

بهبود عملکرد دهانه ورودی مافوق صوت خاص، با استفاده از میکرو رمپ و پخی بین دو قسمت واگرایی اسپایک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

محمود عدمی^۱، حمید سالاروند^۲، علیرضا محمدی کمال آبادی^۳

۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، adam@mut-es.ac.ir

۲- محقق دکتری، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

مطالعه حاضر بر اساس یک دهانه ورودی مافوق صوت رمجت، در شرایط ۲۶۱ کلوین، ۳۲ کیلوپاسکال و عدد ماخ ۲ طراحی شده است. دهانه ورودی بهینه شده اولیه به کمک دو روش ابتکاری الف) ایجاد انحنا (کرو) بین دو قسمت واگرایی اسپایک ب) استفاده از میکرورمپ بر روی مرحله اول واگرایی اسپایک، حاصل شده است. هندسه بهبود داده شده نهایی از طریق هندسه بهینه شده اولیه، به وسیله انحنا دادن بین دو زاویه ۲/۳ درجه و ۸ درجه به شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر، و استفاده از یک میکرورمپ با طول ۲ میلی متر در ارتفاع ۰/۰۸ میلی متر بر روی اسپایک، ایجاد شده است. در این حالت راندمان دهانه ورودی به میزان ۰/۲۶ درصد نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر، و نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۵ سانتی متر به میزان ۰/۸۱۴ درصد، و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۱/۳۷ درصد و نسبت به دهانه ورودی مرجع مورد نظر به میزان ۳/۶ درصد افزایش یافته است. همچنین نوسانات عدد ماخ و فشار استاتیک (اعوجاج جریان) نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک ۱۰ سانتی متر به میزان ۲/۱۵ درصد، و نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک ۵ سانتی متر، به میزان ۶/۶۵ درصد، و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۱۰/۷ درصد، و نسبت به دهانه ورودی مرجع مورد نظر به میزان ۲۳/۵۵ درصد کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: دهانه ورودی، بهبود دهانه ورودی، دهانه ورودی بهینه شده اولیه، دهانه ورودی بهینه شده نهایی.

Improving the performance of a specific ultrasonic inlet opening, using a micro-ramp and chamfering between the two parts of the spike divergence.

Mahmoud Adami¹, Hamid Salar-vand², Ali-reza Mohammadi Kamal Abadi³

1- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Malek-ashtar University of Technology, Iran.

2. Ph.D. Researcher, Faculty of Mechanical Engineering, Malek-ashtar University of Technology, Iran.

3- M.Sc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Malek-ashtar University of Technology, Iran.

Abstract

The present study was designed based on a ram-jet ultrasonic inlet, under conditions of 261 K, 32 kPa and Mach 2. The initially optimized inlet opening was improved using two innovative methods. Two auxiliary methods are a) curving between two parts of spike divergence b) using microramp on the first stage of spike divergence. The initial optimized geometry formed the final geometry by bending between the two divergence parts of the first spike stage and the second spike stage, that is, bending between two angles of 2.3° and 8° with a curvature radius of 10 cm. Now, the geometry with the radius of curvature of 10 cm was selected as the final geometry, and the inlet opening was simulated using a microramp with a length of 2 mm and a height of 0.08 mm on the spike. In this case, the efficiency of the inlet opening is 0.26% compared to the inlet opening with a curvature radius of 10 cm, and compared to the inlet opening with a curvature radius of 5 cm, it is 0.814%, and compared to the optimized inlet opening. It increased by 1.37 percent and 3.6 percent compared to the reference inlet opening. Also, the fluctuations of Mach number and static pressure (flow distortion) compared to the inlet opening with a radius of curvature between the two parts of the spike divergence of 10 cm by 2.15%, and compared to the inlet opening with a radius of curvature between the two parts of the spike divergence of 5 cm m by 6.65%, compared to the initial optimized inlet opening by 10.7%, and compared to the reference inlet opening by 23.55%.

Keywords: Input span, improved input span, initial optimized input span, final optimized input span.

۷

سال ۱۵- شماره ۱

پیاپی و تابستان ۱۴۰۵

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



۱. مقدمه

بر خلاف موتورهای راکتی که باید اکسید کننده را با خود حمل کنند، موتورهای هواتنفسی به واسطه استفاده از هوای محیط، کارایی بهتری در محیط‌های هوایی (جو) نسبت به موتورهای راکتی از نقطه نظر بُرد، وزن و مهم‌تر از همه هزینه هستند. موتورهای هوا-تنفسی که در سرعت‌های فراصوتی استفاده می‌شوند، به واسطه یک مکانیزمی باید سرعت جریان را برای جزء بعدی موتور (محفظه احتراق و کمپرسور) کاهش دهند. یکی از انواع این مکانیزم‌های کاهش سرعت، استفاده از یک جسم مرکزی خاص است، که با بیرون زدگی خود از دهانه ورودی به سبب ایجاد شوک، سرعت را کاهش می‌دهد. این وسیله همان رمجت همراه با اسپایک (Spike) متقارن محور است، که ایده اولیه آن توسط رنه لورین فرانسوی بیان شد. اما آن چیزی که این موتورها و تکنولوژی آن را حساس و پیچیده می‌کند روند کاهش سرعت همراه با کمترین جدایش جریان، افت فشار و اعوجاج جریان است. افزایش فشار استاتیک، وظیفه اصلی هر ورودی هوا است، که از طریق امواج ضربه‌ای و تغییرات ناحیه داخل ورودی به دست می‌آید. جریان پشت شوک یا شوک‌ها با یک مجرای واگرا به نام دیفیوزر مادون صوت مواجه می‌شود، که باعث کاهش بیشتر سرعت هوا و افزایش فشار استاتیکی برای جزء بعدی موتور می‌شود. عملکرد عالی یک دهانه ورودی به عنوان جزئی از یک وسیله نقلیه هوایی، وابسته به بازیابی فشار کل بالا، جریان قابل کنترل و یکنواخت، درگ کم، راه اندازی ساده، پایداری جریان، وزن کم و هزینه معقول است. که مسلماً ارضاء همه این شرایط غیر ممکن است و

باید به یک مصالحه‌ای در همه این پارامترها دست یافت.

مارتین [۱] در مطالعه روی دهانه ورودی رمجت مافوق صوت بیان داشت، که هندسه لبه منحنی بیرونی و بدنه مرکزی، باید به گونه‌ای انتخاب شود تا سطح مقطع، کمی همگرا در بخش بالادست مجرا ایجاد شود، این باعث انسداد جزئی می‌شود، که منجر به تشکیل یک شوک نرمال در گلوگاه خواهد شد. شی و همکاران [۲] به مطالعه دهانه ورودی مافوق صوت پرداخت، و یک سطح فشرده‌سازی خارجی مخروطی دوگانه با نیم‌زاویه مخروط اول ۲۵ درجه و نیم‌زاویه مخروط دوم ۳۵ درجه انتخاب کرد، این ترکیب به طور موثر مانع از حرکت موج ضربه‌ای نرمال به سمت بالادست گلوگاه شد. چن و همکاران [۳] در شبیه‌سازی عددی دهانه ورودی متقارن محور با لبه‌های مختلف کول دریافتند که با افزایش زاویه پوسته، شوک نرمال نزدیک به گلوگاه دهانه ورودی قرار می‌گیرد. داس و پراساد [۴] به مطالعه دهانه ورودی مافوق صوت با انحراف کول (پوسته) در عدد ماخ ۲/۲ پرداختند. آنها مشاهده کردند که میدان جریان در مجرای داخلی نزدیک گلوگاه، با افزایش زاویه انحراف کول بهبود می‌یابد، که موجب بهبود در بازیابی فشار خواهد شد. همچنین با افزایش زاویه انحراف کول، شوک بازتابی در داخل ورودی ضعیف شده، در نتیجه محل شروع حباب جداسازی روی سطح تراکمی به سمت پایین دست حرکت کرده، که قدرت و اندازه حباب جدایش کاهش می‌یابد. آنها بیان داشتند که محل موج ضربه منعکس شده از نوک کول روی سطح شیب‌دار با افزایش زاویه انحراف کول به سمت پایین دست حرکت می‌کند. و همچنین فشار روی سطح تراکمی (مخروط) نیز با



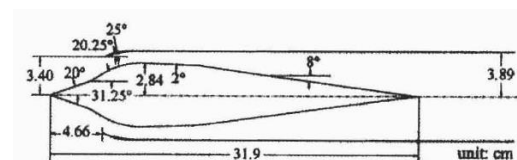
افزایش زاویه انحراف کول کاهش می‌یابد.

طراحی دهانه ورودی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی آن در نرم افزار انسیس فلونت صورت گرفت. صحت‌سنجی نتایج، شبیه‌سازی و مدل‌سازی دهانه ورودی، با نتایج موجود در مرجع [۵]، مقایسه و از تطابق قابل قبولی برخوردار بود. روند و چگونگی بهینه‌سازی دهانه ورودی و همچنین تاریخچه موضوع در مرجع [۶] به طور کامل بیان شده است.

در مطالعه حاضر به هدف اصلی که بهبود هندسی دهانه ورودی مافوق صوت رم‌جت با استفاده از میکرورمپ و پخی بین دو قسمت واگرایی اسپایک است، پرداخته شده است.

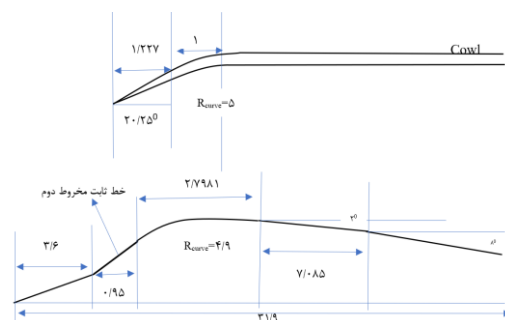
۲. مشخصات دهانه ورودی اولیه.

دهانه ورودی با توجه به شکل (۱) از مرجع [۵] اقتباس شده است.



شکل ۱- دهانه ورودی مورد مطالعه، اقتباس شده از مرجع [۵]

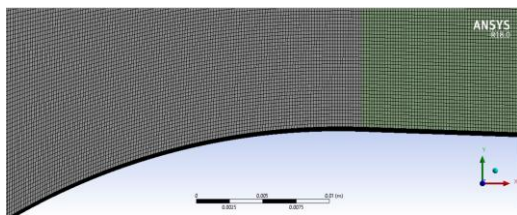
شکل (۲) ابعاد دقیق تر دهانه ورودی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ابعاد دهانه ورودی مورد مطالعه (ابعاد به سانتی‌متر است)

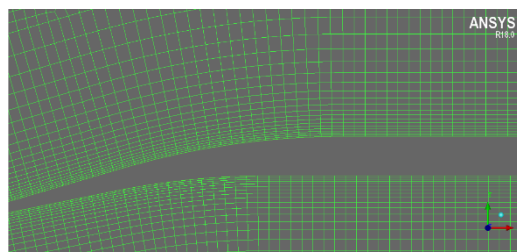
۳. شبیه سازی دهانه ورودی مورد مطالعه

اندازه شبکه لایه‌مرزی را 0.7 میلی‌متر، و اولین ارتفاع لایه‌مرزی از سطح جامد، برابر 0.1 میلی‌متر انتخاب شد. تعداد لایه‌های مرزی را برابر 20 گرفته و نسبت ارتفاع لایه‌مرزی، برابر $1/0.5$ در نظر گرفته شد. شکل ۳ شبکه‌بندی سازمان یافته همراه با لایه‌مرزی در قسمت انحنای اسپایک را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شبکه‌بندی سازمان یافته

شکل ۴ شبکه مش‌بندی لایه‌مرزی دیواره پوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۴- شبکه مش لایه‌مرزی دیواره کول

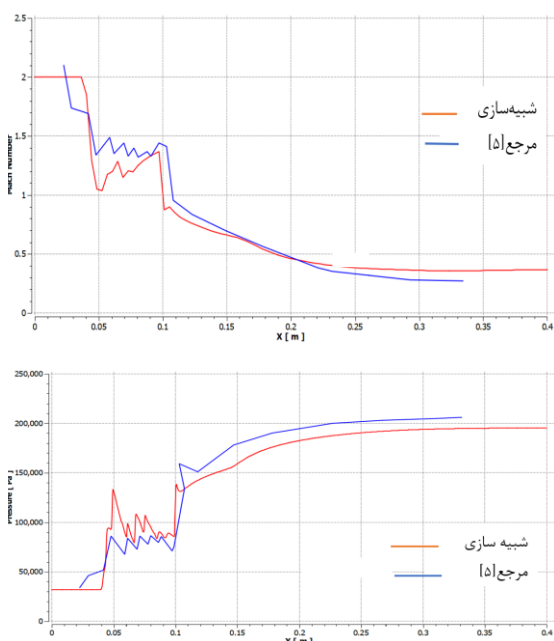
نسبت منطری شبکه مش برابر با $7/69$ و نسبت کجی شبکه مش برابر 0.36 است. علت نسبت منطری زیاد شبکه مش، مربوط به مش لایه‌مرزی می‌باشد. شرایط مرزی با توجه به فیزیک مسئله انتخاب می‌گردد. در مدل‌سازی این مجرای ورودی مافوق صوت از شرایط مرزی زیر که در شکل نشان داده شده است، استفاده گردید.

باید متذکر شد که طراحی دهانه ورودی در Design Modeler نرم افزار انسیس ورک بنچ، با مدل آشفتگی k- ϵ و شبکه بندی در ماژول Ansys Mesh انجام شده است.

۴. صحت نتایج شبیه سازی شده با نتایج موجود در مرجع [۵]

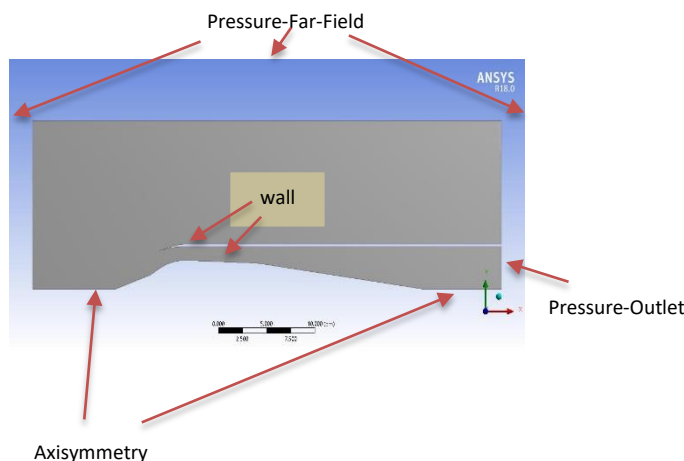
بعد از طراحی دهانه ورودی مرجع [۵]، و اجرا توسط نرم افزار انسیس فلوئنت، نتایج داده شده، با نتایج موجود در مرجع [۵] به صورت نمودار، مقایسه شدند.

شکل های ۶ تا ۸ نمودار مقایسه ای توزیع عدد ماخ خروجی و توزیع فشار استاتیک را برای دو شبیه سازی مرجع [۵] و شبیه سازی صورت گرفته نشان می دهد.



شکل ۶- نمودار مقایسه ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک برای دو شبیه سازی

اختلاف بین دو منحنی در شکل ۶ حدود ده درصد است که نتایج حاضر را قابل قبول می کند.



شکل ۵- شرایط مرزی به کار رفته در مدل سازی

با توجه به داده های مرجع [۵]، شرایط مرزی Pressure-Far-Field، دما ۲۶۱ کلوین، فشار ۳۲۰۰ پاسکال و عدد ماخ برابر ۲ انتخاب شدند. دیواره ها بدون انتقال حرارت و به صورت شار حرارتی صفر انتخاب شدند.

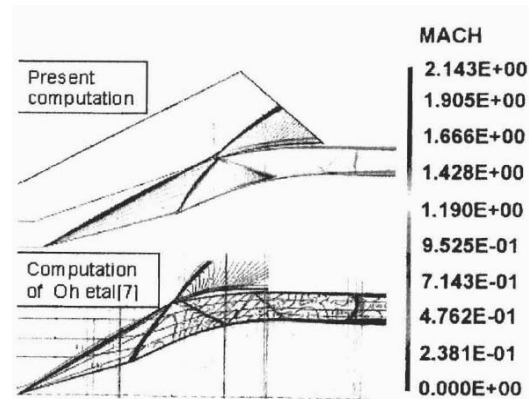
به منظور استقلال از شبکه مش، هندسه با تعداد مش های مختلف، مش زده شد، و پارامتر استقلال یابی عدد ماخ پشت هر شوک، به عنوان معرف راندمان و قدرت شوک، انتخاب شد. جدول ۱ نتایج استقلال از شبکه مش را نشان می دهد.

همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش تعداد مش، تغییرات بسیار جزئی است. از طرفی تعداد مش بالا، زمان حل را نیز افزایش می دهد. از همین رو، تعداد مش ۱۷۴۵۰۱ انتخاب شد، که در مراحل بعدی و شبیه سازی های بعدی از تعداد مش ۱۷۴۵۰۱ استفاده گردیده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از استقلال از شبکه

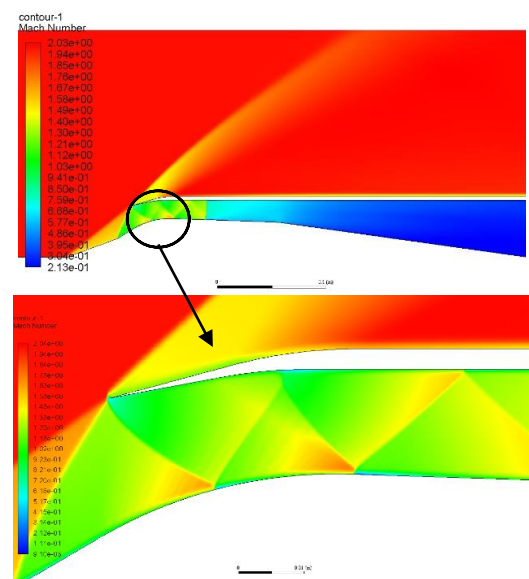
تعداد مش	عدد ماخ بعد از شوک اول	عدد ماخ بعد از شوک دوم	عدد ماخ بعد از شوک نرمال
۹۶۷۸۶	۱/۶۵	۱/۲۴	۰/۸۲۵
۱۷۴۵۰۱	۱/۶۴	۱/۲۳	۰/۸۳
۲۶۹۲۰۴	۱/۶۴	۱/۲۳	۰/۸۳
۵۲۰۱۷۳	۱/۶۴۷	۱/۲۳۲	۰/۸۲۹۵

این اختلاف عمدتاً ناشی از روش و مدل حل عددی بکار رفته و اندازه گذاریهای مربوطه می باشد. شکل ۷ شبیه سازی موجود در مرجع [۵] را نشان می دهد.



شکل ۷- شبیه سازی دهانه ورودی برگرفته از مرجع [۵]

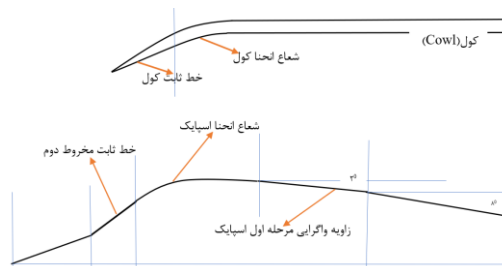
شکل ۸ شبیه سازی دهانه ورودی طراحی شده را نشان می دهد.



شکل ۸- شبیه سازی دهانه ورودی طراحی شده

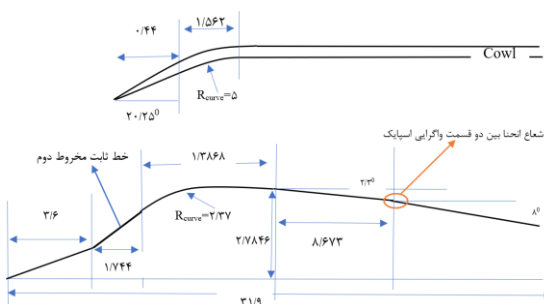
دهانه ورودی اقتباس شده از مرجع [۵] با توجه به پنج حوزه تغییرات هندسی مورد شبیه سازی قرار گرفت. روند بهینه سازی در مرجع [۶] بیان شده است.

شکل ۹ پارامترهای متغیر هندسی را نشان می دهد.



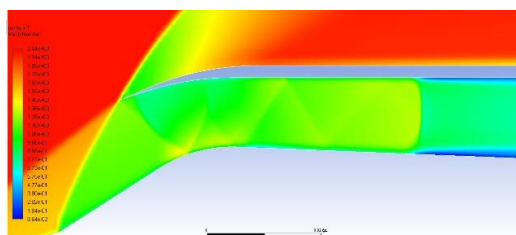
شکل ۹- پارامترهای متغیر بهینه سازی

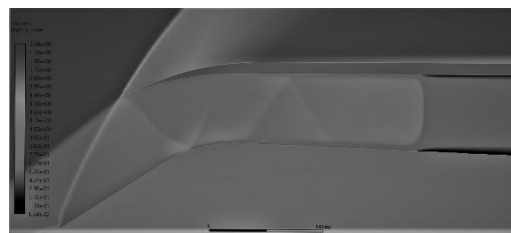
شکل ۱۰ ابعاد دقیق هندسه بهینه شده اولیه را نشان می دهد.



شکل ۱۰- ابعاد دقیق هندسه بهینه شده اولیه (ابعاد همگی به سانتی متر است)

در واقع شعاع انحنای (پخی) بین دو قسمت واگرایی اسپایک صفر است (جریان به یکباره از زاویه $2/3$ درجه به زاویه 8 درجه وارد می شود). شکل ۱۱ شبیه سازی هندسه بهینه شده اولیه را نشان می دهد.



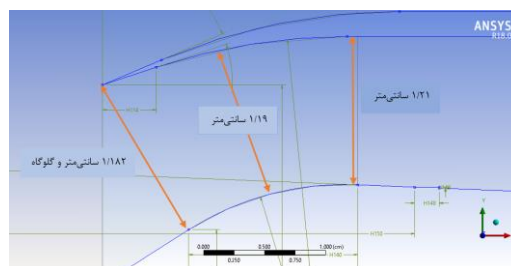


شکل ۱۱- شبیه سازی دهانه ورودی بهینه شده اولیه

در این حالت راندمان دهانه ورودی نسبت به حالت مرجع [۵] به میزان ۲/۲ درصد افزایش یافته است، و نوسانات جریان نسبت به دهانه ورودی مرجع [۵] به میزان ۱۴/۴ درصد کاهش یافته است. همان گونه که از شبیه سازی مشخص است، در اثر وجود شوک نرمال قوی در پایین دست گلوگاه، جدایش جریان نیز به شدت افزایش یافته است.

۵. بهبود هندسه بهینه شده اولیه به روش انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک

لازم به ذکر است که گلوگاه هندسه طراحی شده دهانه ورودی، با توجه به هندسه مرجع [۵] فاصله نوک پوسته تا ابتدای انحنا اسپایک انتخاب گردیده است. شکل ۱۲ محل گلوگاه را در هندسه دهانه ورودی نشان می دهد.



شکل ۱۲- محل گلوگاه در هندسه دهانه ورودی

با توجه به مطالعات قبلی و با دانستن این مسئله که اگر جریان به صورت تدریجی و آرام از روی سطحی عبور کند، آشفتگی جریانی کمتر خواهد بود. دو شعاع انحنا، برای پخ (کرو) کردن در قسمت واگرایی اسپایک انتخاب گردید. که

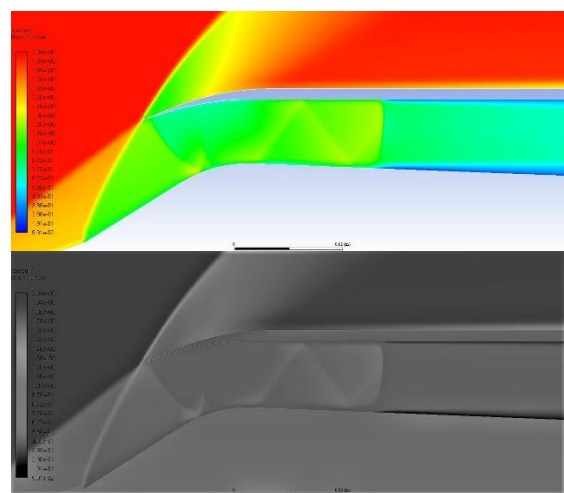
روند اجرای آن و نتایج آن در ادامه بیان خواهد شد. لازم به ذکر است که روش بهینه سازی به صورت هندسی و با چندین پارامتر متغیر (شعاع انحنا اسپایک، شعاع انحنا کول، زامیه واگرایی مرحله اول اسپایک و ...) و جهت دستیابی به سه تابع هدف (عدد ماخ انتهای دهانه ورودی (ابتدای محفظه احتراق)، راندمان کلی دهانه ورودی، و اعوجاج جریان) صورت پذیرفته است. محدوده تغییرات را صنعت مربوطه تعیین کرده است.

• شعاع انحنا ۵ سانتی متر

به منظور بهبود هندسه بهینه شده اولیه، با انحنای دادن بین دو قسمت واگرایی مرحله اول اسپایک با مرحله دوم اسپایک، یعنی در واقع انحنای دادن بین دو زاویه $2/3$ درجه و 8 درجه به شعاع انحنای 5 سانتی متر، راندمان دهانه ورودی به میزان $0/556$ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه، و به میزان $2/76$ درصد نسبت به دهانه ورودی مرجع [5] افزایش پیدا کرد. از آنجا که راندمان از ورودی تا قبل از محفظه احتراق را لحاظ می کند (دیفیوزر)، لذا در هر هندسه جدید افتهای ناشی از تغییرات فشار و عدد ماخ و بالطبع دما، چنین میزانی را تعیین می کند.

همچنین اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان $4/324$ درصد، و نسبت به دهانه ورودی مرجع [5] به میزان $18/1$ درصد کاهش یافته است.

شکل ۱۳ شبیه سازی هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی متر بین دو مرحله واگرایی اسپایک را نشان می دهد.



شکل ۱۳- هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی متر بین دو مرحله اسپایک

جدول ۲، درصد تغییرات توابع هدف دو هندسه قبلی را با هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی متر نشان می دهد.

جدول ۲. تغییرات توابع هدف دو هندسه مرجع [5] و هندسه بهینه شده اولیه با هندسه بهبود داده شده به شعاع انحنای 5 سانتی متر

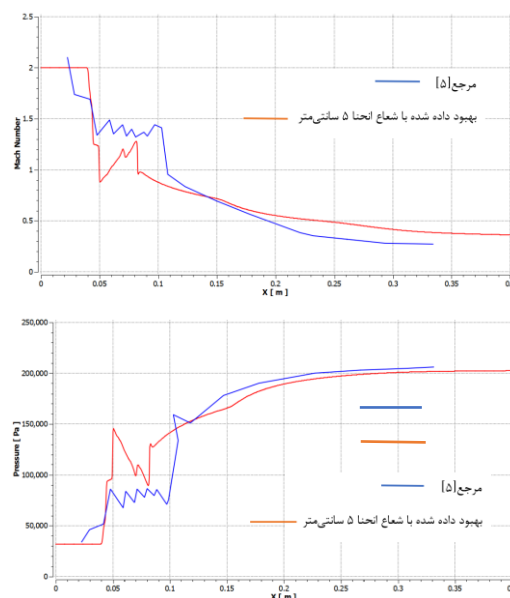
هندسه	توابع هدف		
	اعوجاج	راندمان	عدد ماخ انتهایی
هندسه مرجع [5]	$0/1486$	$0/8615$	$0/3726$
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی متر	$0/1217$	$0/8853$	$0/3568$
درصد تغییرات	$-18/1$	$2/76$	$-4/24$
هندسه بهینه شده اولیه	$0/1272$	$0/8804$	$0/3509$
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی متر	$0/1217$	$0/8853$	$0/3568$
درصد تغییرات	$-4/324$	$0/556$	$1/68$

کاهش اعوجاج جریان یعنی یکنواختی بیشتر جریان، پس هر چه این تابع کمتر باشد عملکرد بهتر دهانه ورودی را نشان می دهد. علت منفی شدن عدد ماخ این است که نرم افزار عدد ماخ کمینه (بر روی دیواره پوسته) و عدد ماخ بیشینه که در محور تقارن است را میانگین گیری می کند. به علاوه، شوک نرمال در دهانه ورودی مرجع [5] قوی تر است. در این حالت حباب جدایش جریان نیز بزرگتر خواهد بود، که این حباب جدایش سبب کاهش سطح مقطع جریان شده و روند کاهش عدد ماخ را کاهش می دهد. به همین دلیل عدد ماخ دهانه ورودی مرجع [5] بیشتر از دهانه ورودی بهبود داده شده است.

شکل ۱۴، نمودار مقایسه ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک هندسه ورودی قبل از



بهینه‌سازی (مرجع [۵])، با هندسه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنا ۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود عدد ماخ هندسه بهبود داده شده کمی بیشتر از عدد ماخ هندسه مرجع [۵] است.



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع

فشار استاتیک هندسه ورودی مرجع، با هندسه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنا ۵ سانتی‌متر

علت این کاهش در نوسانات شوک و اعوجاج جریان این است که جریان بعد از عبور از شوک نرمال، و وارد شدن جریان به دیفیوزر مادون صوت، جریان با یک تغییر آرام در سطح جامد روبه‌رو می‌شود، و جریان در فاصله‌ای بیشتر به تغییر در زاویه می‌پردازد، و عملاً به صورت ناگهانی از زاویه $2/3$ درجه به زاویه 8 درجه وارد نمی‌شود. انحنا دادن به دو قسمت واگرایی اسپایک، سبب شده است تا شوک نرمال کمی به جلو بیاید، و جلو آمدن شوک نرمال خود سبب افزایش راندمان دهانه ورودی خواهد شد، زیرا به منطقه گلوگاه نزدیک‌تر شده است. چرا که هر چه شوک نرمال به گلوگاه نزدیک شود، راندمان دهانه ورودی افزایش خواهد یافت. همچنین وجود پخی

به سبب ضعیف‌تر شدن شوک نرمال، باعث کاهش جدایش جریان نسبت به دهانه ورودی بدون پخی شده است.

همان گونه که از نمودار توزیع عدد ماخ مشخص است، شوک نرمال از محدوده $0/11$ طول دهانه ورودی به $0/08$ طول دهانه ورودی جلو آمد است. اما گلوگاه در فاصله $0/05$ طول دهانه ورودی است. علت کاهش عدد ماخ به زیر یک در $0/05$ طول دهانه ورودی این است که، هدف در طراحی دهانه ورودی این بود که شوک نرمال در گلوگاه قرار بگیرد، اما به دلیل ناقص بودن طراحی، یک شوک نرمال ناقصی در گلوگاه شکل گرفته که در یک لحظه عدد ماخ را به زیر یک کاهش داده است، و بعد از آن افزایش در عدد ماخ ملاحظه می‌شود، تا این که به شوک نرمال در محدوده $0/08$ طول دهانه ورودی ختم شده است.

• شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر

وقتی شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک به 10 سانتی‌متر افزایش داده شد، راندمان دهانه ورودی نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا 5 سانتی‌متر به میزان $56/0$ درصد، و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان $1/11$ درصد و نسبت به دهانه ورودی مرجع [۵] به میزان $3/33$ درصد افزایش یافت. اما با افزایش بیشتر شعاع انحنا، به 15 و 20 سانتی‌متر، شبیه‌سازی دهانه ورودی واگرا شد. حداکثر شعاع انحنا معادل 10 سانتی‌متر بود. همچنین اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک 5 سانتی‌متر به میزان $4/6$ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان $8/74$ درصد، و نسبت به دهانه

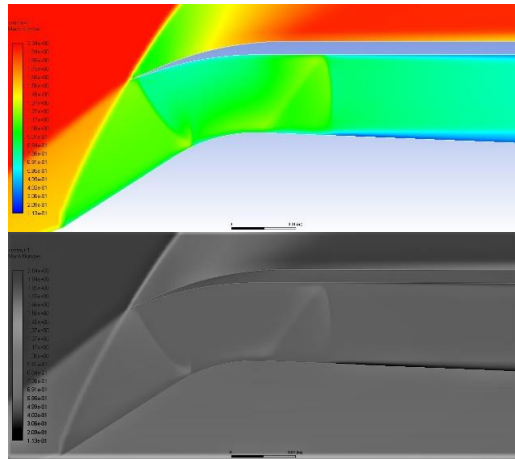
ورودی مرجع [۵] به میزان ۲۱/۹ درصد کاهش یافته است.

جدول ۳، درصد تغییرات توابع هدف هندسه‌های قبلی، با هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

جدول ۳ تغییرات توابع هدف هندسه‌های قبلی و هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر

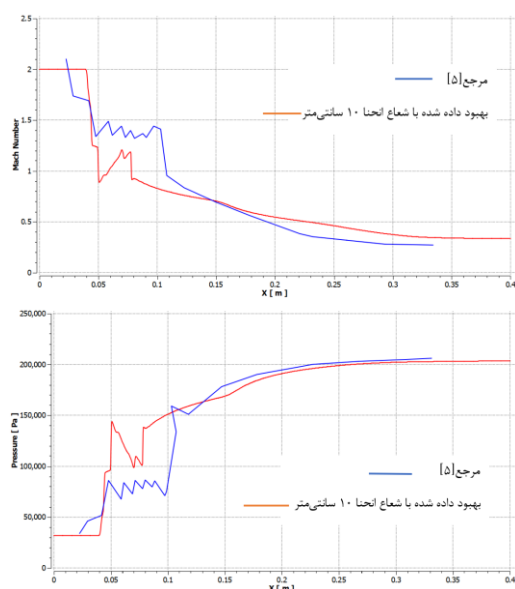
هندسه	توابع هدف		
	اعداد	راندمان	اعوجاج
	عدد ماخ انتهایی		
هندسه مرجع [۵]	۰/۳۷۲۶	۰/۸۶۱۵	۰/۱۴۸۶
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر	۰/۳۵۷	۰/۸۹۰۲	۰/۱۱۶۱
درصد تغییرات	-۴/۱۹	۳/۳۳	-۲۱/۹
هندسه بهینه شده اولیه	۰/۳۵۰۹	۰/۸۸۰۴	۰/۱۲۷۲
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر	۰/۳۵۷	۰/۸۹۰۲	۰/۱۱۶۱
درصد تغییرات	۱/۷۴	۱/۱۱	-۸/۷۴
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۵ سانتی‌متر	۰/۳۵۶۸	۰/۸۸۵۳	۰/۱۲۱۷
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر	۰/۳۵۷	۰/۸۹۰۲	۰/۱۱۶۱
درصد تغییرات	۰/۰۵۶	۰/۵۶	-۴/۶

شکل ۱۵ شبیه‌سازی هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر بین دو مرحله واگرایی اسپایک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر

شکل ۱۶ نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک هندسه ورودی قبل از بهینه‌سازی (مرجع [۵])، با هندسه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- گراف مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک هندسه ورودی مرجع، با هندسه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی‌متر



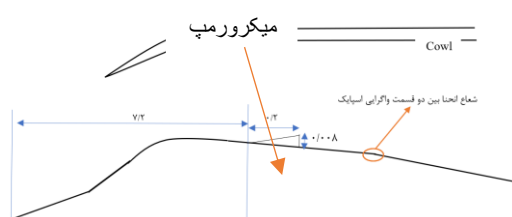
زمانی که ضخامت پوسته (کول) افزایش داده شد، راندمان دهانه ورودی کاهش یافت. دلیل این امر این بود که شوک برخوردی به نوک پوسته، قوی تر بازتاب پیدا می کرد، و سبب افت بازیابی فشار می شد. همچنین زمانی که زاویه پوسته کاهش داده شد، باز مشاهده شد که راندمان دهانه ورودی کاهش یافت، اما زمانی که زاویه پوسته افزایش داده شد، شوک بازتابی بیشتر به داخل دهانه ورودی رفت و این امر خود سبب کاهش جدایش جریان شد، که عملاً و در نهایت باعث افزایش راندمان دهانه ورودی خواهد شد.

۶. بهبود هندسه بهینه شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر، با استفاده از میکرو رمپ

با توجه به مراجع [۷] و [۸] که استفاده از میکرو رمپ را در بهبود لایه مرزی و کاهش اثر تداخل شوک-لایه مرزی نشان داده بودند. از این سیستم بر روی اسپایک استفاده شد. تا علاوه بر بهبود لایه مرزی، قدرت شوک نرمال را کاهش داده، و همچنین شوک نرمال به گلوگاه نزدیک شود. با توجه به ابعاد کلی دهانه ورودی می بایست که میکرو رمپ بسیار ریز باشد، به همین دلیل در ابتدا تقریبی ۳ درصد از رمپ اول (مخروط اول) دهانه ورودی به عنوان میکرو رمپ ابتدایی در نظر گرفته، و شبیه سازی صورت گرفت. بعد از شبیه سازی های مکرر، ابعاد میکرو رمپ نهایی به دست آمد، که در ادامه بیان می شود. هندسه با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر را به عنوان هندسه نهایی انتخاب کرده، و با استفاده از یک میکرو رمپ با طول ۲ میلی متر در ارتفاع ۰/۰۸ میلی متر بر روی اسپایک، به شبیه سازی دهانه ورودی پرداخت

شد. بعد از چندین شبیه سازی، مشخص شد که اگر میکرو رمپ در فاصله ۷/۲ سانتی متر از ابتدای نوک مخروط اول قرار داده شود، شوک نرمال در گلوگاه قرار می گیرد. در این حالت راندمان دهانه ورودی نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر به میزان ۰/۲۶ درصد، نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۵ سانتی متر به میزان ۰/۸۱۴ درصد، و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۱/۳۷ درصد و نسبت به دهانه ورودی مرجع [۵] به میزان ۳/۶ درصد افزایش یافت. همچنین اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک ۱۰ سانتی متر به میزان ۲/۱۵ درصد، نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک ۵ سانتی متر به میزان ۶/۶۵ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۱۰/۷ درصد، و نسبت به دهانه ورودی مرجع [۵] به میزان ۲۳/۵۵ درصد کاهش یافته است.

شکل ۱۷ ابعاد دقیق تر محل قرارگیری میکرو رمپ را نشان می دهد.

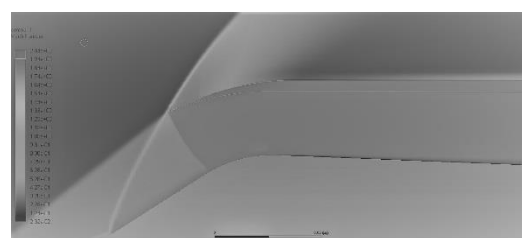
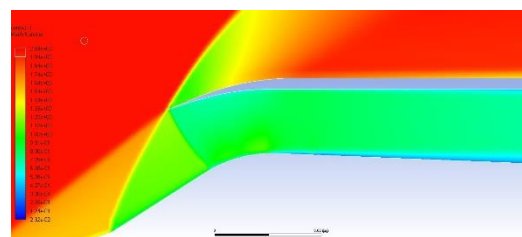


شکل ۱۷- محل قرار گیری میکرو رمپ (ابعاد به سانتی متر است)

همان گونه که قبلاً هم بیان شده بود، هدف قرارگیری شوک نرمال در محدوده گلوگاه است. چرا که در این محدوده بیشترین راندمان و کمترین اعوجاج را به دنبال دارد [۹-۱۰]. وجود میکرو رمپ بر روی اسپایک باعث شد که شوک نرمال به جلو بیاید و در محدوده بسیار نزدیک به

گلوگاه قرار گیرد، همین امر سبب شد تا راندمان افزایش و اعوجاج جریان کاهش یابد. علت حرکت شوک نرمال به جلو در اثر وجود میکرورمپ این است، که وقتی یک مانعی هرچند کوچک بر سر راه جریان قرار گیرد، سطح مقطع آن قسمت از دهانه ورودی به میزان بسیار جزئی کاهش یافته، و شوک نرمال را در منطقه‌ای جلوتر از میکرورمپ قرار می‌دهد، و از آنجایی که هدف قرارگیری شوک نرمال در محدوده گلوگاه بود، این امر توسط میکرورمپ محقق شد. که در ادامه، نتایج و میدان جریان حاصل از وجود میکرورمپ مشاهده خواهد شد.

شکل ۱۸ شبیه‌سازی هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر بین دو مرحله واگرایی اسپایک، همراه با میکرورمپ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸- هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر همراه با میکرورمپ

همان گونه که ملاحظه می‌شود، شوک نرمال در گلوگاه نشسته، و هیچ گونه نوسانی در دهانه ورودی مشاهده نمی‌شود. اما با عبور جریان از روی انحنا اسپایک و ورود جریان به منطقه واگرایی ۲/۳ درجه، به میزان جزئی جدایش

جریان رخ داده است. اما نسبت به دهانه‌های ورودی قبلی، میزان جدایش بسیار کاهش یافته است، زیرا شوک نرمال در ضعیف‌ترین حالت خود یعنی در گلوگاه نشسته است. میکرورمپ علاوه بر تاثیر گذاشتن بر قرارگیری شوک نرمال در گلوگاه، سبب کاهش میزان جدایش جریان هم شده است، چرا که در منطقه کوچکی از جریان که میکرورمپ وجود داشته، جریان سرعت گرفته و از ایجاد حباب جدایش بزرگ، جلوگیری کرده است.

جدول ۴ درصد تغییرات توابع هدف هندسه- های ورودی قبلی، با هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر همراه با میکرورمپ را نشان می‌دهد.

جدول ۴- تغییرات توابع هدف هندسه‌های قبلی و هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر همراه با

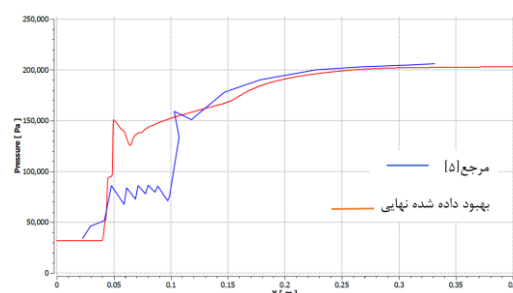
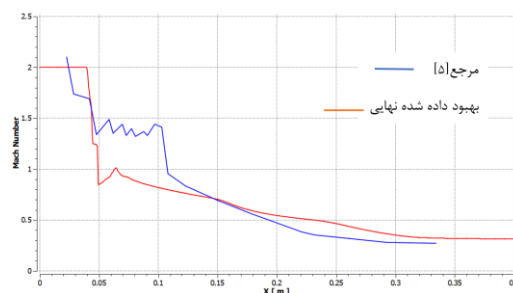
میکرورمپ

هندسه	توابع هدف		
	اعوجاج	راندمان	عدد ماخ انتهایی
هندسه مرجع	۰/۱۴۸۶	۰/۸۶۱۵	۰/۳۷۲۶
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر همراه با میکرورمپ	۰/۱۱۳۶	۰/۸۹۲۵	۰/۳۶۴۷
درصد تغییرات	-۲۳/۵۵	۳/۶	-۲/۱۲
هندسه بهینه شده اولیه	۰/۱۲۷۲	۰/۸۸۰۴	۰/۳۵۰۹
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۱۰ سانتی‌متر همراه با میکرورمپ	۰/۱۱۳۶	۰/۸۹۲۵	۰/۳۶۴۷
درصد تغییرات	-۱۰/۷	۱/۳۷	۳/۹۳
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنا ۵	۰/۱۲۱۷	۰/۸۸۵۳	۰/۳۵۶۸



سانتی متر			
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی متر همراه با میکرو ریمپ	۰/۳۶۴۷	۰/۸۹۲۵	۰/۱۱۳۶
درصد تغییرات	۲/۲۱	۰/۸۱۴	-۶/۶۵
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی متر	۰/۳۵۷	۰/۸۹۰۲	۰/۱۱۶۱
هندسه بهبود داده شده با شعاع انحنای ۱۰ سانتی متر همراه با میکرو ریمپ	۰/۳۶۴۷	۰/۸۹۲۵	۰/۱۱۳۶
درصد تغییرات	۲/۱۶	۰/۲۶	-۲/۱۵

شکل ۱۹ نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک هندسه ورودی قبل از بهینه‌سازی (مرجع [۱۵])، با هندسه ورودی بهبود داده شده نهایی (وجود میکرو ریمپ) را نشان می‌دهد.

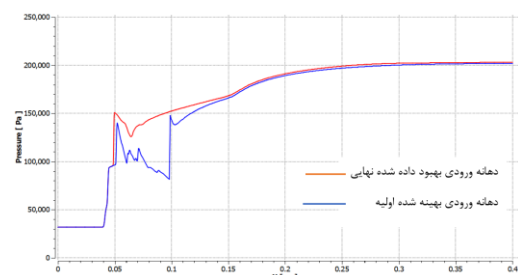
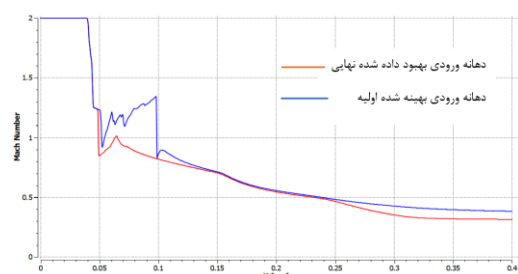


شکل ۱۹- نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک دو هندسه مرجع و بهبود داده شده نهایی

همان گونه که از نمودار مشاهده می‌شود، شوک نرمال در گلوگاه (۰/۰۵ طول) تشکیل شده است، و عدد ماخ به زیر یک کاهش یافته است،

اما با عبور جریان بر روی انحنای اسپایک، و وجود سطحی انبساطی، جریان تا حدودی سرعت گرفته و عدد ماخ تا حدود یک (۰/۹۸) بالا رفته، و بعد از آن به دلیل دیفیوژر مادون صوت و واگرایی سطح مقطع، عدد ماخ کاهش یافته است. از همین رو در درون دهانه ورودی با توجه به تصاویر، هیچ شوکی وجود ندارد.

شکل‌های ۲۰ تا ۲۲، نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک دهانه ورودی بهینه شده اولیه تا دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی را نشان می‌دهد.

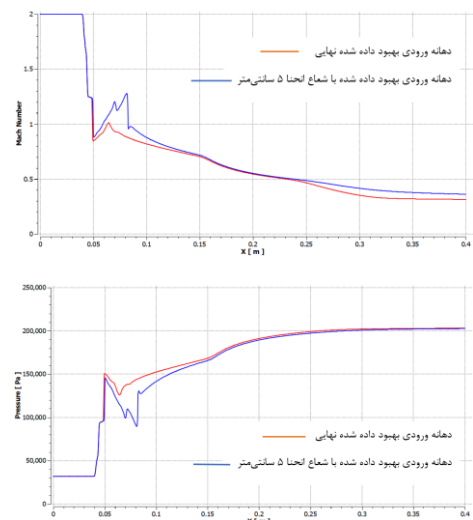
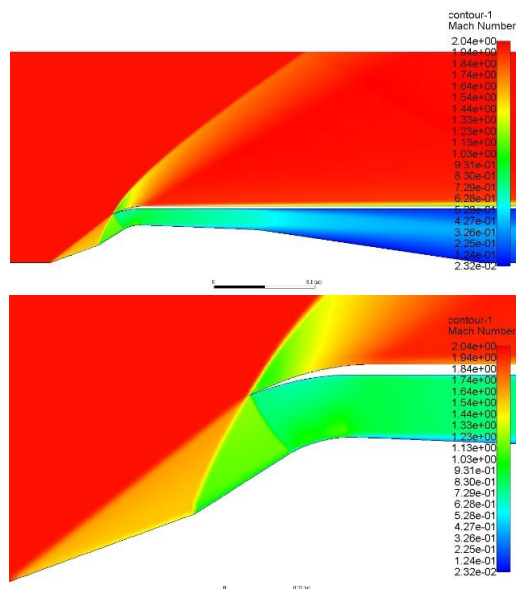


شکل ۲۰- نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک دهانه ورودی بهینه شده اولیه تا دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی

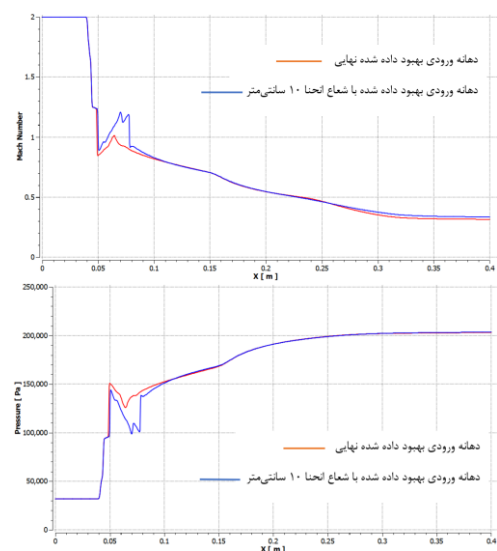
از نمودار توزیع عدد ماخ دیده می‌شود، که عدد ماخ دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی بعد از عبور از شوک نرمال و حرکت بر روی انحنای اسپایک تا ۰/۹۸ ماخ افزایش یافته، اما عدد ماخ دهانه ورودی بهینه شده اولیه تا حدود ۱/۴ افزایش یافته، که نشان از وجود شوک در داخل دهانه ورودی است.

از نمودار توزیع عدد ماخ دیده می‌شود، که عدد ماخ دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی بعد از عبور از شوک نرمال و حرکت بر روی انحنای اسپایک تا 0.98 ماخ افزایش یافته، اما عدد ماخ دهانه ورودی با شعاع انحنای 10 سانتی‌متر بین دو قسمت واگرایی اسپایک، تا حدود $1/2$ افزایش یافته که نشان از وجود شوک داخل دهانه ورودی داشته و کاهش راندمان را در پی خواهد داشت. همچنین نوسانات عدد ماخ و فشار استاتیک در دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی (با وجود میکرورمپ) به شدت کاهش یافته است. کاهش نوسانات، افزایش یکنواختی جریان را به دنبال خواهد داشت.

شکل ۲۳ میدان جریان کلی دهانه ورودی و عدد ماخ در نقاط مختلف هندسه بهبود داده شده نهایی (شعاع انحنای 10 سانتی‌متر بین دو قسمت واگرایی اسپایک همراه با میکرورمپ) را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱- نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک دهانه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنای 5 سانتی‌متر با دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی از نمودار توزیع عدد ماخ دیده می‌شود، که عدد ماخ دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی بعد از عبور از شوک نرمال و حرکت بر روی انحنای اسپایک تا 0.98 ماخ افزایش یافته، اما عدد ماخ دهانه ورودی با شعاع انحنای 5 سانتی‌متر بین دو قسمت واگرایی اسپایک، تا حدود $1/3$ افزایش یافته که نشان از وجود شوک داخل دهانه ورودی داشته و کاهش راندمان را در پی خواهد داشت.

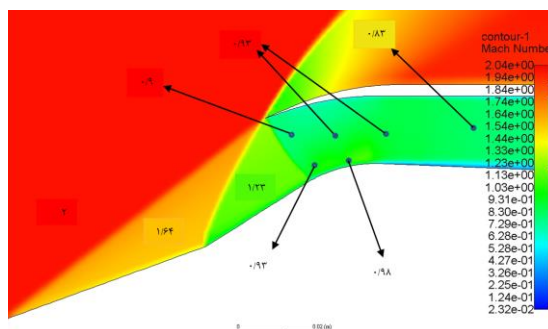


شکل ۲۲- نمودار مقایسه‌ای توزیع عدد ماخ و توزیع فشار استاتیک دهانه ورودی بهبود داده شده با شعاع انحنای 10 سانتی‌متر با دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی

- زمانی که دهانه ورودی با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر بین دو قسمت واگرایی اسپایک، با وجود یک میکرورمپ شبیه سازی گردید، مشاهده شد که راندمان دهانه ورودی نسبت به دهانه ورودی مرجع ۳/۶ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه ۱/۳۷ درصد، نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۵ سانتی متر ۰/۸۱۴ درصد و نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر ۰/۲۶ درصد افزایش یافت. در همین راستا نیز اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی مرجع ۲۳/۵۵ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۱۰/۷ درصد، نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۵ سانتی متر ۶/۶۵ درصد و نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۱۰ سانتی متر ۲/۱۵ درصد کاهش یافت.
- با بهبود هر مرحله دهانه ورودی، میزان کاهش اعوجاج جریان نسبت به افزایش راندمان بسیار بیشتر شد.

٨. مراجع

- [1]. N.K Martin, Supersonic Ramjet Engine Inlet for Jovian Flight, Sofia University “St. Kliment Ohridski, March (2021).
- [2]. L. Shi and et, Research and development on inlets for rocket based combined cycle engines, Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermal-structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi’an, Shaanxi, 710072, PR China b Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, 8140, New Zealand, 22 July (2020).



شکل ۲۳- میدان کلی جریان و عدد ماخ در قسمت‌های مختلف دهانه ورودی بهبود داده شده نهایی

۷. نتیجه گیری

نتایج حاصل از انجام تحقیق و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، به صورت خلاصه به قرار زیر است:

- با انحنا دادن به دو قسمت واگرایی اسپایک، به منظور افزایش تدریجی سطح مقطع جریان عبوری، راندمان دهانه ورودی افزایش و اعوجاج جریان کاهش یافت.
- زمانی که شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک، از صفر به ۵ سانتی‌متر افزایش داده شد، راندمان دهانه ورودی نسبت به دهانه ورودی مرجع ۲/۷۶ درصد و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه ۵۵۶/۰ درصد افزایش یافت. در همین راستا نیز اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی مرجع ۱/۱۸ درصد و نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه به میزان ۴/۳۲۴ درصد کاهش یافت.
- زمانی که شعاع انحنا بین دو قسمت واگرایی اسپایک، از ۵ به ۱۰ سانتی‌متر افزایش داده شد، راندمان دهانه ورودی نسبت به دهانه ورودی مرجع ۳/۳۳ درصد، نسبت به دهانه ورودی بهینه شده اولیه ۱/۱۱ درصد و نسبت به دهانه ورودی با شعاع انحنا ۵ سانتی‌متر ۵۵۶/۰ درصد افزایش یافت. در همین راستا نیز اعوجاج جریان نسبت به دهانه ورودی مرجع ۲۱/۹

of a supersonic intake, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 2013 227: 467, originally published online 17 February (2012).

- [10]. J. Sepahi-Younsi and M. R. Soltani, Boundary layer suction for high-speed air intakes, Proc ImechE Part G: J Aerospace Engineering 0(0) 1–23, ImechE (2018).

- [3]. C. Xiong and Y. Zheng and Z. Changsheng and J. Yutao, Numerical Simulation on Ramjet Inlet with Different Cowl Leading Edge, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu Province, 210094, China P. R. 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario Canada, 6 – 9 June (2005).

- [4]. S. Das and J. K. Prasad, Starting characteristics of a rectangular supersonic air-intake with cowl deflection, Department of Space Engineering and Rocketry Birla Institute of Technology Mesra, Ranchi India, volume 114 no 1153, march (2010).

- [5]. S. Saha and P.K. Sinha and D. Chakraborty, Cfd prediction of ramjet intake characteristics at angle of attack, Computational Combustion Dynamics Division, Directorate of Computational Dynamics, Defence Research and Development Laboratory (DRDL), Kanchanbagh Post, Hyderabad-500 058, India, Manuscript received on 11 Feb (2009), Paper reviewed, revised and accepted as a Full Length Contributed Paper on 19 May (2010).

[۶]. علیرضا محمدی کمال آبادی، محمود عدمی، بهینه‌سازی تداخل لایه‌مرزی با شوک بر روی اسپایک یک دهانه ورودی مافوق صوت خاص، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوافضا (پیش‌رانش)، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، شاهین شهر، ۱۴۰۱.

- [7]. Z. Honarkar, Experimental Investigation of the Effect of the Bleed Inlet Location on the Performance of a Supersonic Air Intake, MS Thesis, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (2014).

- [8]. B. Budich and V. Pasquariello and M. Grilli and S. Hickel, passive flow control of shock-wave/turbulent-boundary-layer-interactions using micro vortex generators, Institute of Aerodynamics and Fluid Mechanics, Technische Universit at M'unchen Boltzmannstr, 15, D-85748 Garching, Germany, August 28 – 30, Poitiers, France (2013).

- [9]. M. R. Soltani and J. Sepahi Younsi, Numerical simulation and parametric study

