



Design and Analysis of Axisymmetric Supersonic Inlet at Mach 3

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohammadi M.H. ¹ MSc,
Asghari M. ^{*1} MSc

How to cite this article

Mohammadi M.H, Asghari M. A Model to Determining the State of Degradation and Remaining Useful Life of Rotating Equipment, With a New Approach to Combination and Predicting Health Index. Modares Mechanical Engineering, 2019; 19(10):2543-2550.

ABSTRACT

Supersonic inlet has a key role in the performance of air-breathing engine special in ramjet engines. The function of a ramjet engines diffuser is to decelerate the air velocity from its free-stream at the intake to a combustor velocity which is compatible with the available flame velocity. Accurate design of inlet has an important effect on the performance of a ramjet system and its main parameters. In this study, an axisymmetric external compression supersonic inlet designed at Mach 3. Flow behavior for this type of inlet is more complicated than the two-dimensional inlet. Because of this character, a computer program for solving the equations of supersonic flow through the cone, and the relationship between the parameters and the principles of the axisymmetric inlet has developed which integrates the final geometry, including center body geometrical details, inlet cowl and subsonic channel as output. Since viscous forces cannot be ignored because they cause complex shock patterns and flow separation, the simulation and flow behavior pattern is modeled and validated by computational fluid dynamics software. For this purpose, the RNG K- ϵ model was used for flow turbulence modeling and second-order accuracy was used for discretization of convection term. The results show that the designed geometry can meet the desired performance requirements.

Keywords Inlet; Supersonic; External Compression; Computational Fluid Dynamic

¹University Complex of Mechanical & Aerospace Engineering, MalekAshtar University of Technology, Isfahan, Iran

*Correspondence

Address: University Complex of Mechanical & Aerospace Engineering, MalekAshtar University of Technology, Isfahan, Iran
Phone: -
Fax: -
asghari@mut-es.ac.ir

Article History

Received: May 1, 2018
Accepted: February 23, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

[1] Numerical simulations of inviscid airflows in ramjet inlets [2] Effect of side gust on performance of external compression supersonic inlet [3] Intake aerodynamics. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1999 [4] Pressure recovery for missiles with reaction propulsion at high supersonic speeds (the efficiency of shock diffusers) [5] The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow [6] Reduced order modeling of a supersonic flow field [7] Inlets for supersonic missiles [8] Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient [9] Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows [10] Performance characteristics of axisymmetric two-cone and isentropic nose inlets at Mach number 1.90 [Internet]

طراحی و تحلیل عددی دهانه ورودی مافوق صوت متقارن محوری در عدد ماخ ۳

محمدحسین محمدی MSc

مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

منصور اصغری* MSc

مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

چکیده

دهانه ورودی مافوق صوت، نقش کلیدی در عملکرد موتورهای هوافتسی به ویژه موتورهای رمجت دارد. کاربرد دهانه ورودی در موتورهای رمجت این است که سرعت هوا را از جریان آزاد تا سرعتی که با سرعت شعله در دسترس در محفظه احتراق سازگار است، کاهش دهد. از اینرو طراحی دقیق و صحیح دهانه ورودی، تأثیر بسزایی بر عملکرد کل سیستم و پارامترهای اصلی موتور رمجت دارد. در کار حاضر یک دهانه ورودی تراکم خارجی متقارن محوری برای عملکرد در عدد ماخ پروازی ۳ طراحی شده است. از آنجا که رفتار جریان برای این نوع دهانه ورودی پیچیده‌تر از دهانه ورودی دوبعدی است یک برنامه کامپیوتری برای حل معادلات مربوط به گذر جریان مافوق صوت از روی مخروط و نیز ارتباط بین پارامترها و اصول و قیود طراحی دهانه ورودی متقارن محوری تدوین شده است که هندسه نهایی شامل جزئیات هندسی مخروط، کلاهک دهانه و کانال زیرصوتی را به صورت یکپارچه به عنوان خروجی رسم می‌کند. از آنجا که نیروهای لزجت را به دلیل تأثیر بر الگوی شاکها و جدایش جریان نمی‌توان نادیده گرفت، شبیه‌سازی و الگوی رفتار جریان لزج به وسیله نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و صحت‌سنجی شده است. بدین منظور از مدل RNG K-E برای مدل‌سازی اغتشاش جریان و از دقت مرتبه دوم برای گسسته‌سازی ترم جابجایی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هندسه طراحی شده می‌تواند الزامات عملکردی مورد نظر را برآورده سازد.

کلیدواژه‌ها: دهانه ورودی، مافوق صوت، تراکم خارجی، متقارن محوری، دینامیک سیالات محاسباتی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

*نویسنده مسئول: asghari@mut-es.ac.ir

۱- مقدمه

موشک‌های مافوق صوت هوافتسی، اکسیژن لازم برای فرآیند احتراق را از هوای پیرامون خود تامین می‌کنند. در سیستم‌های رانشی هوافتسی نقش دهانه ورودی بسیار حیاتی است. در موتورهای توربوجت، فرآیند فشرده‌سازی هوا توسط کمپرسور صورت می‌گیرد اما در موتورهای رمجت به علت عدم وجود کمپرسور، این وظیفه برعهده دهانه ورودی می‌باشد.

هنگام عبور جریان از شاک قائم، با افزایش عدد ماخ، افت فشار سکون با نرخ زیادی افزایش می‌یابد، از این‌رو برای اعداد ماخ بالا، استفاده از دهانه با تک شاک قائم، چندان معقولانه نیست. بنابراین بهتر است کاهش سرعت جریان از طریق مجموعه‌ای از شاک‌های مایل صورت گیرد که به دنبال آن یک شاک قائم انتهایی در حداقل عدد ماخ ممکن واقع شود؛ به عبارت دیگر فرآیند تراکم جریان در چند مرحله متوالی صورت گیرد.

در سیکل موتور رمجت، از دهانه ورودی به ترتیب فرآیندهای زیر انتظار می‌رود:

(الف) دریافت هوای پیرامون در سرعت مافوق صوت طراحی شده.

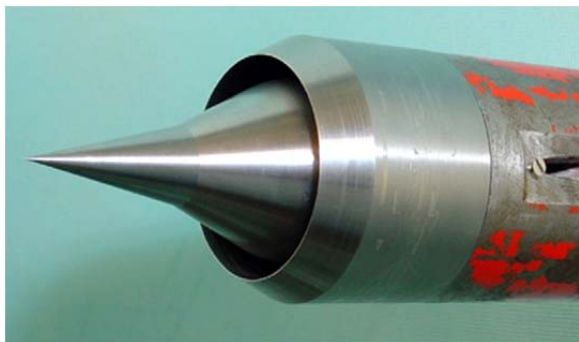
(ب) کاهش سرعت هوای ورودی با عبور از یک سری امواج ضربه‌ای مایل و به دنبال آن یک موج ضربه‌ای قائم (عموماً همچنان که جریان از بین امواج مایل عبور می‌کند جهت آن نیز دچار تغییر می‌شود).

(ج) تحویل هوای فشرده به محفظه احتراق با عدد ماخی که برای پایداری شعله در محفظه‌های احتراق مادون صوت مناسب باشد^[1]. علاوه بر موارد گفته‌شده انتظار می‌رود که دهانه ورودی، هوا را در یک سطح قابل قبولی از یکنواختی سرعت و فشار به محفظه احتراق تحویل دهد. همه این موارد احتراق پایدار را در محفظه احتراق موتور رمجت تضمین می‌کند. وظایف گفته‌شده باید در هر شرایط پروازی انجام گیرد. با این همه، دهانه ورودی باید حداکثر بازیافت فشار ممکن را فراهم کند. از آنجا که دهانه ورودی، یک بخش اساسی از سیکل موتور رمجت محسوب می‌شود، بازده آن مستقیماً بر عملکرد موتور تأثیرگذار است. لذا طراحی هندسه دهانه ورودی جهت حصول عملکرد مناسب، از اهمیت بالایی برخوردار است.

دهانه ورودی شامل یک جسم نوک تیز (جلو بدنه (Forebody)) یا جسم مرکزی (Centerbody)) جهت ایجاد یک یا چند شاک مایل و در ادامه یک کانال متصل به آن است.

تراکم اولیه توسط جسم مرکزی انجام می‌گیرد. چنانچه کل سیستم شاک اعم از شاک مایل و قائم در خارج از کانال دهانه انجام گیرد، سیستم تراکم خارجی نامیده می‌شود. اگر قسمتی از فرآیند تراکم جریان در خارج از کانال دهانه انجام گیرد، دهانه را تراکم مخلوط می‌گویند. هنگام طراحی دهانه ورودی مافوق صوت، افزایش عدد ماخ پروازی نیازمند تعداد موج ضربه‌ای مایل است تا بازیافت فشار کل را حفظ کند^[2].

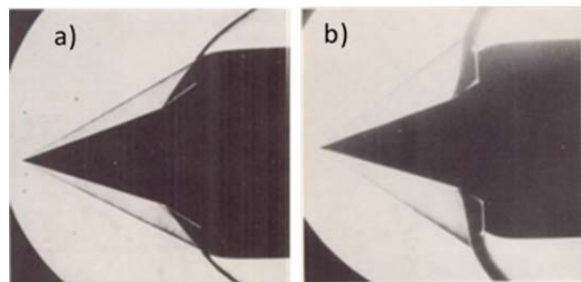
طراحی یک دهانه ورودی کارآمد امری حساس است زیرا فرآیند تراکم به دلیل وجود امواج ضربه‌ای نمی‌تواند آیزنتروپیک باشد. یکی از مهم‌ترین مسائل طراحی دهانه ورودی ایجاد الگوی شاک است که سبب شود آنتروپی جریان هوا تنها کمی افزایش یابد. بر این اساس قبل از اینکه جریان هوا وارد دیفیوزر تراکم داخلی مادون صوت شود یک تراکم خارجی موثری در جریان آزاد اتفاق می‌افتد. یک جسم مرکزی مخروطی شکل داخل یک دیفیوزر تراکم داخلی مادون صوت قرار می‌گیرد، بنابراین سیستم متقارن محوری بوده و نوک جسم مخروطی از دیفیوزر مادون صوت بیرون زده است. هنگامی که جریان مافوق صوت به نوک جسم مرکزی برخورد می‌کند به دلیل اثرات سه‌بعدی، یک موج مخروطی شکل می‌گیرد و هوای متراکم‌شده خارج شده از آن، از میان فضای حلقوی بین جسم مرکزی و جداره دهانه وارد دیفیوزر تراکم داخلی مادون صوت می‌شود و یک موج ضربه‌ای ضعیفی در لبه دیفیوزر شکل می‌گیرد و هوا با سرعت مادون صوت وارد دیفیوزر می‌شود. جسم مرکزی و کلاهک (Cowling) دهانه در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱) دهانه ورودی متقارن محوری دو مخروطی

به منظور دستیابی به بیشترین بازیافت فشار، اصل چند مرحله‌ای کردن تراکم مافوق صوت (اصل /سواتیش؛ Oswatitch)

پشت شاک قائم مادون صوت است و جریان از اطراف پوسته دهانه سرریز خواهد شد و پسای دهانه نیز افزایش خواهد یافت. به عملکرد دهانه در این شرایط، مادون بحرانی گفته می‌شود. شکل ۳ گوی شاک در حالت‌های بحرانی و مادون بحرانی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ (a) شرایط بحرانی و مادون بحرانی یک دهانه ورودی دو مخروطی؛ (b) عملکرد بحرانی، (c) عملکرد مادون بحرانی

۲- تئوری و الگوریتم طراحی

افت فشار کل یک سیستم تراکم چند مرحله‌ای مافوق صوت را می‌توان از دید بازیافت فشار کل مورد ملاحظه قرار داد. افت فشار کل در گذر از یک شاک عمودی با عدد ماخ ورودی مشخص دارای دو ویژگی است. اول آن که تا عدد ماخ حدود ۱/۴ افت کمتر از ۴٪ است و دوم آن که در اعداد ماخ بالاتر از ۱/۴ به ازای هر ۰/۱ افزایش عدد ماخ، نرخ افت ۴٪ افزایش می‌یابد. از آنجا که در شاک مایل قدرت شاک به مؤلفه عمودی عدد ماخ ورودی وابسته است این مسأله سبب می‌شود که حاصل ضرب $M_1 \sin \beta$ تغییرات کمی نسبت به M_1 داشته باشد و تا عدد ماخ حدود ۳ به ۱/۴ برسد. بنابراین افت فشار شاک مایل بیش از ۴٪ نمی‌شود، همچنین با افزایش تعداد شاک مایل به ویژه در اعداد ماخ بالا افت‌ها کاهش می‌یابند^[3]. مسأله اساسی برای طراحی دهانه این است که به ازای یک عدد ماخ داده شده کدام چیدمانی از شاک‌های مایل و شاک قائم انتهایی بهترین بازیافت فشار را به دست می‌دهد. /سواتیش به وسیله تحلیل نظری نشان داد که برای هر عدد ماخ پروازی مفروض و تعداد معین شاک مایل و سپس شاک عمودی نسبت فشار سکون، زمانی بیشینه است که شاک‌های مایل قدرت یکسانی داشته باشند. از آنجا که قدرت شاک مایل توسط مؤلفه عمود بر شاک تعیین می‌شود، این معنی آن است که $M_1 \sin \beta$ برای تمامی شاک‌ها به جز شاک قائم انتهایی با یکدیگر برابر باشند. همچنین نتیجه گرفت که عدد ماخ شاک عمودی انتهایی باید از مؤلفه عمودی شاک‌های مایل کمتر و در حدود ۰/۹۴ آن باشد^[4]. به عبارت دیگر:

$$M_1 \sin \beta_1 = M_2 \sin \beta_2, M_3 = 0.94 M_1 \sin \beta_1 \quad (1)$$

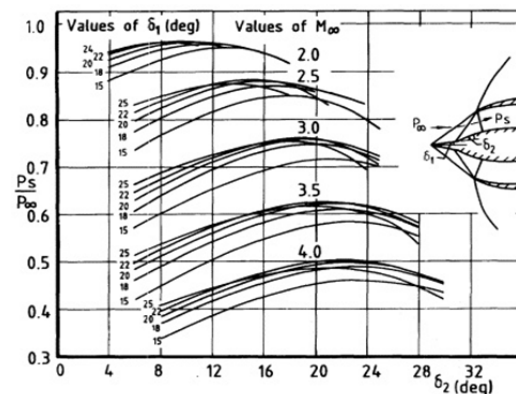
به همین صورت بازیافت فشار نیز از حاصل ضرب بازیافت فشار در عرض هر موج ضربه‌ای به دست می‌آید.

$$\frac{P_{04}}{P_{01}} = \frac{P_{02}}{P_{01}} \times \frac{P_{03}}{P_{02}} \times \frac{P_{04}}{P_{03}} \quad (2)$$

شکل ۴ شماتیک دهانه با سیستم سه شاکه را به همراه شماره‌گذاری مناطق مختلف جریان نشان می‌دهد. براساس روش ارائه شده توسط /سواتیش می‌توان زوایای مختلف شاک و به دنبال آن زاویه گوه یا مخروط را تعیین کرد. از شکل می‌توان دریافت که هم‌زمان با تراکم جریان به وسیله شاک‌های مایل و شاک قائم انتهایی، جریان از راستای ابتدایی خود دور می‌شود.

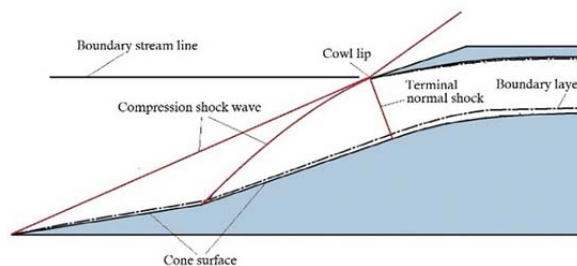
استفاده می‌شود تا افت‌های دهانه را با یک روش سودمند کاهش دهد. /سواتیش نشان داد که در یک دهانه ورودی، بیشینه بازیابی فشار زمانی حاصل می‌شود که شاک‌های مایل دارای قدرت یکسان باشند یا به عبارت دیگر عدد ماخ عمود بر شاک‌ها باید مساوی باشند.

مراحل تراکم یک دهانه تراکم خارجی می‌تواند تا هر چند مرحله‌ای که نتایج مطلوبی به دست دهد، افزایش یابد. ولی تعیین پارامترهایی مثل بیشینه نسبت جریان برای دهانه‌های چند شاکه در وضعیت‌های مختلف سطوح مخروط نسبت به یکدیگر، امری پیچیده بوده و به سهولت قابل تعیین نیستند. نمودار ۱ بازیافت فشار سکون را در زوایای مختلف مخروط اول و دوم نشان می‌دهد.



نمودار ۱ (a) بازیافت فشار شاک دهانه ورودی دو مخروطی^[3]

یکی از پارامترهای مهم دهانه ورودی میزان جذب جریان ورودی است. بیشینه نسبت جریان، زمانی حاصل می‌شود که جریان تا ورودی، مافوق صوت باقی بماند و لوله جریان آزاد بدون شکستگی به لبه دهانه برسد یا به عبارت دیگر نقطه تمرکز شاک‌های مایل و شاک عمودی انتهایی در لبه دهانه قرار گیرد. به این شرط، شرط جریان کامل گفته می‌شود. مقدار جریان ورودی، به عدد ماخ، زاویه جسم مرکزی و موقعیت لبه دهانه بستگی دارد. شکل ۲ نحوه قرارگیری شاک‌ها روی جسم مرکزی و همچنین خط جریان مرزی را نمایش می‌دهد.

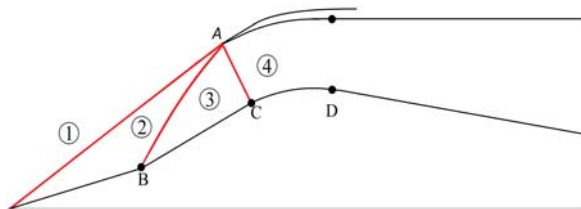


شکل ۲ شماتیک الگوی جریان در یک دهانه ورودی مافوق صوت متقارن محوری

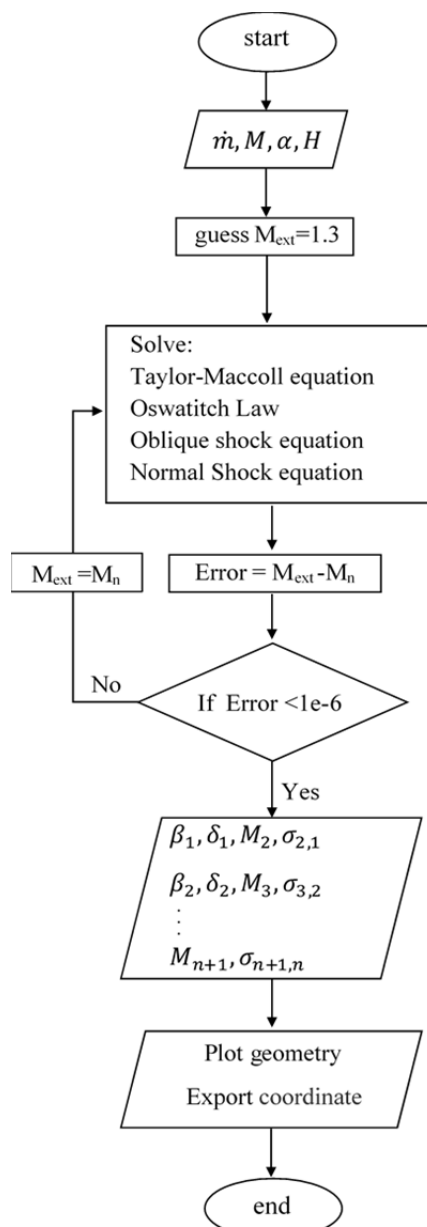
هنگامی که شاک قائم در لبه دیفیوزر قرار می‌گیرد عملکرد آن را بحرانی می‌گویند. هنگامی که فشار خروجی دیفیوزر مادون صوت کمتر از مقداری باشد که شاک قائم را در لبه نگه دارد، عملکرد دهانه را مافوق بحرانی می‌گویند که در این حالت بخشی از جریان داخلی، مافوق صوت است. اگر فشار خروجی دیفیوزر بیشتر از حالت بحرانی باشد شاک قائم انتهایی از دیفیوزر بیرون زده و به سمت نوک جسم مرکزی حرکت می‌کند در این شرایط، جریان در

در لبه کلاهدک باشد. در اینجا سطح داخلی با یک خط مسقیم با زاویه مناسب شروع شده و پس از آن به کمانی از دایره به صورت مماسی ادامه می‌یابد.

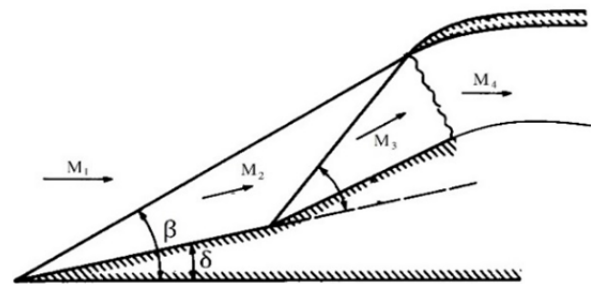
کد تدوین شده با حل معادلات ذکر شده و قیود اعمال شده، مطابق فلوجارت نشان داده شده در شکل ۶، هندسه دهانه ورودی را به صورت یکپارچه رسم و فایل مختصات هندسی را ذخیره می‌نماید. در نمودار ۲ هندسه یکپارچه رسم شده به وسیله کد قابل مشاهده است.



شکل ۵) نقاط مرزی در هندسه



شکل ۶) فلوجارت طراحی هندسه دهانه ورودی



شکل ۴) سیستم سه شاکه در آنالیز اسواتیش

در جریان‌های متقارن محوری، این آرایش چندان ساده به دست نمی‌آید زیرا جریان در پایین دست مخروط، یکنواخت نبوده و عدد ماخ پشت شاک مخروطی با افزایش فاصله از سطح افزایش می‌یابد و خطوط جریان پایین دست شاک، خمیده هستند [5, 6]. از این رو متوسط عدد ماخ خروجی از یک شاک برای ورود به شاک بعدی در نظر گرفته می‌شود و این مستلزم آن است که جریان در پشت شاک مخروطی حل شده و مشخصات آن در راستای هر پرتو عبوری از شاک به دست آید. در کد تدوین شده، با استفاده از حل روابط تیلور- مک کول این آنالیز انجام گرفته و میانگین پارامترهای مورد نیاز در پایین دست هر شاک مخروطی در اختیار قرار می‌گیرد. به منظور تعیین موقعیت شعاعی لبه دهانه، ابتدا شعاع خط جریان مرزی (خط جریانی که مرز بین جریان وارد شده به کانال و جریان عبوری از اطراف آن است) براساس دبی و مشخصات جریان آزاد ورودی توسط کاربر مقید می‌شود. زاویه داخلی لبه کلاهدک براساس مشخصات جریان خروجی از شاک‌های مخروطی مشخص می‌گردد. زاویه خارجی لبه باید به گونه‌ای باشد که یک شاک متصل را به وجود آورد. چنانچه شاک به صورت شاک جدا شده باشد جزئیات تراکم در لبه تغییر خواهد کرد و پسای خارجی دهانه افزایش خواهد یافت همچنین باید حداقل مقدار قابل ساخت را نیز در نظر گرفت. در این کد حداقل مقدار قابل ساخت به صورت ورودی از کاربر دریافت شده و با زاویه بیشینه جدایش که از حل معادلات موج مایل به دست آمده است مقایسه می‌شود و حداقل زاویه مناسب به صورت خودکار تعیین می‌گردد. محاسبات به صورت حل تکراری توسط کد تدوین شده ادامه می‌یابد تا روابط تحلیلی و قیود داده شده براساس داده‌های ورودی کاربر، ارضا شود. در طراحی جسم مرکزی، طول مخروط اول و دوم چنان تعیین می‌شود که مختصات شعاعی محل برخورد شاک‌ها متناظر با شعاع مورد نیاز برای عبور دبی تعیین شده باشد و خط جریان مرزی را قطع کند. شکل ۵ نقاط مرزی هندسه را نمایش می‌دهد. خط عمود بر جریان محلی که از نقطه تمرکز شاک‌ها (نقطه A) تا سطح مخروط دوم ادامه می‌یابد (نقطه C)، مرز جریان خارجی و جریان درونی دهانه است. پس از آن، سطح جسم مرکزی با معادله دایره‌ای، مماس به مخروط ادامه می‌یابد و یک خط مستقیم با معادله درجه یک، به کمان دایره‌ای مماس می‌شود. فرآیند پخش جریان مادون صوت، توسط کانال واگرا انجام می‌گیرد. زاویه واگرایی براساس مصالحه بین طول جسم مرکزی و مقدار مناسب برای اجتناب از جدایش جریان انجام می‌گیرد. زاویه کانال واگرایی عموماً بین ۵ تا ۸ درجه انتخاب می‌شود [7].

منحنی AE که سطح داخلی کانال را ایجاد می‌نماید باید به گونه‌ای باشد که با سطح جسم مرکزی، کانالی با واگرایی کم و یکنواخت را به وجود آورد. همچنین زاویه داخلی باید هم‌راستای جریان محلی

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right) \quad (6)$$

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (7)$$

برای سادگی کار و جلوگیری از حل جریان با در نظر گرفتن اغتشاشات در تمامی مقیاس‌ها، مدل‌های توربولانسی به کار می‌روند. به منظور شبیه‌سازی مدل اغتشاشی K-ε RNG انتخاب شده است. از مزایای این مدل می‌توان به پایداری، همگرایی ساده، حساسیت کم به شدت اغتشاشات جریان آزاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. همچنین این مدل، گذار لایه مرزی را بهتر از مدل Standard K-ε مدل کرده و در شبیه‌سازی جدایش لایه مرزی بهتر عمل می‌کند.^[8] ۹. معادلات انتقال برای مدل به کاررفته K-ε RNG به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

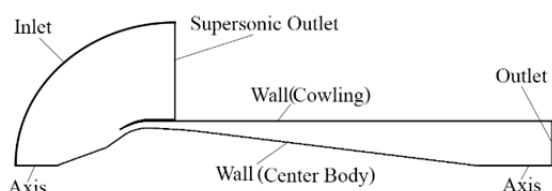
$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon - R_\varepsilon$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon}{(1 + \beta \eta^3) k}, \quad \eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad (9)$$

۴- شبیه‌سازی عددی

۴-۱- شبکه‌بندی و روش حل

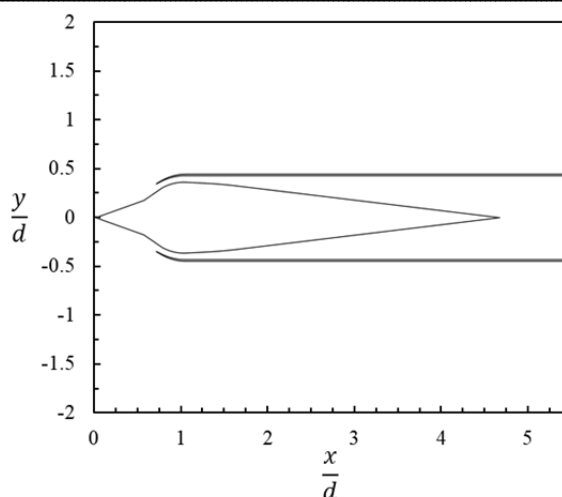
بررسی عملکرد دهانه و نیز درک از رفتار جریان شبیه‌سازی عددی با کد تجاری ANSYS CFX انجام گرفته است. شرایط عملکرد دهانه مطابق شرایط سطح دریا و ماخ ۳ اعمال شده است. از آنجا که میدان جریان دارای انحنا و گوشه‌های تیز است برای تطبیق بهتر شبکه با هندسه دهانه، از شبکه‌بندی بی‌سازمان استفاده شده است و در محل‌هایی که تغییرات پارامترها شدید است مانند محل ایجاد امواج شاک، شبکه ریزتر به کار رفته است. همچنین با توجه به تقارن هندسه نسبت به محور آن، از شرط تقارن محوری به منظور کاهش تعداد سلول مورد نیاز در شبیه‌سازی استفاده شده است. شرایط مرزی مطابق شرایط سطح دریا و عدد ماخ ۳ اعمال شده است. دامنه حل و شرایط مرزی در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷) دامنه حل و شرایط مرزی

۴-۲- صحت‌سنجی

برای اطمینان از نتایج حل عددی باید این نتایج با داده‌های حاصل از تست‌های عملی و آزمایشگاهی مطابقت داده شود و اگر خطا در حد قابل قبولی باشد می‌توان از نتایج استفاده کرد. به همین منظور از داده‌های تجربی مرجع^[10] استفاده شده است. در این مرجع یک دهانه ورودی مافوق صوت متقارن محوری دو مخروطی در عدد



نمودار ۲) هندسه خروجی از کد

در جدول ۱ می‌توان زوایای مخروط و توالی اعداد ماخ را مشاهده نمود. بازیافت فشار در گذر از کل سیستم شاک برابر ۰/۷۴ خواهد شد. واضح است که این عدد از روابط تئوری به دست آمده است و افت‌های ناشی از آثار لزجت، این عدد را کاهش خواهد داد.

جدول ۱) توالی زوایای شاک و اعداد ماخ

شماره ناحیه	δ	β	M	P_{01}/P_{01-1}
۱	-	-	۳	-
۲	۲۲/۷	۳۲/۲	۲/۲۱	۰/۸۹
۳	۱۸/۲۶	۴۵/۲	۱/۴۹۶	۰/۹۱
۴	-	-	۰/۷	۰/۹۲

۳- معادلات حاکم

در این تحلیل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و نیز معادلات آشفتگی جریان حل می‌شوند. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (3)$$

معادله بقای مومنتوم در جهت i به صورت زیر است.

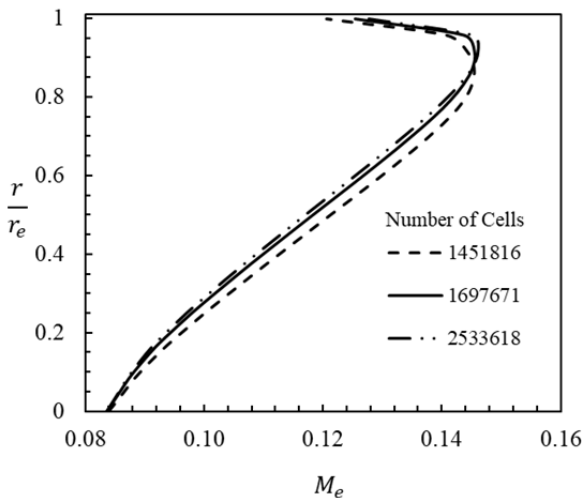
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g \quad (4)$$

در رابطه بالا p فشار استاتیکی و τ_{ij} تانسور تنش است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن μ لزجت مولکولی و ترم سمت راست ناشی از انبساط حجمی می‌باشد.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (5)$$

به دلیل تراکم‌پذیری جریان، حل معادله انرژی نیز ضروری است. معادله کلی انرژی به صورت زیر بیان می‌شود که در آن K_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر $(k_t + k)$ می‌باشد. k_t ضریب هدایت حرارتی جریان مغشوش، با توجه به مدل اغتشاشی به کاررفته می‌باشد. J_j' شار پخش گونه‌های j' می‌باشد، سه عبارت اول در سمت راست معادله به ترتیب بیان‌کننده انرژی به صورت هدایت، پخش گونه‌ها و پراکندگی لزجت می‌باشند و h آنتالپی کل مجموعه است.

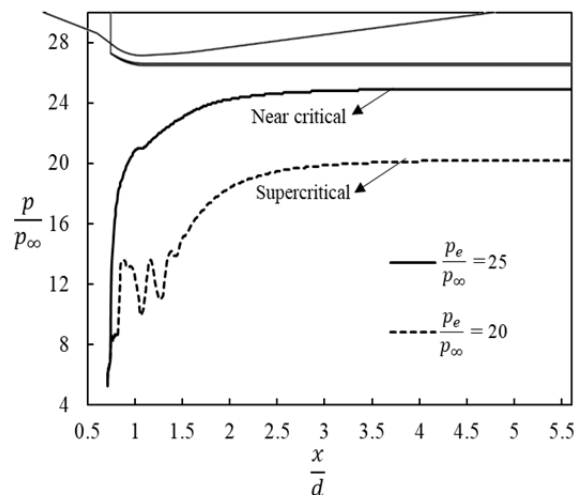
خاص، با ریزتر شدن شبکه، پروفیل عدد ماخ در خروجی دهانه تغییر نمی‌کند که نشان می‌دهد حل عددی مستقل از تعداد شبکه بوده و تعداد سلول بیشتر تاثیری بر نتایج نخواهد داشت.



نمودار ۴) اثر سایز شبکه بر پروفیل عدد ماخ در خروجی دهانه

۵- نتایج شبیه‌سازی

نمودار ۵ توزیع نسبت فشار استاتیک روی سطح داخلی کلاhek را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شرایط عملکرد بحرانی پس از شک قائم، فشار به صورت یکنواخت افزایش یافته است. در شرایط مافوق بحرانی، به دلیل انعکاس شک درون کانال دهانه، فشار استاتیک با کاهش و افزایش پی‌درپی (نوسان نامنظم) مواجه شده است.

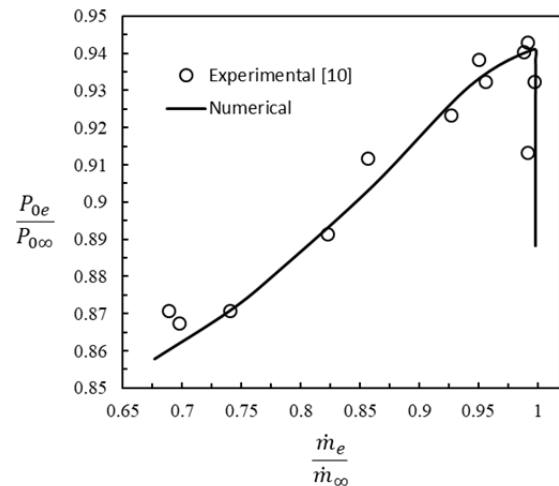


نمودار ۵) توزیع نسبت فشار استاتیک روی سطح داخلی کلاhek

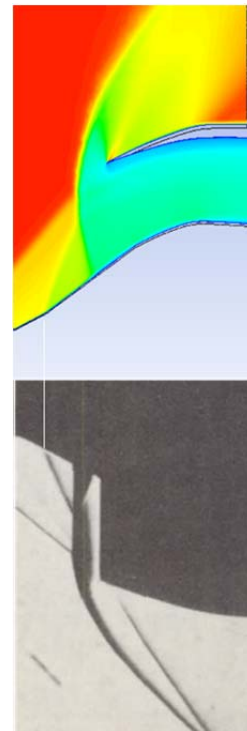
نمودار ۶ توزیع نسبت فشار استاتیک روی سطح جسم مرکزی در شرایط عملکرد بحرانی را نشان می‌دهد. موقعیت هر پرش ناگهانی نمودار، نشان‌دهنده موقعیت شک‌ها است. مشاهده می‌شود که شک مایل دوم در $\frac{x}{d} \approx 0.55$ واقع شده است که مطابق محل اولین پرش نمودار می‌باشد. کانتورهای فشار استاتیک و عدد ماخ را می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود.

ماخ ۱/۹ در تونل باد تست شده است و عملکرد آن شامل بازیافت فشار و درگ خارجی در دبی‌های جرمی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در صحت‌سنجی حل عددی در کار حاضر از نمودار تغییر بازیافت فشار با دبی جرمی ارائه‌شده در این مرجع استفاده شده است.

مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از حل و نتایج تجربی نشان می‌دهد که حل عددی از دقت مناسبی برخوردار است (نمودار ۳). در شکل ۸، کانتور عدد ماخ به‌دست‌آمده از حل عددی روی صفحه تقارن و تصویر شلیرین مشاهده می‌شود.



نمودار ۳) مقایسه عددی و تجربی داده‌ها در مرجع [10]

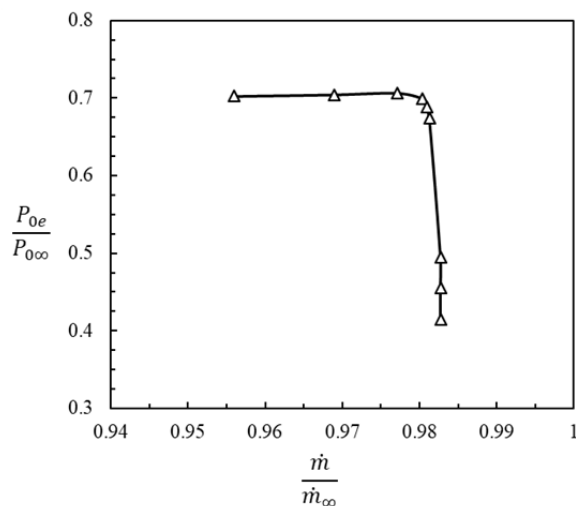


شکل ۸) تصویر شلیرین و کانتور عدد ماخ روی صفحه تقارن [10]

۴-۳- بررسی استقلال از شبکه

به‌منظور حصول اطمینان از عدم وابستگی نتایج حل به اندازه و تعداد سلول‌های شبکه، شبیه‌سازی جریان برای شبکه‌های مختلف صورت گرفته است. نمودار ۴ نشان می‌دهد که از یک تعداد سلول

منحنی مشخصه دهانه در نمودار ۸ آورده شده است. طبق این منحنی، با کاهش فشار پشت دهانه و همزمان با شروع رژیم مافوق بحرانی، دبی جرمی تقریباً ثابت بوده و چون شاک عمودی به سمت انتهای دهانه کشیده می‌شود بازیافت فشار پیوسته کاهش می‌یابد. با افزایش فشار پشت دهانه، شاک عمودی به سمت بالادست حرکت نموده و تا رسیدن به حالت بحرانی بازیافت فشار افزایش پیدا می‌کند. با افزایش بیشتر فشار پشت دهانه، شاک از لبه جدا شده و با افزایش سرریز جریان، دبی جرمی کاهش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که به دلیل ضخامت لبه کلاهی، جریان مقدار کمی سرریز داشته و دبی جرمی گذرنده از دهانه اندکی از حالت تئوری کمتر است.



نمودار ۸) منحنی عملکردی دهانه

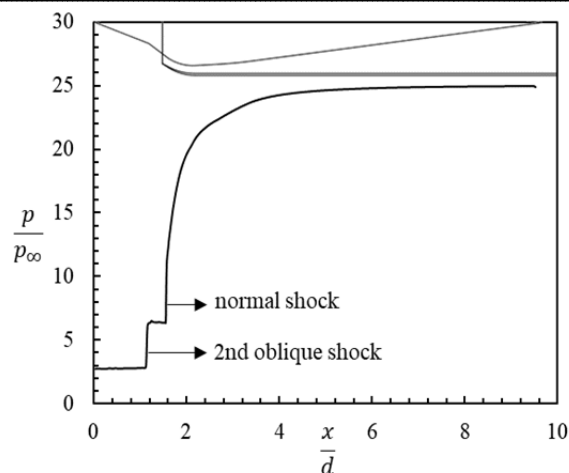
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کد برای طراحی دهانه ورودی مافوق صوت متقارن محوری تدوین شده است که براساس داده‌های وارد شده توسط کاربر، برای دستیابی به بیشترین بازیافت فشار، هندسه دهانه را به عنوان خروجی رسم می‌کند. به منظور رسم هندسه، از معادلات ریاضی منحنی‌ها و خطوط مستقیم استفاده شده است تا بتواند شکل دقیق‌تر و یکنواخت‌تری نتیجه دهد. به عنوان نمونه، یک دهانه دو مخروطی برای عملکرد در ماخ ۳ با استفاده از این کد، طراحی شده است و سپس با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی عملکرد آن در جریان لزج مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای توزیع فشار استاتیک و عدد ماخ در شرایط نزدیک به عملکرد بحرانی رسم شده‌اند و منحنی مشخصه دهانه در عدد ماخ طراحی به دست آورده شده است. نتایج نشان داد که مطابق انتظارات، هندسه طراحی شده می‌تواند الزامات عملکردی یک دهانه ورودی را در حد قابل قبولی برآورده سازد. از نتایج می‌توان دریافت که پارامترهای عملکردی مثل فشار سکون به دست آمده از کد، تنها ۴٪ با حل عددی اختلاف داشته که این میزان اختلاف نیز ناشی از تفاوت بین حل تئوری و شبیه‌سازی جریان لزج است. همچنین دبی جرمی تنها ۲٪ از مقدار طراحی کمتر بوده که شعاع لبه کلاهی در کاهش یا افزایش این عدد بی تأثیر نیست.

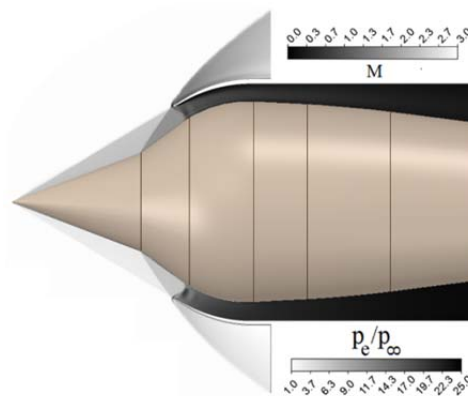
تشکر و قدردانی: موردی بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله در مجله دیگری منتشر نشده و همچنین تحت داوری مجله دیگری نیست.

تعارض منافع: این مقاله با منافع شخص یا سازمان دیگر هیچ

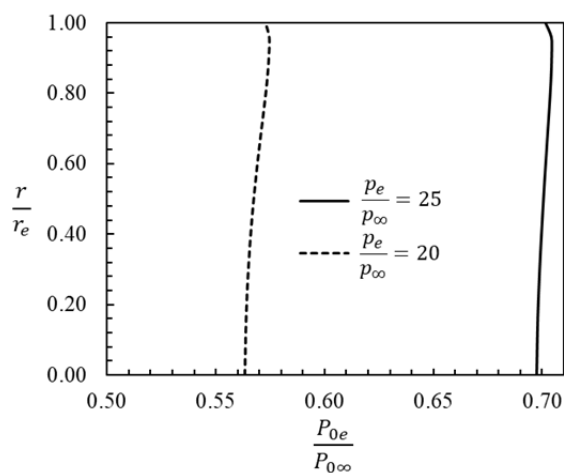


نمودار ۶) توزیع نسبت فشار استاتیک روی سطح جسم مرکزی



شکل ۹) کانتورهای عدد ماخ و فشار استاتیک

توزیع نسبت فشار سکون در خروجی دهانه در نمودار ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در عملکرد بحرانی میزان افت فشار سکون کمتر از حالت مافوق بحرانی است چرا که شاک قائم انتهایی و انعکاس امواج شاک درون کانال دهانه سبب افت فشار سکون خواهد شد. با افزایش فشار پشت دهانه، شاک قائم به سمت بالادست حرکت کرده و بازیافت فشار افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل اثرات لایه مرزی و جدایش جریان، در نزدیکی دیواره کلاهی و محور دهانه، بازیافت فشار کاهش می‌یابد. در هر دو عملکرد، بیشترین بازیافت فشار در $\frac{r}{r_e} \approx 0.92$ رخ می‌دهد.



نمودار ۷) توزیع نسبت فشار استاتیک در خروجی دهانه

2009;33(2):271-296.

2- Halwas HK, Aggarwal S. Effect of side gust on performance of external compression supersonic inlet. Journal of Aircraft. 2019;56(2):569-582.

3- Seddon J, Goldsmith EL. Intake aerodynamics. Reston VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1999.

4- Oswatitsch K. Pressure recovery for missiles with reaction propulsion at high supersonic speeds (the efficiency of shock diffusers). In: Schneider W, Platzer M, editors. Contributions to the development of gasdynamics. Brunswick: Vieweg+Teubner Verlag; 1980. pp. 290-323.

5- Shapiro AH. The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. 2nd Volume. Unknown City: Ronald Press Company; 1954.

6- Woolwine, Jansen KE, Kopasakis G, Connolly JW. Reduced order modeling of a supersonic flow field. Journal of Propulsion and Power. 2019;35(2):277-288.

7- Mahoney JJ. Inlets for supersonic missiles. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1990.

8- Wilcox DC. Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient. AIAA Journal. 1993;31(8):1414-1421.

9- Bulat MP, Bulat PV. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows. World Applied Sciences Journal. 2013;27(10):1263-1266.

10- Connors JF, Meyer RC. Performance characteristics of axisymmetric two-cone and isentropic nose inlets at Mach number 1.90 [Internet]. Denton TX: University of North Texas Libraries, Digital Library; 1955 [Unknown cited]. Available from: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc61659/m1/2/>

گونه تعارض منافعی ندارد.

سهم نویسندگان: محمدحسین محمدی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ منصور اصغری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)
منابع مالی: موردی بیان نشده است.

۷- فهرست علائم

d	حداکثر قطر دهانه (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg s^{-1})
$\dot{m}_\infty$	دبی جرمی تئوری جذب شده
M	عدد ماخ
n	تعداد شاک
p	فشار استاتیک (Nm^{-2})
P_0	فشار سکون (Nm^{-2})
r	حداکثر شعاع دهانه (m)
علائم یونانی	
α	زاویه خارجی کلاهک دهانه
β	زاویه شاک (Degree)
δ	زاویه مخروط (Degree)
σ	باز یافت فشار سکون
زیر نویس ها	
c	کلاهک
e	صفحه خروجی دهانه
ext	ناحیه قبل از شاک نرمال
∞	جریان آزاد

منابع

1- Akbarzadeh M, Kermani MJ. Numerical simulations of inviscid airflows in ramjet inlets. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering.