ی عمودی نقطه‌ی برخورد موج ضربه‌ای جلوگیر به موج ضربه‌ای نرمال بیشتر بوده و تقریباً نزدیک به لبه‌ی پوسته است. در اینجا برای بیان مکانیزمی که باعث کاهش سرعت جریان قبل از رسیدن به موج ضربه‌ای نرمال می‌شود، جریان عبوری از روی سطح اسپایک در دو قسمت در نظر گرفته می‌شود. قسمت بالایی جریان قبل از رسیدن به موج ضربه‌ای نرمال از موج ضربه‌ای جلوگیر عبور کرده و سرعتش کاهش یافته و قسمت پایینی علاوه بر عبور از موج ضربه‌ای جلوگیر از موج ضربه‌ای مایل دوم نیز عبور می‌کند که این خود کاهش بیشتری را در سرعت جریان به همراه دارد. در نتیجه حضور موج ضربه‌ای جلوگیر و همچنین موج ضربه‌ای مایل دوم انرژی جنبشی جریان را گرفته و موجب کاهش قدرت موج ضربه‌ای نرمال هنگام نزدیک شدن جریان به دهانه‌ی ورودی شده که در نهایت موجب بهبود بازیافت فشار ورودی می‌شود. در تصویر مربوط به نسبت انسداد 65 درصد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود با حرکت موج ضربه‌ای نرمال به سمت بالادست و افزایش فاصله‌ی آن تا دهانه‌ی ورودی، این موج ضربه‌ای قوی‌تر شده و موجب افزایش بیشتر ضخامت لایه‌ی مرزی می‌شود و همچنین باعث می‌شود که موج ضربه‌ای مایل دوم نیز قوی‌تر شود. در این حالت نقطه‌ی برخورد موج ضربه‌ای جلوگیر و موج ضربه‌ای مایل دوم به موج ضربه‌ای نرمال تقریباً یکسان بوده و فاصله‌ی عمودی آن تا سطح اسپایک به اندازه‌ای است که بیشتر جریانی که در حال رسیدن به دهانه‌ی ورودی است قبل از عبور از موج ضربه‌ای نرمال، از موج ضربه‌ای جلوگیر و موج ضربه‌ای مایل دوم عبور می‌کند. بنابراین بخشی از سرعت خود را در حین عبور از موج ضربه‌ای جلوگیر و بخشی دیگر را پس از عبور از موج ضربه‌ای مایل دوم از دست می‌دهد و هنگامی که به موج ضربه‌ای نرمال می‌رسد سرعت کمتری دارد. در این حالت کاهش سرعت جریان موجب می‌شود که فشار کل جریان پس از عبور از موج ضربه‌ای نرمال نسبت به حالت قبل (نسبت انسداد

۶۲/۵ درصد) افت کمتری داشته و در نتیجه باعث افزایش بازیافت فشار ورودی شود. در تصویر مربوط به نسبت انسداد ۶۷/۵ درصد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود به دلیل افزایش پس‌فشار ورودی، حرکت موج ضربه‌ای نرمال به سمت بالادست و برخورد آن با لایه‌ی مرزی موجب می‌شود که رشد لایه‌ی مرزی زودتر آغاز شده و موج ضربه‌ای مایل دوم نیز جلوتر تشکیل شود. کم‌شدن فاصله‌ی بین این موج ضربه‌ای و لبه‌ی عقبی دهانه‌ی مجرای مکش موجب برخورد آن با قسمت فوقانی موج ضربه‌ای جلوگیری می‌شود. بنابراین فقط خطوط جریانی که به سطح اسپایک نزدیک‌تر هستند می‌توانند قبل از رسیدن به موج ضربه‌ای نرمال از موج ضربه‌ای جلوگیری و موج ضربه‌ای مایل دوم عبور کنند و بخش اعظم جریان قبل از رسیدن به موج ضربه‌ای نرمال فقط از موج ضربه‌ای مایل دوم عبور می‌کند. بنابراین جریان هنگام رسیدن به موج ضربه‌ای نرمال سرعت بیشتری دارد و همین امر موجب افت فشار کل جریان پس از عبور از موج ضربه‌ای نرمال شده و در نتیجه در مقایسه با حالت قبل باعث کاهش بازیافت فشار ورودی می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که فاصله‌ی عمودی نقاط برخورد موج ضربه‌ای جلوگیری و موج ضربه‌ای مایل دوم به موج ضربه‌ای نرمال نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان قدرت موج ضربه‌ای نرمال و بازیافت فشار کل ورودی در شرایط فروبحرانی دارد.

شکل ۱۱ تغییرات نسبت دبی جرمی مجرای مکش بر حسب نسبت انسداد خروجی را برای هر سه دماغه‌ی دارای مکش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا نسبت انسداد ۷۰ درصد، بزرگترین دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بیشترین دبی جرمی و کوچکترین دهانه کمترین دبی جرمی را دارد. اما در نسبت انسداد ۷۰ درصد، دبی جرمی مجرای مکش با دهانه‌ی ورودی باریک افت زیادی پیدا می‌کند. برای تشخیص علت این رفتار، تغییرات نسبت فشار کل به فشار استاتیک در انتهای مجرای مکش بر حسب زمان برای نسبت انسداد ۷۰ درصد در شکل ۱۲ رسم شده است.



شکل ۱۱- تغییرات نسبت دبی جرمی مجرای مکش بر حسب نسبت انسداد خروجی

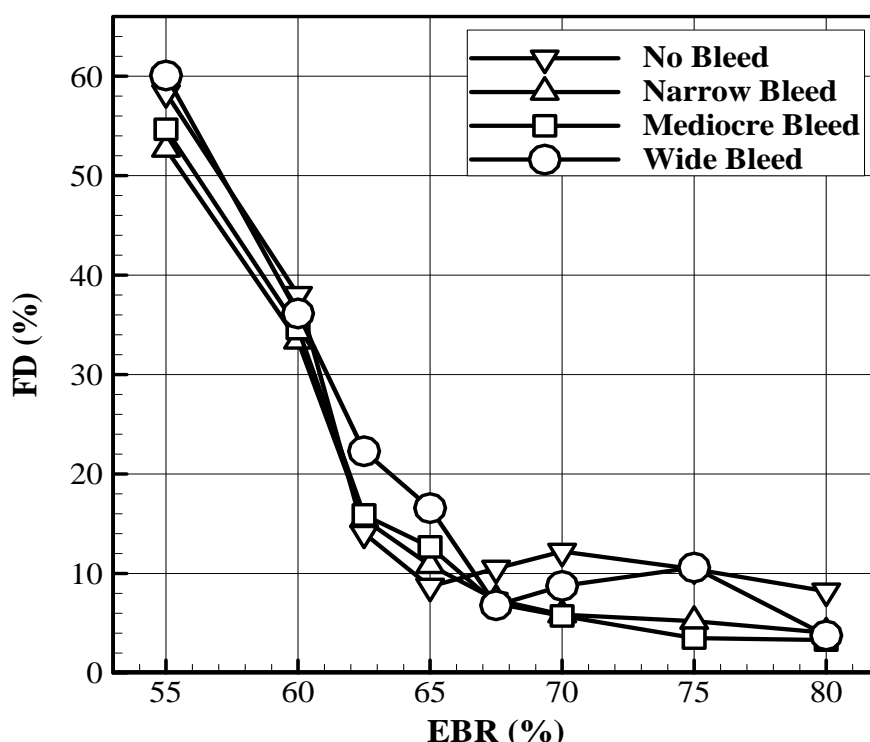


شکل ۱۲- تغییرات نسبت فشار کل به فشار استاتیک در انتهای کانال مجرای مکش برای دماغه‌ی یک در نسبت انسداد ۷۰ درصد و در یک بازه‌ی زمانی مشخص

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود نسبت فشار در موارد بسیاری در زیر یک قرار دارد و بدان معناست که فشار کل جریان از فشار استاتیک در محل قرارگیری سنسورها (نزدیک به خروجی مجرای مکش) کمتر شده است که می‌تواند به دلیل جدایش جریان و برگشت جریان به سمت بالادست باشد. با توجه به اینکه سنسور فشار کل درست در وسط سطح مقطع کانال مکش قرار گرفته است، ناحیه‌ی جدایش می‌تواند بسیار بزرگ بوده و حداقل نیمی از سطح مقطع را در بر گرفته باشد که این خود موجب مسدود شدن مسیر حرکت جریان به طرز قابل ملاحظه‌ای می‌شود. عدد ماخ متوسط در این موقعیت در حدود ۰/۱۳ بوده که نشان‌دهنده‌ی افت زیاد دبی جرمی مجرای مکش است. این ناحیه‌ی جدایش خود ممکن است به دلیل وجود نواحی جدایش دیگری بوجود آمده باشد که در بالادست‌تر از خود قرار دارند. در مرجع [۱۶] نیز نشان داده شده است که وجود یک ناحیه‌ی جدایش بر روی یکی از دیواره‌های داخلی مجرای مکش باعث محدود شدن مسیر جریان بین این ناحیه‌ی جدایش و دیواره‌ی داخلی مقابل می‌شود. در نتیجه مسیر جریان ممکن است به گونه‌ای باشد که گویا جریان در حال عبور از یک دیفیوزر است. همین خود باعث ایجاد گرادیان فشار معکوس در جهت جریان عبوری شده که می‌تواند جدایش‌های بعدی را در جریان داخلی مجرای مکش حتی در نزدیکی خروجی آن به همراه داشته باشد. در شرایط فروبحرانی و نسبت انسداد ۷۵ درصد، دهانه‌ی باریک‌ترین دبی جرمی را نسبت به دو دهانه‌ی دیگر دارد که علت آن نوسان امواج ضربه‌ای و وقوع پدیده‌ی باز برای این دهانه است. در نسبت انسداد ۸۰ درصد، هر سه دهانه در شرایط باز قرار دارند و دبی جرمی آن‌ها نسبت به قبل افزایش پیدا کرده است. اما این افزایش برای دهانه‌ی باریک‌تر است که می‌تواند به دلیل بزرگ‌تر شدن دامنه‌ی نوسانات در حین پدیده‌ی باز برای این دهانه باشد.

اعوجاج جریان بیان‌کننده‌ی میزان غیریکنواختی جریان در انتهای ورودی است که تغییرات آن با نسبت انسداد خروجی برای تمام دماغه‌های آزمایش‌شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق این شکل در شرایط فرابحرانی اعوجاج

جریان برای تمام دماغه‌ها مقدار بالایی دارد و با زیاد شدن نسبت انسداد خروجی مقدار آن کاهش می‌یابد. شدت تغییرات در شرایط فروبحرانی بسیار کمتر از شرایط فرابحرانی است. زیرا برخلاف شرایط فرابحرانی که موج ضربه‌ای نرمال در پایین- دست گلوگاه قرار داشته و تداخلات آن با لایه‌ی مرزی شدید است، در شرایط فروبحرانی موج ضربه‌ای نرمال در بیرون از دهانه‌ی ورودی و در نزدیکی دهانه‌ی ورودی مجرای مکش است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد در این شرایط، مکش جریان نقش مؤثرتری در کنترل و از بین بردن ناحیه‌ی جدایش و بهبود بازیافت فشار کل و در نتیجه کاهش اعوجاج جریان ورودی دارد.



شکل ۱۳- تغییرات اعوجاج جریان در انتهای ورودی بر حسب نسبت انسداد خروجی

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش بر روی عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی با هندسه‌ی متقارن محوری در عدد ماخ ۲ و زاویه‌ی حمله‌ی صفر درجه به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های تونل باد نشان داد که با افزایش مساحت دهانه‌ی ورودی مجرای مکش تا یک محدوده‌ی خاص، می‌توان بازیافت فشار در شرایط بحرانی و فروبحرانی را بهبود بخشید و اگر افزایش مساحت دهانه همچنان ادامه یابد موجب بالا رفتن دبی جرمی مجرای مکش و کاهش بازیافت فشار ورودی در تمام شرایط عملکردی آن می‌شود. استفاده از دهانه‌ی باریک برای مجرای مکش، دبی جرمی آن را پایین آورده اما شروع پدیده‌ی باز را جلو می‌اندازد. دهانه‌ی متوسط نسبت به دهانه‌ی باریک دبی جرمی بالاتری دارد اما بازیافت فشار بیشتر آن در شرایط بحرانی و فروبحرانی و همچنین به تعویق افتادن پدیده‌ی باز، آن را از نظر عملکردی بهتر از دهانه‌ی باریک قرار می‌دهد. قوی‌تر شدن موج ضربه‌ای جلوگیر

برای دهانه‌ی باریک و افزایش عدد ماخ جریان در پایین دست محل ایجاد مکش برای دهانه‌ی متوسط که هر دو به دلیل فرایند مکش جریان حاصل شده است، به عنوان مکانیزم‌هایی برای بهبود بازیافت فشار ورودی بیان شدند. نتایج همچنین نشان داد که در صورت استفاده از دهانه‌ی بزرگ برای مجرای مکش، اثربخشی آن در کنترل لایه‌ی مرزی و بهبود پارامترهای عملکردی ورودی در شرایط بحرانی و فرابحرانی بسیار کم بوده و خصوصا در شرایط فرابحرانی عملکرد ورودی تقریبا مشابه حالت بدون مکش است.

۶. مراجع

1. Seddon, J. and Goldsmith, E. L. (1985), "Intake Aerodynamics," Collins Professional and Technical Books, London, Chaps. 1, 8, 15.
2. Obery, L. J. and Cubbison, R. W. (1954), "Effectiveness of Boundary Layer Removal near Throat of Ramp-Type Side Inlet at Free-Stream Mach Number of 2.0," NACA RM-E54I14.
3. Obery, L. J. and Schueller, C. F. (1956), "Effects of Internal Boundary-Layer Control on the Performance Supersonic Aft Inlets," NACA RM-E55L17.
4. Shaw, R. J., Wasserbauer, J. F. and Neumann, H. E. (1976), "Boundary-Layer Bleed System Study for a Full-Scale, Mixed-Compression Inlet With 45 Percent Internal Contraction," NASA TM-X-3358.
5. Sanders, B. W. and Cubbison, R. W. (1968), "Effect of Bleed-System Back Pressure and Porous Area on the Performance of an Axisymmetric Mixed Compression Inlet at Mach 2.5," NASA TM-X-1710.
6. Cubbison, R. W., Meleason, E. T. and Johnson, D. F. (1968), "Effect of Porous Bleed in a High-Performance Axisymmetric, Mixed-Compression Inlet at Mach 2.50," NASA TM-X-1692.
7. Trimpi, R. L. and Cohen, N. B. (1955), "Effect of Several Modifications to Center Body and Cowling on Sub-Critical Performance of a Supersonic Inlet at Mach Number of 2.02," NACA RM-L55C16.
8. Kowalski, K. and Piercy, T. G. (1956), "Stability of Supersonic Inlets at Mach 1.91 with Air Injection and Suction," NACA RM-E56D12.
9. Herrmann, D. and Triesch, K. (2006), "Experimental Investigation of Isolated Inlets for High Agile Missiles," Aerospace Science and Technology, Vol. 10, No. 8, pp. 659-667.
10. Hirschen, C., Herrmann, D. and Gülhan, A. (2007), "Experimental Investigations of the Performance and Unsteady Behavior of a Supersonic Intake," Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 3, pp. 566-574.
11. Herrmann, D., Blem, S. and Gülhan, A. (2011), "Experimental Study of Boundary-Layer Bleed Impact on Ramjet Inlet Performance," Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 6, pp. 1186-1195.

12. Soltani, M. R., Sepahi Younsi, J. and Daliri, A. (2015), "Performance Investigation of a Supersonic Air Intake in the Presence of the Boundary-Layer Suction," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 229, No. 8, pp. 1495-1509.
13. Soltani, M. R., Sepahi-Younsi, J. and Farahani, M. (2015), "Effects of Boundary-Layer Bleed Parameters on Supersonic Intake Performance," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 3, pp. 826-836.
14. Soltani, M. R., Daliri, A., Sepahi-Younsi, J. and Farahani, M. (2016), "Effects of Bleed Position on Stability of a Supersonic Inlet," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, No. 5, pp. 1153-1166.
15. Shih, M. I-R., Rimlinger, M. J. and Chyu, W. J. (1993), "Three-Dimensional Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions with Bleed," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 10, pp. 1819-1826.
16. Hahn, T. O., Shih, M. I-R. and Chyu, W. J. (1993), "Numerical Study of Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions with Bleed," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 5, pp. 869-876