



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
کد مجوز: ۲/۲/۲۷۰۹۶۳

کد نشریه علمی ISI
97180-22104

ID:1960

Code:mechaero1817-19600053

گواهی ارائه مقاله
سومین کنفرانس بین المللی

مهندسی مکانیک و هوافضا

بین وید گواهی می شود مقاله با عنوان:

بررسی عددی تأثیرات اعمال چشمه حواری روی عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی

نویسنده / نویسندگان: جواد سپاسی یونسی، صفا اسماعیلی

در سومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، با مجوز شماره ۲۱۳/۳/۲۷۰۹۶۳ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در ۲۱ 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 کنفرانس محتوای ملی (CIVILICA) نمایه خواهد شد. توفیق روز افزون شماره دوم همایش علمی و اجرایی کشور عزیزمان ایران آرزو مندیم.



دکتر سید محمد حسین شریفی
دکتر سعید مجتبی موسوی نایینیان
دکتر عبدالرزاق کمسی نژادعلیان
دکتر علیرضا کتیرا
دکتر علیرضا کتیرا
دکتر علیرضا کتیرا
mechaero.ir

محل: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی / ۲۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷

Certificate

WWW.MECHAERO.IR

ID:1960
Code:mechaero1817-19600053



**3rd International Conference on
Mechanical & Aerospace Engineering**

This is to certify that
Javad Sepahi-Younsi ,Safa Esmaeili

gave an oral presentation of their paper entitled
**'Numerical Investigation of the Effects of Adding Heat Source on the Performance of
a Mixed Compression Supersonic 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.Moitaba Mosavi Nainian
Conference Chairman

Dr. S. Mohammad Hoseln Sharifi
Executive Secretary

Dr. A. Kabinejad
Conference Secretary



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





بررسی عددی تأثیرات اعمال چشمه حرارتی روی عملکرد یک ورودی هوای فراصوتی از نوع تراکم ترکیبی

جواد سپاهی یونسی^{۱*}، صفا اسماعیلی^۲

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

خلاصه

بررسی عملکرد ورودی یکی از حوزه‌های بسیار مهم در طراحی ایرودینامیکی وسایل پرنده است. در این پژوهش عملکرد یک ورودی فراصوتی تقارن محوری با تراکم ترکیبی که برای عدد ماخ ۲ طراحی شده است، در زاویه حمله صفر درجه بررسی گردیده و سپس با استفاده از یک چشمه حرارتی و تغییر پارامترهای مؤثر بر آن، تأثیر چشمه بر عملکرد ورودی مورد مطالعه قرار گرفته است. از بین پارامترهای مؤثر بر چشمه، مانند اندازه، شکل سطح مقطع و شار حرارتی چشمه، تنها تأثیر موقعیت آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که چشمه‌ی حرارتی تأثیر مطلوبی بر سه پارامتر بازیافت فشار کل، نسبت دبی جرمی و ضریب پسای ورودی داشته است. اما اعوجاج جریان نیز به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. در عدد ماخ طراحی، حدود ۹/۶۸ درصد افزایش بازیافت فشار کل، ۲۶/۶ درصد کاهش ضریب پسا و ۱۶/۱۶ درصد افزایش نسبت دبی جرمی ورودی مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: ورودی فراصوتی، بازیافت فشار کل، ضریب پسا، نسبت دبی جرمی، چشمه حرارتی

۱. مقدمه

اولین جزء موتور ورودی بوده که وظیفه اصلی آن دریافت هوای مورد نیاز موتور و رساندن آن به فن، کمپرسور و یا محفظه احتراق با کمترین افت فشار کل است. کیفیت جریان هوایی که ورودی برای موتور ایجاد می‌کند، تأثیر مستقیمی در احتراق، عملکرد موتور و میزان نیروی جلوبرندگی دارد. در پرواز فراصوتی لازم است جریانی که سیستم ورودی را ترک می‌کند، دست کم برای طرح‌های حاضر، فروصوتی باشد. کمپرسورهایی که توانایی بلعیدن جریان فراصوتی را دارند، می‌توانند دبی جرمی زیاد در واحد سطح ایجاد کرده و نسبت فشار بالایی در هر طبقه تولید کنند. البته تاکنون عبور جریان کاملاً فراصوتی از میان کمپرسور، بدون افت زیاد ناشی از شوک (به‌ویژه در شرایط کاری غیرطراحی)، احتمال تولید کمپرسورهای کاملاً فراصوتی را قدری دور ساخته است. بنابراین عدد ماخ جریان محوری که به کمپرسور فروصوتی نزدیک می‌شود، نباید بیش از ۰/۴ باشد؛ برای هر طبقه گذرصوتی این عدد حدود ۰/۶ است. برای رم‌جت چنین محدودیت‌هایی به دلیل عدم وجود کمپرسور وجود ندارد. همچنین امکان داشتن احتراق در جریان فراصوتی بدون افت‌های ایرودینامیکی وجود دارد. اما

* Corresponding author: استادیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

Email: jsepahi@um.ac.ir



رمجتهایی که تا کنون ساخته شده اند، برای احتراق پایدار بدون افت های ایرودینامیکی زیاد به جریان هوای فروصوتی نیاز دارند [۱].

بنابراین ورودی فراصوتی به عنوان اولین جزء از موتور نقش بسیار موثری در عملکرد موتور دارد. به طور کلی ورودی فراصوتی از نظر محل قرارگیری امواج ضربه ای به سه دسته ورودی فراصوتی با تراکم داخلی، تراکم بیرونی و تراکم ترکیبی تقسیم می شود. از میان انواع ورودی های فراصوتی، ورودی فراصوتی با تراکم ترکیبی به خاطر مزایای خاص آن مانند پسای خارجی کم و دبی جرمی بیشینه، کاربرد بیشتری دارد.

تا کنون روش های مختلفی جهت بهبود عملکرد ورودی مانند مکش و دمش لایه مرزی، استفاده از مولد گردابه، پلاسما و... پیشنهاد شده است که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند.

یکی از روش های پیشنهادی برای افزایش عملکرد ورودی فراصوتی، افزودن چشمه حرارتی به آن است. چشمه حرارتی در واقع قسمتی از فضای جلوی ورودی بوده که با روش های مختلف مانند جت هوای داغ، لیزر و ... گرم می شود اما در این پژوهش نحوه اعمال چشمه مورد بررسی قرار نگرفته است. به علت افزایش فشار در این ناحیه، جریان فراصوتی در برخورد با آن، چشمه را مانند جسم جامد دیده و باعث ایجاد شوک می گردد. شوک ناشی از چشمه با شوک های ناشی از هندسه ورودی برخورد کرده و مجدداً باعث تشکیل شوک هایی دیگر می شوند. با تغییر پارامترهای چشمه و کنترل این شوک ها می توان پارامترهای عملکردی ورودی را بهبود بخشید. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر موقعیت چشمه در عملکرد ورودی است. لازم به ذکر است استفاده از چشمه حرارتی روشی نسبتاً جدید برای افزایش عملکرد ورودی بوده و تا کنون عملیاتی نشده است.

افزودن انرژی در بالادست جریان ورودی به منظور کاهش پسا در ورودی های فراصوتی برای اولین بار بیش از نیم قرن پیش توسط اسواتیش^۱ مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. در سال ۲۰۰۳، ماکرت^۲ و همکارانش بر روی ورودی های پیرسونیک تحقیقاتی را انجام داده و طرحی را ارائه دادند که ناحیه گرم شده باعث هدایت خطوط جریان به درون ورودی گردد [۳]. در سال ۲۰۰۴، کرمیر^۳ بر روی افزودن انرژی در کاهش پسا در ورودی های فراصوتی و ابرصوتی مطالعاتی انجام داد [۴]. پس از آن سلطانی و همکاران تأثیر اعمال چشمه حرارتی را بر روی عملکرد ورودی فراصوتی با تراکم خارجی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد استفاده از چشمه همواره موجب کاهش ضریب پسا می گردد [۵]. در سال ۲۰۱۴، لی^۴ و همکارانش تأثیر افزودن انرژی را به کمک لیزر بر دبی جرمی دریافت شده در ورودی ابرصوتی بررسی کردند [۶]. محققان دیگری نیز در این حوزه مطالعاتی انجام داده و با افزودن انرژی به جریان فراصوتی سعی در بهبود عملکرد ورودی داشته اند [۷] و [۸]. همان طور که ذکر شد قبلاً اثر چشمه حرارتی بر روی ورودی فراصوتی با تراکم بیرونی بررسی شده است [۹] و در این پژوهش تأثیر آن روی عملکرد ورودی فراصوتی با تراکم ترکیبی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲. هندسه ورودی و اعتبارسنجی

ورودی استفاده شده در این پژوهش از نوع فراصوتی تقارن محوری با تراکم ترکیبی بوده که عدد ماخ طراحی آن برابر ۲ و نسبت طول به بیشینه قطر آن برابر $L/d = 3.4$ است. این ورودی در نرم افزار گمبیت^۵ مش بندی شده و در نرم افزار

¹ Oswatitsch

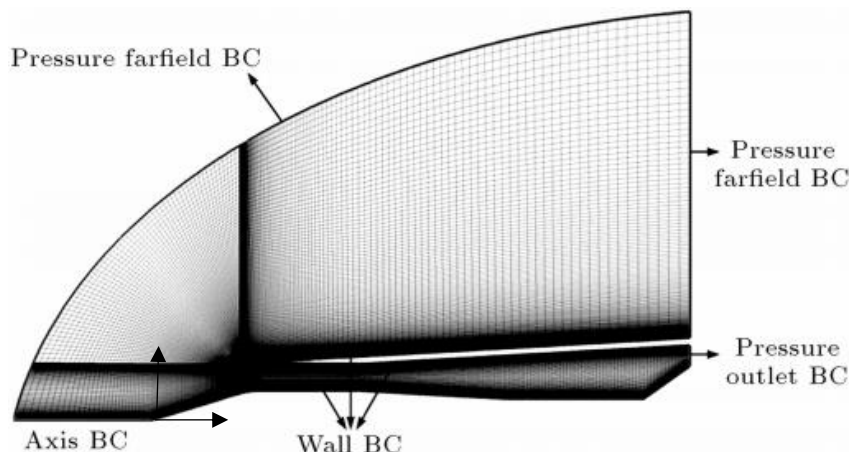
² Macheret

³ Kremeyer

⁴ Li

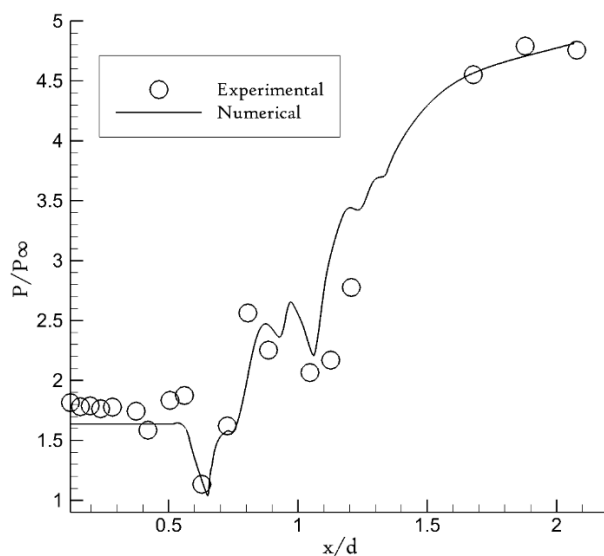
⁵ Gambit

فلوئنت^۱ حل عددی آن انجام شده است. شکل ۱ مش و شرایط مرزی اعمال شده در حل عددی را نشان می دهد. این شبکه دارای ۹۷۳۷۰ سلول بوده که استقلال حل از شبکه بررسی شده است. جهت اطمینان از صحت مش اعمال شده لازم است نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شود. بدین منظور از تست های انجام شده بر روی این ورودی در تونل باد فراصوتی دانشگاه امام حسین (ع) استفاده شده است [۱۰].



شکل ۱ - مش و شرایط مرزی اعمال شده در حل عددی [۱۰]

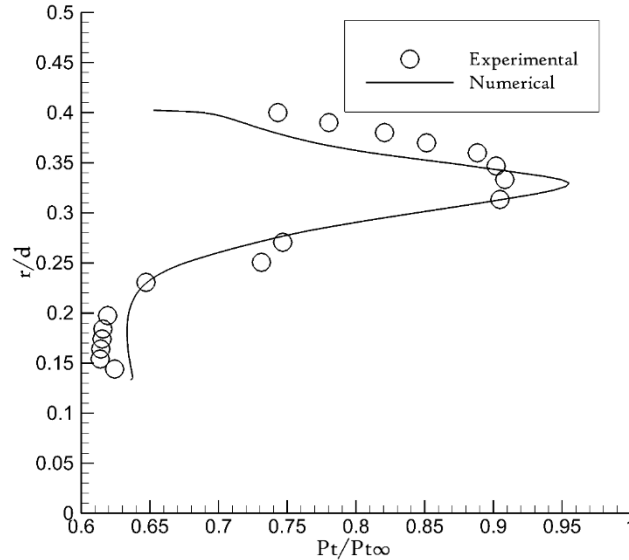
شکل ۲ توزیع فشار استاتیک را بر روی سطح اسپایک^۲ برای دو حل عددی و تجربی در زاویه حمله صفر درجه و عدد ماخ ۲ مقایسه می کند. همان طور که مشاهده می شود پیش بینی های حل عددی با نتایج حاصل از تست های تونل باد مطابقت دارد. شکل ۳ نشان دهنده ی توزیع شعاعی فشار کل در $x/d = 2.4$ است. مجددا تطابق خوبی میان داده های تجربی و عددی مشاهده می شود.



¹ Fluent

² Spike

شکل ۲ - مقایسه‌ی توزیع فشار استاتیک بر روی سطح اسپایک برای دو حل عددی و تجربی

شکل ۳ - مقایسه‌ی توزیع شعاعی فشار کل در $x/d = 2.4$ برای دو حل عددی و تجربی

۳. شرایط کارکردی ورودی فراصوتی و منحنی عملکردی^۱ آن

ورودی‌های فراصوتی دارای سه ناحیه‌ی کارکردی بوده که با تغییر فشار جریان پایین‌دست ورودی حاصل می‌شوند. چنانچه مقدار پس‌فشار کم باشد، ورودی در شرایط فرابحرانی^۲ کار کرده و موج ضربه‌ای قائم در قسمت واگرایی ورودی قرار می‌گیرد (شکل ۴-الف). محل قرارگیری شوک قائم با اعمال پس‌فشار به ورودی تعیین می‌گردد (که در واقعیت این عمل توسط محفظه احتراق یا کمپرسور انجام می‌شود). با افزایش پس‌فشار شوک به سمت بالادست حرکت کرده تا در گلوگاه ورودی قرار گیرد. در این حالت ورودی در شرایط بحرانی^۳ کار می‌کند (شکل ۴-ب). اعمال بیشتر پس‌فشار باعث بیرون افتادن شوک عمودی از ورودی شده چراکه این شوک در مجرای همگرا پایدار نمی‌ماند و لذا ورودی را در حالت فروبحرانی^۴ قرار می‌دهد (شکل ۴-پ). افزایش بیشتر پس‌فشار موجب می‌شود تا شوک قائم در جلوی ورودی شروع به نوسان کرده و پدیده باز^۵ اتفاق بیفتد. شرایط کارکردی ورودی در این پژوهش تنها شرایط فرابحرانی و بحرانی بوده و در شرایط فروبحرانی به دلیل پایدار نبودن شوک و پایا نبودن جریان مورد بحث و بررسی قرار نمی‌گیرد.

منحنی عملکردی این نوع ورودی به صورت تغییرات بازیافت فشار کل برحسب نسبت دبی جرمی آن نمایش داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در حالت‌های فرابحرانی و بحرانی، دبی جرمی گذرنده از ورودی زیاد است. بنابراین مقدار هوای سرریز شده صفر و در نتیجه حالت^۱ SOL حاصل می‌شود. در حالت فرابحرانی به خاطر کم بودن پس‌فشار، شوک عمودی پایین‌دست گلوگاه و در نزدیکی انتهای ورودی قرار می‌گیرد. از آنجا که بعد از گلوگاه در دیفیوزر

¹ Performance Curve

² Supercritical

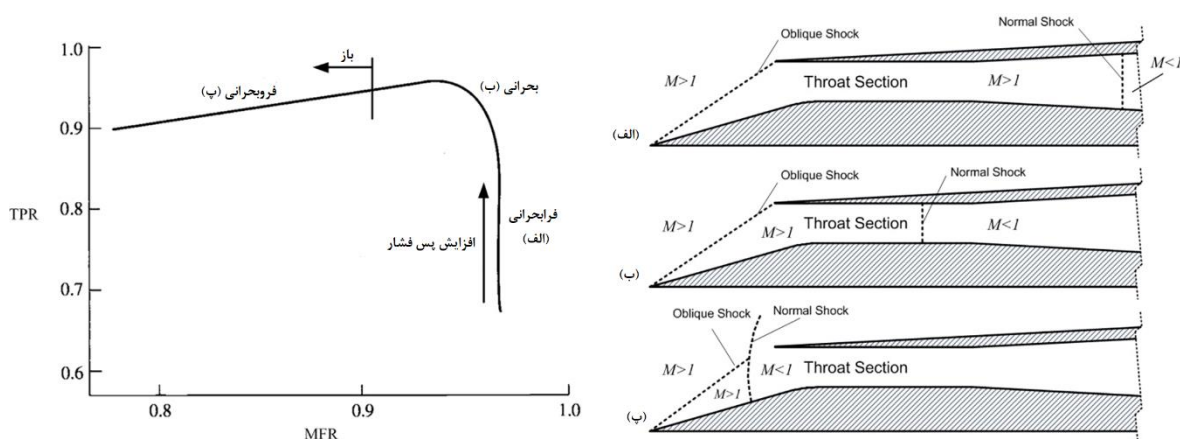
³ Critical

⁴ Subcritical

⁵ Buzz

⁶ Shock On Lip

فروصوتی^۱ مساحت جریان مدام افزایش پیدا می کند، بنابراین شوک عمودی در یک مساحت زیاد تشکیل می شود. در نتیجه عدد ماخ قبل از این شوک با افزایش مساحت جریان به اندازه ای بزرگ می شود که منجر به قوی شدن این شوک قائم گردد. وجود این شوک عمودی قوی داخل مجرا و تداخل آن با لایه مرزی باعث افت شدید فشار کل جریان می شود. همان طور که ذکر شد، با افزایش پس فشار شوک عمودی به سمت بالادست و گلوگاه حرکت می کند. این شوک در موقعیت جدید ضعیف تر است. زیرا در مساحت و در نتیجه عدد ماخ کمتری تشکیل می شود. بنابراین بازیافت فشار کل^۲ زیاد شده ولی چون هنوز آرایش شوک های دهانه ورودی و حالت SOL^۳ تغییری نکرده است، نسبت دبی جرمی^۴ همچنان بیشینه است. به ازای یک مقدار مشخص پس فشار، شوک قائم در محل گلوگاه یا بسیار نزدیک به آن قرار می گیرد و حالت بحرانی حاصل می شود. به خاطر قدرت کم شوک عمودی و برقراری SOL^۳ در این حالت، بازیافت فشار کل و نسبت دبی جرمی هر دو مقداری بیشینه دارند.



شکل ۴ - شرایط کارکردی ورودی فراصوتی و منحنی عملکردی آن [۱۰]

۴. روش حل عددی

جریان ورودی از نوع پایا، لزج و تراکم پذیر است که برای افزایش دقت در محاسبه لزجت از معادله ی ساترلند^۴ با سه ضریب استفاده شده است. روش گسسته سازی معادلات روش ضمنی^۵ بوده که در محاسبات شار آن روش رو^۶ به کار گرفته شده است. شرط مرزی استفاده شده در اطراف میدان حل، شرط فشار دوردست بوده و لذا برای حل در نرم افزار فلونت، چگالی جریان از روابط گاز ایده آل محاسبه می شود. بدین منظور معادله انرژی نیز فعال شده است.

همان طور که ذکر شد در این مسئله جریان تراکم پذیر بوده و بنابراین از حلگر density based استفاده شده تا چگالی جریان (که مقداری ثابت ندارد) نیز به همراه معادلات ناویر-استوکس^۷ محاسبه شود. مدل آشفتگی مورد استفاده، مدل k-

¹ Subsonic Diffuser

² Total Pressure Recovery (TPR)

³ Mass Flow Ratio (MFR)

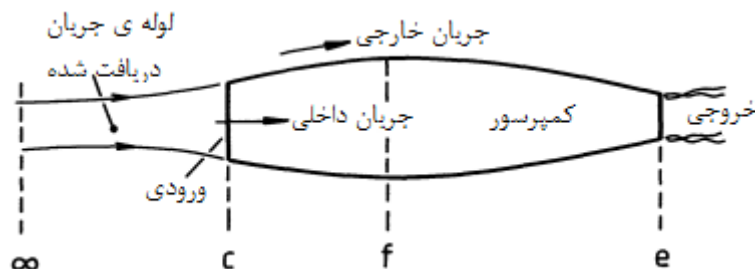
⁴ Sutherland

⁵ Implicit

⁶ Roe-FDS

⁷ Navier-Stokes' Equations

ω گونه‌ی SST است. این مدل، یک مدل تجربی بوده که بر اساس دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی آشفتگی k و دیگری برای نرخ اتلاف مخصوص آن ω تعریف شده است. یکی از اثرات مهم لایه مرزی، جدایش در جریان‌های با گرادیان فشار معکوس است که این پدیده، اثر شدیدی بر آشفتگی جریان دارد. در این مدل از توابعی استفاده شده که در نزدیکی دیواره مدل k - ω و دور از دیواره مدل k - ϵ فعال می‌شود. بنابراین جریان‌های با جدایش را به خوبی مدل می‌کند. در این پژوهش، جریان در عدد ماخ طراحی برابر ۲ و زاویه حمله صفر درجه شبیه‌سازی شده است. چنانکه در قسمت قبل اشاره شد پس فشار به تدریج زیاد شده تا شوک عمودی در گلوگاه ورودی قرار گیرد. در هریک از پس فشارها پارامترهای عملکردی محاسبه شده تا پس از اعمال چشمه تغییرات آن‌ها بررسی گردد. این پارامترها عبارتند از: بازیافت فشار کل، اعوجاج جریان، ضریب پسا و نسبت دبی جرمی. در ادامه به توضیح مختصر هریک پرداخته خواهد شد. شکل ۵ نمایانگر مقاطع مهم ورودی بوده که از آنها در تعریف پارامترهای عملکردی استفاده می‌گردد.



شکل ۵ - نام‌گذاری مقاطع مهم ورودی [۱۱]

بازیافت فشار کل به صورت نسبت فشار کل در انتهای ورودی به فشار کل جریان آزاد تعریف می‌شود. این پارامتر، مشخصه مهمی در عملکرد ورودی بوده چراکه مستقیماً با نیروی پیشران وسیله پرنده در ارتباط است.

$$TPR = \frac{P_{t,f}}{P_{t,\infty}} \quad (1)$$

جدایش جریان باعث به وجود آمدن نواحی بزرگی می‌شود که در آنها فشار کل افت پیدا می‌کند. میزان این افت فشار از جریان یکنواخت مطلوب را اعوجاج جریان می‌نامند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$FD = \frac{P_{t,\max} - P_{t,\min}}{P_{t,avg}} \quad (2)$$

که در آن $P_{t,\max}$ بیشترین فشار کل، $P_{t,\min}$ کمترین فشار کل و $P_{t,avg}$ میانگین فشار کل است. در یک نگاه سیستمی به موتور، پسای ورودی تنها شامل پسای خارجی است. بنابراین ضریب پسای ورودی فقط بر روی قسمت بالایی پوسته محاسبه می‌شود.

چنانچه لوله جریان آزاد بدون تغییر مساحت به ورودی برسد و هیچگونه سرریزی در جریان وجود نداشته باشد، این جریان را جریان کامل می‌گویند. نسبت دبی جرمی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MFR = \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_c} \quad (3)$$

در این رابطه، \dot{m}_∞ دبی جرمی لوله جریان در بالادست و \dot{m}_c دبی جرمی جریان کامل است. در ورودی‌های فراصوتی حداکثر این مقدار برابر ۱ است.



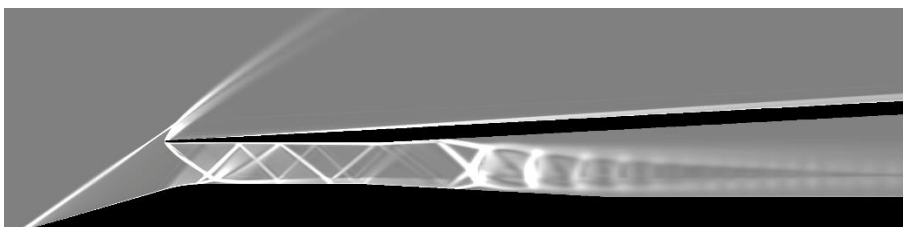
جهت بی بعد کردن پس فشار پارامتری به نام نسبت پس فشار^۱ به صورت نسبت فشار استاتیک در خروجی به فشار استاتیک جریان آزاد تعریف می شود. پیش از اعمال چشمه برای ایجاد شرایط مختلف کارکردی، این پارامتر برابر ۲، ۳، ۴، ۵، ۵/۵ و ۵/۷۵ قرار داده شده تا شرایط فرابحرانی و بحرانی حاصل گردند. پس از اعمال چشمه مجدداً نسبت پس فشار برابر مقادیر ۲، ۳، ۴، ۵، ۵/۵، ۵/۷۵، ۶ و ۶/۲۵ قرار گرفته تا شوک عمودی از انتها تا گلوگاه ورودی حرکت کند. بنابراین نسبت پس فشار ۵/۷۵ و ۶/۲۵ مقادیر بحرانی نسبت پس فشار در دو حالت قبل و بعد از اعمال چشمه حرارتی بوده که در آن موج ضربه ای قائم در گلوگاه ورودی قرار می گیرد.

۵. نتایج

با اطمینان از پیاده سازی صحیح مسئله، می توان با اعمال چشمه اثر آن را روی عملکرد ورودی بررسی نمود. برای این کار ابتدا حل عددی جریان را بدون اعمال چشمه انجام داده و پارامترهای عملکردی بدست می آیند و سپس باری دیگر در حضور چشمه میدان جریان حل شده و مجدداً این پارامترها محاسبه و در دو حالت با یکدیگر مقایسه می شوند.

۵.۱. بررسی جریان پیش از اعمال چشمه

پیش از اعمال چشمه حرارتی لازم است جریان به صورت عددی حل شده و پارامترهای عملکردی ورودی محاسبه شوند. در شکل ۶ مشاهده می شود که جریان فراصوتی در برخورد با نوک مخروطی اسپایک، تشکیل یک شوک مخروطی می دهد که در حالت طراحی این شوک به لبه ورودی برخورد کرده و حالت SOL پدید می آید. جریان هوا در پایین دست این شوک همچنان فراصوتی بوده بنابراین برخورد این جریان با لبه ورودی باعث ایجاد شوک مایل می گردد. این شوک به سطح اسپایک خورده و انعکاس می یابد. در نتیجه شوک های بازگشتی در گلوگاه ورودی به وجود می آیند. از طرفی جریان در عبور از دهانه ورودی به سمت خارج چرخیده و باعث ایجاد فن انبساطی می شود اما از آنجا که این فن عملکرد را کاهش می دهد، لذا طراحی ورودی به گونه ای انجام می شود که شوک مایل ناشی از لبه آن، به این ناحیه برخورد کرده و تا حدودی اثر فن انبساطی را تضعیف کند. پس از آن جریان وارد دیفیوزر فروصوتی شده و در نهایت با تشکیل قطار شوک که به یک شوک عمودی ختم می شود، به جریان فروصوتی تبدیل می شود. در قسمت بالایی لبه نیز جریان به سمت خارج چرخیده و یک فن انبساطی در این قسمت تشکیل می شود. بنابراین فشار در این ناحیه کاهش می یابد.

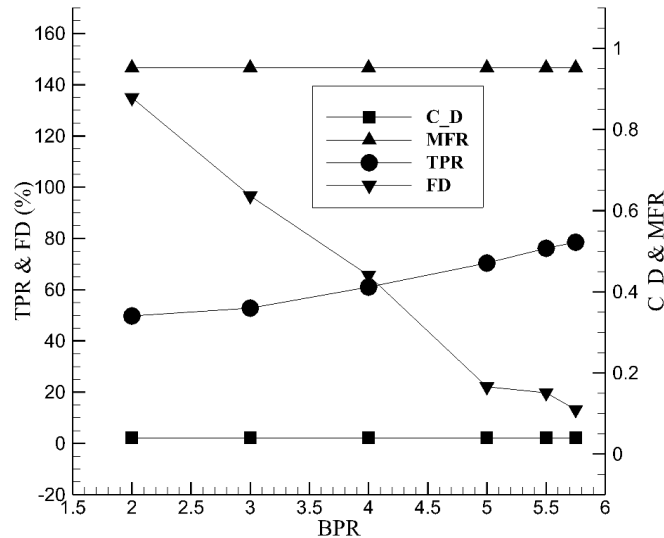


شکل ۶ - کانتور گرادیان چگالی و آرایش شوک ها پیش از اعمال چشمه ی حرارتی

همان طور که ذکر شد در حالت های فرابحرانی و بحرانی مقدار سرریز جریان ثابت بوده و بنابراین ضریب پسا نیز تقریباً ثابت است. با افزایش نسبت پس فشار قطار شوک به سمت بالادست حرکت کرده و گردابه های پشت آن کاهش می یابند.

¹ Back Pressure Ratio (BPR)

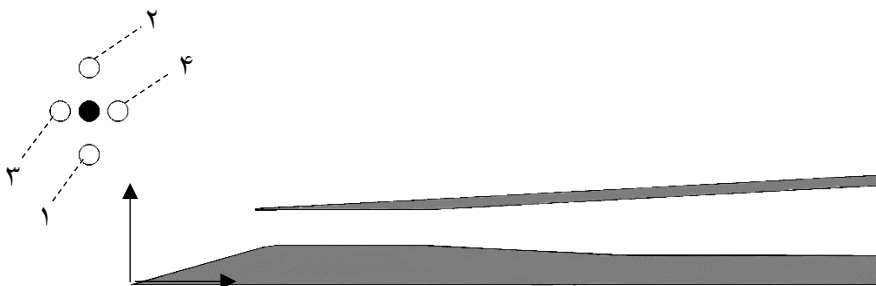
جریان خروجی یکنواخت تر شده و در نتیجه اعوجاج آن کاهش می یابد. شکل ۷ تغییرات پارامترهای عملکردی را در این شرایط نشان می دهد.



شکل ۷- پارامترهای عملکردی ورودی در پس فشارهای مختلف پیش از اعمال چشمه

۵.۲. بررسی جریان پس از اعمال چشمه

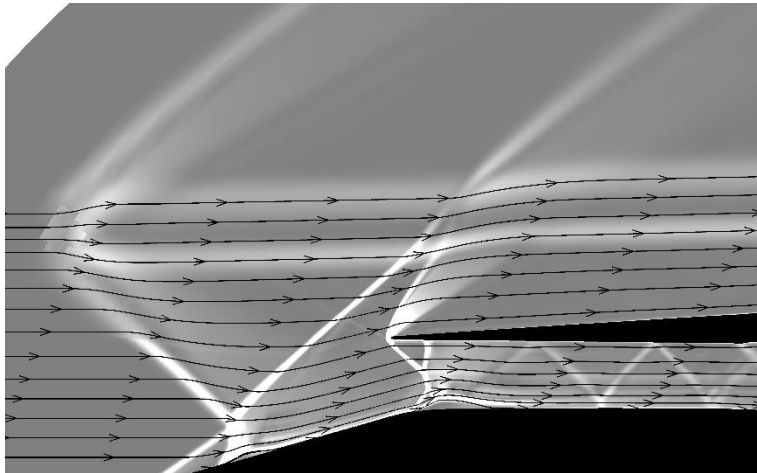
پارامترهای متعددی از چشمه بر عملکرد ورودی تأثیرگذارند که در این پژوهش تنها به بررسی موقعیت آن پرداخته شده است. شکل ۸ نشان دهنده‌ی موقعیت‌های منتخب قرارگیری چشمه در دو جهت X و Y بوده که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهند شد. چشمه افزوده شده به جریان، دارای سطح مقطع دایروی بوده که نسبت شعاع آن به بیشینه قطر ورودی برابر $r/d = 0.047$ و شار حرارتی آن $2 \times 10^{10} W/m^3$ انتخاب شده است.



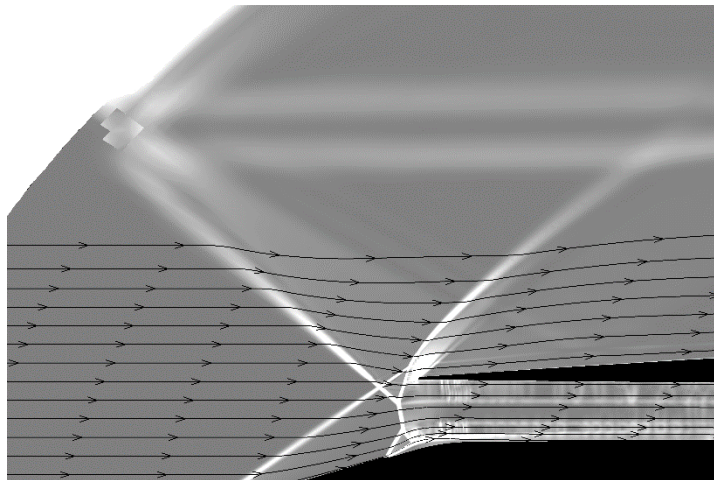
شکل ۸- موقعیت‌های قرارگیری چشمه در دو جهت X و Y

چنانچه فاصله عمودی محل قرارگیری چشمه تا نوک اسپایک کم باشد (موقعیت ۱ در شکل ۸)، شوک چپ‌رو حاصل با فاصله زیادی از لبه ورودی عبور می کند و مقدار سرریز هوا زیاد می شود (شکل ۹) در این حالت به دلیل فاصله زیاد این شوک با لبه ورودی، شوک بر فن انبساطی تأثیر چندانی نداشته و فشار بر روی لبه بالایی ورودی کم است و اگر چشمه در فاصله عمودی بیشتری قرار بگیرد (موقعیت ۲ در شکل ۸)، شوک با فاصله کمتری از لبه ورودی عبور کرده، بنابراین مستقیماً

بر فن اثرگذار بوده و باعث افزایش فشار و پسای فشاری در این ناحیه می‌گردد (شکل ۱۰). لذا موقعیت چشمه در جهت y نباید خیلی زیاد یا خیلی کم باشد. در این پژوهش فاصله عمودی چشمه از نوک اسپایک برابر $y/d = 0.8$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۹- کانتور گرادیان چگالی و خطوط جریان ورودی در حضور چشمه‌ای با فاصله‌ی کم در جهت y

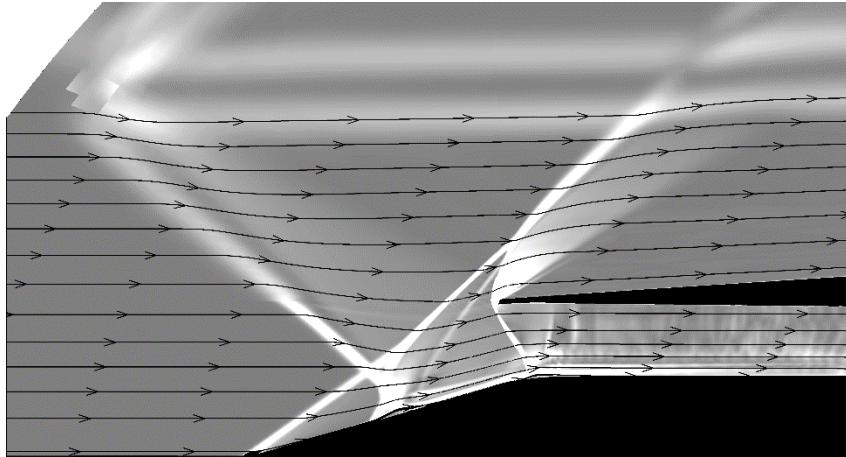


شکل ۱۰- کانتور گرادیان چگالی و خطوط جریان ورودی در حضور چشمه‌ای با فاصله‌ی زیاد در جهت y

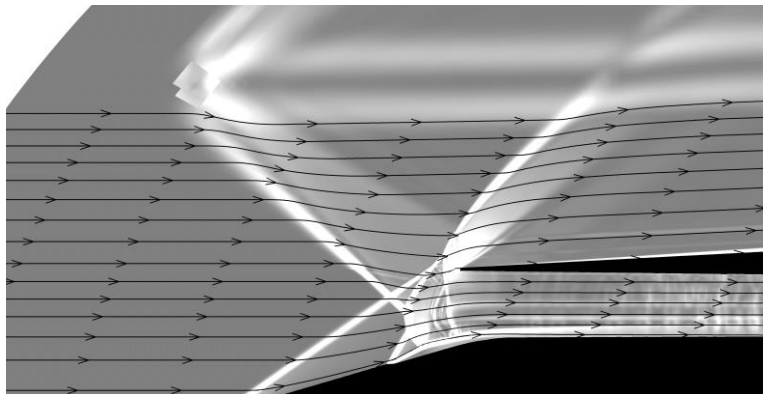
جهت یافتن موقعیت محوری مناسب چشمه (x/d) ، چشمه در جهت y ثابت نگه داشته شده و در جهت x جابجا شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، چنانچه چشمه در فاصله‌ی زیادی نسبت به دهانه‌ی ورودی قرار بگیرد (موقعیت ۳ در شکل ۸)، مقدار سرریز جریان زیاد شده و نسبت دبی جرمی ورودی کاهش می‌یابد. اما اگر این فاصله کم باشد (موقعیت ۴ در شکل ۸)، مقدار جریان وارد شده افزایش یافته ولی بنا به دلایل ذکر شده، فشار و به تبع آن پسای فشاری نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). بنابراین فاصله‌ی افقی چشمه از نوک اسپایک برابر $x/d = -0.2$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که موقعیت‌های مشخص شده در شکل ۸ تنها به‌عنوان نمونه آورده شده و به‌طور مثال اگر چشمه در فاصله‌ای



کمتر از موقعیت ۴ نسبت به ورودی قرار بگیرد، تحلیل میدان حل مشابه مورد فوق بوده و پارامترهای عملکردی نیز در همان راستا تقویت و یا تضعیف می شوند.

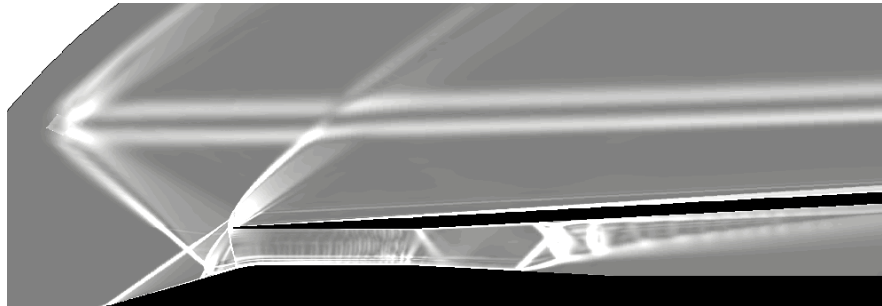


شکل ۱۱- کانتور گرادیان چگالی و خطوط جریان ورودی در حضور چشمه‌ای با فاصله‌ی زیاد در جهت X



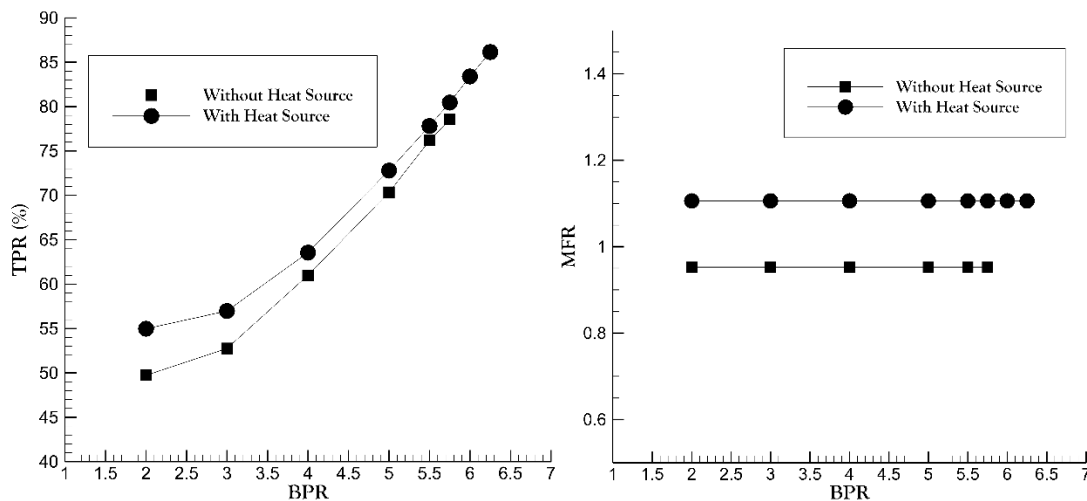
شکل ۱۲- کانتور گرادیان چگالی و خطوط جریان ورودی در حضور چشمه‌ای با فاصله‌ی کم در جهت X

پس از بدست آوردن موقعیتی مناسب (دایره توپر در شکل ۸) برای چشمه به منظور داشتن عملکردی مطلوب، حل عددی جریان در حضور چشمه حرارتی انجام می شود. چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می شود، شوک چپرو حاصل از برخورد دو شوک مایل تقریباً به لبه ورودی برخورد کرده و دبی جرمی نسبتاً زیادی وارد ورودی می گردد. هنگامی که جریان هوا به دهانه ورودی می رسد، به دلیل گذر از چندین شوک مایل فروصوتی شده و در نتیجه شوک‌های انعکاسی درون گلوگاه تشکیل نمی شوند. این جریان در عبور از گلوگاه شتاب گرفته و در قسمت انتهایی آن مجدداً فراصوتی می شود. بنابراین جریان فراصوتی وارد دیفیوزر فروصوتی می شود و با افزایش سطح مقطع، بر سرعتش افزوده و عدد ماخ آن بیشتر می شود و در نهایت با تشکیل یک شوک عمودی، جریان فروصوتی شده و ورودی را ترک می کند.



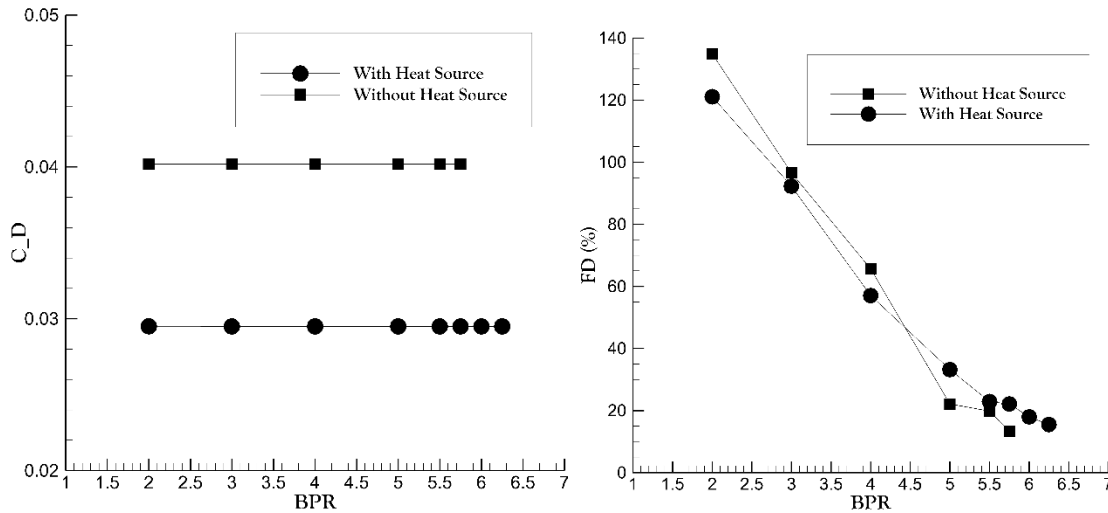
شکل ۱۳- کانتور گرادیان چگالی و آرایش شوک‌ها پس از اعمال چشمه‌ی حرارتی

پس از اعمال چشمه‌ی حرارتی، تعداد شوک‌ها در جلوی ورودی افزایش یافته و قدرت شوک‌های داخلی کاهش می‌یابد. در نتیجه افت فشار کل نهایی کمتر می‌شود. همچنین نواحی جدایش بر روی سطح اسپایک کمتر شده و تنها ناحیه‌ای کوچک در پایین دست انعکاس ماخ وجود دارد که جریان از سطح جدا شده و باعث افت فشار کل می‌گردد. بنابراین بازیافت فشار کل در حضور چشمه افزایش می‌یابد. شوک ناشی از چشمه راست‌رو بوده و جریان را به سمت ورودی هدایت می‌کند. از طرفی شوک چپ‌رو ناشی از تداخل دو شوک مایل، به لبه‌ی ورودی برخورد کرده و چندان باعث سرریز جریان نمی‌شود. در نتیجه نسبت دبی جرمی افزایش یافته و با وجود اینکه ورودی فراصوتی بوده اما این نسبت در حضور چشمه دارای مقداری بزرگتر از یک است (شکل ۱۴). با کاهش سرریز هوا بر روی قسمت بالایی پوسته، پسای سرریز و در نتیجه پسای کلی ورودی نیز کمتر می‌شود (شکل ۱۵). همچنین به علت افزایش تعداد شوک‌ها در جلوی ورودی، فشار جریان در دهانه‌ی ورودی بیشتر شده و بنابراین پس فشار بیشتری لازم است تا شوک عمودی در گلوگاه قرار بگیرد. لذا نسبت پس فشار بحرانی نیز افزایش می‌یابد که مطلوب بوده زیرا دامنه‌ی کاری ورودی را بزرگ‌تر می‌کند. با اعمال چشمه‌ی حرارتی، قطار شوک سریع‌تر شکل گرفته و در نتیجه در پس فشارهای کم، اعوجاج جریان کاهش می‌یابد. اما با تشکیل کامل قطار شوک همان‌طور که ذکر شد، پس فشار بیشتری لازم است تا شوک به سمت بالادست حرکت کند. لذا در پس فشار یکسان، قطار شوک پس از اعمال چشمه در فاصله‌ی بیشتری از دهانه‌ی ورودی قرار می‌گیرد. بنابراین اعوجاج جریان در پس فشارهای بالا افزایش می‌یابد (شکل ۱۵).



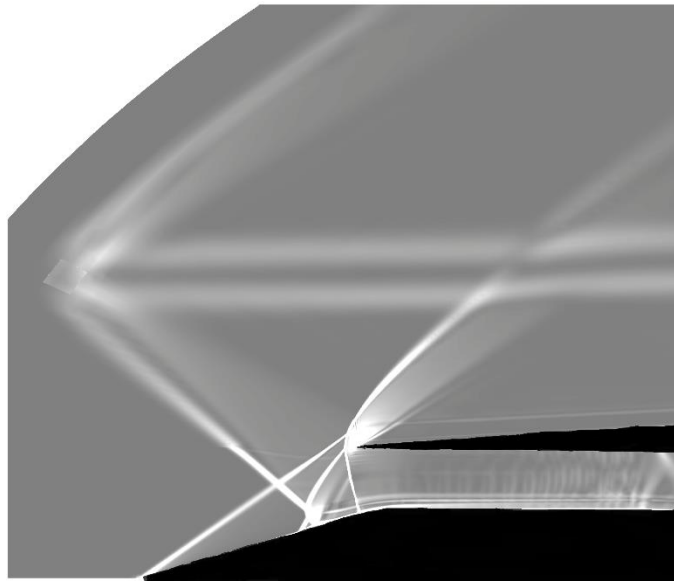
شکل ۱۴- مقایسه‌ی نسبت دبی جرمی (سمت راست) و بازیافت فشار کل (سمت چپ) در دو حالت قبل و

بعد از اعمال چشمه



شکل ۱۵- مقایسه‌ی ضریب پسا (سمت چپ) و اعوجاج جریان (سمت راست) در دو حالت قبل و بعد از اعمال چشمه

همان‌طور که ذکر شد بر اثر اعمال چشمه شوک مایلی ایجاد شده که با شوک ناشی از اسپایک تداخل می‌کند. حاصل این برخورد ایجاد یک شوک چپ‌رو و یک انعکاس ماخ در نزدیکی اسپایک است (شکل ۱۶). شوک چپ‌رو حاصل، جریان را به سمت بالا هدایت می‌کند. حال هرچه این شوک به لبه ورودی نزدیک‌تر باشد مقدار سرریز جریان کمتر شده و جریان بیشتری وارد ورودی می‌شود. از طرفی این شوک بر فن انبساطی ایجاد شده روی لبه بالایی ورودی اثر گذاشته و باعث افزایش فشار در این ناحیه می‌گردد. لذا پسای فشاری و در نتیجه پسای کل ورودی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶- کانتور گرادیان چگالی جریان در حضور چشمه‌ی حرارتی در $x/d = -0.2$ و $y/d = 0.8$

نتایج نشان می‌دهند که افزودن چشمه حرارتی به جریان بالادست ورودی، باعث بهبود پارامترهای عملکردی شده به طوری که بازیافت فشار کل را در عدد ماخ طراحی حدود $9/68$ درصد، نسبت دبی جرمی را $16/16$ درصد، نسبت پس فشار بحرانی را $8/7$ درصد افزایش و ضریب پسا را $26/6$ درصد کاهش می‌دهد. اما اعوجاج جریان خروجی نیز $17/13$ درصد افزایش یافته که اگر ورودی استفاده شده برای رمجت باشد، این افزایش اعوجاج تاثیر مخربی بر عملکرد نخواهد داشت.

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از حل عددی، یک ورودی فراصوتی تقارن محوری با تراکم ترکیبی شبیه سازی شد. برای اطمینان از صحت مدل سازی، حل عددی با داده های تجربی تونل باد برای همان ورودی مقایسه و همخوانی آنها بررسی شد. سپس با اعمال یک چشمه حرارتی و تغییر موقعیت آن، پارامترهای عملکردی ورودی در عدد ماخ طراحی ۲ محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهند که اعمال چشمه همواره موجب بهبود پارامترهای عملکردی می‌شوند. اما چنانچه هدف از افزودن چشمه، بهبود چشمگیر یک پارامتر باشد، لازم است چشمه در موقعیتی قرار گیرد که به طور مستقیم بر همان پارامتر تاثیر گذارد. مثلا برای کاهش ضریب پسا در این نوع ورودی لازم است چشمه در موقعیتی قرار گیرد که شوک حاصل از برخورد دو شوک ناشی از اسپایک و چشمه، با فاصله از لبه ورودی عبور کرده و تاثیر چندانی بر فن انبساطی موجود در این ناحیه نگذارد. در این حالت فشار روی سطح بالایی پوسته کاهش یافته و ضریب پسا حدود $33/82$ درصد کم می‌شود اما به دلیل فاصله گرفتن شوک از لبه ورودی، سرریز هوا زیاد شده و در نتیجه نسبت دبی جرمی کاهش می‌یابد. چنانچه هدف از اعمال چشمه افزایش دبی جرمی ورودی و بازیافت فشار کل باشد بهتر است چشمه در مکانی قرار بگیرد که شوک حاصل از برخورد دو شوک ناشی از اسپایک و چشمه دقیقا به لبه ورودی و یا حتی به داخل آن برخورد کند. این پژوهش صرفا جهت بررسی تاثیر چشمه حرارتی بر هر چهار پارامتر بازیافت فشار کل، اعوجاج جریان، نسبت دبی جرمی و ضریب پسای ورودی انجام شده و لذا چشمه در مکانی قرار گرفته است که پارامترها بهبود یافته و بنابراین موقعیت پیشنهادی موقعیت بهینه نیست.

۷. مراجع

- [1] P. G. Hill and C. R. Peterson, *Mechanics and Thermodynamics of Propulsion*, New York: Pearson, 1991.
- [2] K. Oswatitsch, "Propulsion with Heating at Supersonic Speed," *Deutsche Versuchsanstalt für Luft und Raumfahrt*, Berlin, 1959.
- [3] S. Macheret, M. Shneider and R. Miles, "Scramjet inlet Control By Off-Body Energy Addition: A Virtual Cowl," in *41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 2003.
- [4] K. Kremeyer, "Lines of Pulsed Energy for Supersonic/Hypersonic Drag Reduction: Generation and Implementation," in *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 2004.
- [5] M. Soltani, M. Farahani and J. Sepahi Younsi, "Performance Study of a Supersonic Inlet in the Presence of a Heat Source," *Scientia Iranica*, vol. 18, no. 3, pp. 375-382, 2011.

- [6] Q. Li, Y. Hong, W. Zhao and D. Wang, "Numerical Simulation on Air Mass Capture Control of Hypersonic Inlet by Laser Energy," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 644-650, pp. 1470-1473, 2014.
- [7] J. T. Chang, W. Bao, D. Yu, Y. Fan, Y. Shen and W. Zhou, "Hypersonic Inlet Control with Pulse Periodic Energy Addition," *J. Aerospace Engineering*, vol. 223, no. 2, pp. 85-94, 2008.
- [8] M. Shneider, S. Macheret, S. Zaidi, I. Girgis and R. Miles, "Virtual Shapes in Supersonic Flow Control with Energy Addition," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 24, no. 5, pp. 900-915, 2008.
- [۹] م. سلطانی، م. فراهانی، ج. سپاهی یونسی و ا. مسعود، "بهبود عملکرد ورودی مافوق صوت با اعمال چشمه حرارتی خارج از جسم،" در هفتمین همایش سالانه (بین المللی) انجمن هوافضای ایران، تهران، ۲۰۰۸.
- [10] M. Soltani, A. Daliri and J. Sepahi Younsi, "Effects of Shock Wave/Boundary-Layer Interaction on Performance and Stability of a Mixed-Compression Inlet," *Scientia Iranica*, vol. 23, no. 4, pp. 1811-1825, 2016.
- [11] J. Seddon and E. Goldsmith, *Intake Aerodynamics*, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.