مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دوره 15، شماره 1، ص‌ص 117-125

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی تأثیر سطح مقطع تزریق جریان ثانویه بر میزان چرخش زاویه بردار نیرو در نازل‌های دارای دو گلوگاه

محمد هادی حامدی[1]، مهدی جهرمی[2*]، مصطفی محمودی[2]، جاماسب پیرکندی[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
2- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 15875-1774، jahromi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 مرداد 1393
پذیرش: 25 مهر 1393
ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:
کنترل بردار تراست
زاویه انحراف بردار تراست
راندمان بردارهی
ضریب تخلیه
ضریب تراست

چکیده

هدف این تحقیق شبیه‌سازی عملکرد، سیستم کنترل بردار تراست با استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه است. هندسه نازل با ابعاد مشخص و جریان مافوق صوت تراکم‌پذیر با سه مدل آشفتگی مختلف و نسبت فشار معین شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل آشفتگی SST K-ω رفتار جریان درون نازل‌های دارای دو گلوگاه را به درستی پیش‌بینی می‌کند. پس از اعتبارسنجی حل عددی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی موجود، تأثیر پارامترهای موثر، نظیر طول شیار ناحیه تزریق جریان ثانویه و درصد دبی جرمی ثانویه تزریق‌شده، بر عملکرد نازل و سیستم کنترل بردار تراست به کمک نازل‌های دارای دو گلوگاه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج عددی بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش طول شیار، زاویه بردارهی و بازدهی سیستم کنترل بردار تراست افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش طول شیار و با تزریق 7% دبی جرمی ثانویه، مقدار زاویه بردارهی نازل از 12درجه به 20 درجه می‌رسد. با افزایش طول شیار تزریق جریان ثانویه، ضریب تخلیه و ضریب تراست نازل افزایش می‌یابد. برای نمونه با چهار برابر نمودن طول شیار مقدار ضریب تخلیه نازل حدود 10% افزایش می‌یابد. از طرفی کاهش طول شیار و افزایش دبی جرمی جریان ثانویه منجر به کاهش ضریب تخلیه و ضریب تراست نازل می‌شود.

Effect of Secondary Flow Injection Area on Thrust Vectoring Angle in Double Throat Nozzles

Mohammad Hadi Hamedi[1], Mehdi Jahromi*[2], Mostafa Mahmodi[2], Jamasb Pirkandi[2]

1. Department of Aerospace, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran
2. Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.P. 15875-1774, Tehran, Iran, jahromi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 August 2014
Accepted 17 October 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:
Fluidic Thrust Vectoring
Pitch Thrust Vector Angle
Vectoring Efficiency
Discharge Coefficient
Thrust Coefficient

ABSTRACT

The present paper discusses a technique that can be used to vector the exhaust flow in the pitch directions using Double Throat nozzle (DTN). Compressible and supersonic gas flow inside a Double Throat nozzle and its exhaust plume at specific nozzle pressure ratios have been numerically studied with several turbulence models. Numerical results reveal that, the SST k–ω model gave the best results compared with the other models in time and accuracy. In the present research, effects of changes in injection area of secondary flow and percentage of secondary mass flow rate on performance of Double Throat nozzle and thrust vectoring system have been investigated. The predicted results show that by decreasing the value of secondary flow injection area in a case with 7% secondary injection, the thrust vector angle increases 12º to 20º and thrust vectoring efficiency will increase. But by increasing the value of secondary flow injection area, the thrust and discharge coefficient (10%) will increase. Also, when secondary mass flow rate increases, the discharge and thrust coefficient will decrease.

1- مقدمه

کنترل بردار تراست به کمک سیال[1]، تزریق‌کردن جریان سیال ثانویه به لایه مرزی جت اولیه و یا خارج کردن از آن است.

بردارهی تراست به کمک سیال، یک روش مفید درعین‌حال سبک، ساده، ارزان و بدون نیاز به قطعات متحرک (هندسه ثابت) است. تزریق سیال برای کنترل زاویه بردار تراست و کنترل سطح مقطع نازل بیش از چندین دهه است که مورد مطالعه قرار گرفته است. بر خلاف بردارهی مکانیکی که از سخت‌افزارهای سنگین برای بردارهی استفاده می‌کرد، کنترل بردار تراست به کمک سیال از یک جریان ثانویه که عموماً این سیال، هوای وزیده شده از فن یا کمپرسور موتور تأمین می‌شود، برای منحرف کردن جریان جت اولیه استفاده می‌کند. به طور کلی چهار مکانیزم مختلف برای بردارهی تراست به

1- Fluidic Thrust Vectoring

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. H. Hamedi, M. Jahromi, M. Mahmodi, J. Pirkandi, Effect of Secondary Flow Injection Area on Thrust Vectoring Angle in Double Throat Nozzles, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 117-125, 2015 (In Persian)

Archive of SID
www.SID.ir

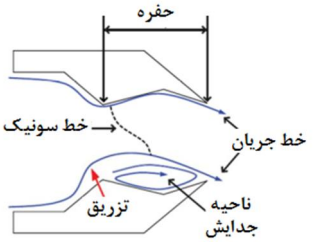
کمک سیال وجود دارد که بیش از دو دهه است که در حال تحقیق و توسعه است و عبارت‌اند از کنترل بردار ضربه[1]، نامتوزان کردن گلوگاه نازل[2]، روش جریان مخالف و روش جریان موافق[3] [1-3]. این روش‌ها می‌توانند برای بردارهی در جهت دوران حول محور افقی با زاویه بردار پیچ[4] (δ_p) یا در جهت دوران حول محور قائم با زاویه بردار انحراف[5] (δ_y) استفاده شوند. به طور کلی عملکرد سیستم کنترل بردار تراست با دو پارامتر، یکی زاویه بردارهی و دیگری بازدهی بردارهی (η) بیان می‌شود. زاویه بردارهی بیانگر مقدار زاویه انحراف بردار تراست نسبت به محور تقارن نازل و بازدهی بردارهی بیانگر میزان بردارهی، نسبت به درصد تزریق جریان ثانویه در نازل است. اما عملکرد نازل‌ها با دو پارامتر ضریب تراست (C_f) و ضریب تخلیه (C_d) بیان می‌شود.

روش کنترل بردار ضربه، روشی برای بردارهی تراست با تزریق سیال به درون جریان مافوق صوت پایین‌دست گلوگاه نازل است. در این روش از تشکیل موج‌های ضربه (شوک های قائم و مایل) در بخش واگرای نازل جهت کنترل بردار تراست بهره می‌گیرند. اما با توجه به اینکه، وجود امواج ضربه، سبب کاهش سرعت در پایین‌دست موج ضربه می‌شود، در نتیجه منجر به کاهش سرعت خروجی جریان از نازل شده و در نهایت سبب کاهش تراست و ضریب تراست سیستم می‌شود.[4].

روش جابجایی گلوگاه، با تزریق سیال درون گلوگاه نازل برای ایجاد جریان مادون صوت در بالادست نازل انجام می‌شود. جریان مادون صوت ایجاد شده دارای تلفات کمتری نسبت به جریان مافوق صوت است. بنابراین به دلیل کاهش شوک‌های مایل درون نازل، روش جابجایی گلوگاه، عموماً سبب ایجاد ضریب تراست بیشتری نسبت به روش کنترل بردار ضربه، هنگامی که بهترین عملکرد را در خارج از نقطه طراحی نازل دارد، می‌شود. اگرچه روش جابجایی گلوگاه اخیراً بهبود یافته است، اما امروزه، بیشترین زاویه بردار تراست گزارش شده به بیش از 6% جریان اضافه شده به موتور نیازمند است [5]. روش جریان موافق، تزریق سیال درون مجرای جریان ثانویه در راستای نازل اولیه است که سبب ایجاد دو جریان، یکی جریان موازی و دیگری بعد از گذشت فاصله محوری قابل ملاحظه، به صورت جریان اختلاطی می‌شود. جت ثانویه می‌بایست دارای سرعت بالایی باشد تا بتواند ناحیه کم‌فشاری تولید کند. در نتیجه وجود ناحیه کم‌فشار، جریان جت منحرف می‌شود. روش جریان مخالف (مکش جریان از طریق کانال ثانویه در نزدیکی گلوگاه) زاویه بردار تراست زیادی با تزریق جریان ثانویه کمتر فراهم می‌کند اما این روش نیازمند منبع مکش بوده و یکپارچگی بدنه جسم پرنده نیز باید شرایط خاصی داشته باشد. هانتر [6] با شبیه‌سازی عددی و فلام [7] به طور تجربی، سیستم کنترل بردار تراست به روش جریان مخالف را مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند.

در سال 2005 محققان در مرکز تحقیقات لانگلی[6] در ناسا[7] یک روش جدید بردارهی تراست را طراحی کردند[1]. این روش بدون اینکه در نسبت تراست سیستم تغییری ایجادکند، بازدهی بردارهی بیشتری نسبت به سایر روش‌های سنتی دارد. این طراحی جدید نازل، به وسیله کنترل کردن جدایش و بیشینه تغییرات فشار در یک حفره فرورفته که بین دو گلوگاه (مقاطع با کمترین سطح) ایجاد می‌شود، قابلیت بردارهی تراست را فراهم می‌کند. طراحی نازل‌های دارای دو گلوگاه[8] (DTN) در راستای ارتقا روش جابجایی گلوگاه، با تزریق سیال در بالادست کمترین سطح مقطع، برای کنترل جدایش و افزایش اختلاف فشار در حفره طراحی شده است. در حالت بدون بردارهی، هیچ تزریقی رخ نداده و خط سونیک و یا گلوگاه در کمترین مقطع خروجی نازل ایجاد می‌شود. در حالت بردارهی، تزریق سیال تقارن‌محوری، به کمترین سطح بالادست وارد شده و سبب ایجاد خط سونیک در بالادست خروجی و افزایش اختلاف فشار در طول دیواره حفره می‌شود. در شکل 1 چگونگی رفتار جریان درون نازل‌های دارای دو گلوگاه و تزریق سیال ثانویه در گلوگاه بالادست نشان داده شده است[1]. به طور تجربی، با استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه بازدهی بردارهی تراستی معادل 7/7% ایجاد می‌شود، درحالی‌که، بهترین بازدهی بردارهی تراست بدست آمده از روش جابجایی گلوگاه، مقدار 3/9% و از روش کنترل بردار ضربه مقدار 4/5% است [8].

در سال 2005، کد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با شبکه‌بندی ساختاریافته برای کمک به طراحی کنترل بردار تراست با جریان سیال به صورت دو بعدی توسط دیری و همکاران [1] توسعه پیدا کرد. در همان سال فلام و همکاران[8] مفاهیم نازل‌های دارای دو گلوگاه (DTN) را به صورت آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات لانگلی ناسا اعتبار سنجی نمودند. پس از گذشت دو سال، آن‌ها [9] مدل تقارن محوری یک نازل دارای دو گلوگاه را با نسبت انبساط مختلف و تأثیر آن بر بردارهی تراست و عملکرد نازل به صورت تجربی مورد آزمایش قراردادند. دیری و همکاران[11،10] با استفاده از روش‌های عددی، نازل دارای دو گلوگاه را برای کاربرد در هواپیماهای مافوق صوت با تغییر در متغیرهای هندسی نازل برای شرایط مختلف پروازی شامل بلند شدن، پرواز میانی و حالت کروز بررسی کرده‌اند. عملکرد درونی نازل و بردارهی تراست در نسبت فشارهای مختلف تا 10، با تزریق دبی جرمی جریان ثانویه تا 10 درصد جریان اولیه تعیین شده است. بررسی نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش زاویه واگرایی حفره تأثیر منفی بر ضریب تراست و زاویه بردارهی (δ_p) در تمامی نسبت فشارهای نازل (NPR) دارد. هنگامی که زاویه واگرایی افزایش پیدا می‌کند، ضریب تخلیه نیز به مقدار اندکی کاهش می‌یابد. در سال 2010 شین و همکاران [12] عملکرد نازل‌های دارای دو گلوگاه را با تغییر در دبی جرمی جریان ثانویه در نسبت فشارهای مختلف نازل به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها معادلات نویر-استوکس دو بعدی، پایا و تراکم‌پذیر را با روش حجم محدود و به کمک مدل آشفتگی k-ω تحلیل کردند. نتایج عددی بدست آمده برای کنترل موثر بردارهی تراست بر حسب ضریب تراست و ضریب تخلیه نازل را با نتایج تجربی موجود مقایسه کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که ضریب تخلیه نازل با افزایش دبی جرمی جریان ثانویه کاهش می‌یابد و مقدار زاویه بردارهی تراست افزایش می‌یابد.



شکل1 نمایش عملکرد نازل‌های DTN و تزریق جریان ثانویه [1]

2- Shock Vector Control
3- Throat Shifting or Skewing
4- Counter Flow and Co-flow
5- Pitch Vector Angle
6- Yaw Vector Angle
7- Langly Research Center (LaRC)
8- NASA
9- (DTN)Dual Throat Nozzle

www.SID.ir
Archive of SID

حیدری و پورامیر [13] تأثیر پارامترهایی از قبیل موقعیت، زاویه و دبی جریان ثانویه بر زاویه انحراف بردار تراست را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مقدار بهینه پاشش به موقعیت تزریق‌گر وابسته است. اخیراً در سال 2014 جو و همکاران[14] تأثیر حفره بر عملکرد نازل دارای دو گلوگاه را هنگامی که سیستم کنترل بردار تراست شروع به فعالیت می‌کند، مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل عددی گذرای آنها برای دو هندسه با ابعاد مختلف نشان می‌دهد که در هنگام آغاز به کار سیستم، نیروهای دینامیکی تولید شده، مشکلاتی برای سیستم هدایت و کنترل وسیله پرنده به وجود می‌آورد.

هدف این تحقیق شبیه‌سازی عملکرد، سیستم کنترل بردار تراست با استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه (DTN) است که در آن ضمن مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی گزارش شده توسط دیگر محققین به منظور دست‌یابی به حل عددی معتبر، به بررسی تأثیر پارامترهای موثر بر عملکرد این سیستم پرداخته شده است. تا کنون تأثیر پارامترهای هندسی نازل شامل طول حفره، زاویه همگرایی و واگرایی حفره و نسبت انبساط نازل توسط دیگر محققین مطالعه شده است اما تغییر طول شیار تزریق جریان ثانویه با دبی جرمی مختلف و تأثیر آن بر عملکرد بردارهی تراست نازل‌های دارای دو گلوگاه تا به حال مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق، تأثیر تغییر در طول شیار تزریق جریان ثانویه بر عملکرد نازل و سیستم کنترل بردار تراست مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

2- معادلات حاکم

نرم‌افزارهای تجاری برای شبیه‌سازی جریان‌های مختلف مدل‌های آشفتگی متفاوتی ارائه داده‌اند که می‌توان از هرکدام از این مدل‌ها بسته به شرایط خاص مسئله استفاده کرد [15]. در بخش‌های بعدی به طور خلاصه به معادلات مربوط به مدل آشفتگی k-ω و معادلات حاکم بر نازل‌های دارای دو گلوگاه اشاره شده است.

2-1- مدل آشفتگی انتقال تنش های برشی k-ω SST

فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی جریان آشفته تراکم‌پذیر به صورت رابطه (1) است[16].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho U) = 0 \qquad (1)$$

معادله رینولدز برای یک جریان تراکم‌پذیر در راستای x به صورت رابطه (2) است. که می‌توان این معادله را در راستای y و z نیز تعمیم داد[16].

$$\frac{\rho U)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho U U) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mathrm{div}(\mu\, \mathrm{grad}\, U) + \left[-\frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}\acute{v}})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}\acute{w}})}{\partial z}\right] + S_{Mx} \qquad (2)$$

معادله انتقال اسکالر برای جریان تراکم‌پذیر با رابطه (3) بیان می‌شود[16].

$$\frac{\rho U)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho U U) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mathrm{div}(\mu\, \mathrm{grad}\, U) + \left[-\frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}\acute{v}})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\overline{\acute{u}\acute{w}})}{\partial z}\right] + S_{Mx} \qquad (3)$$

به طور کلی ترم $\rho\overline{u'_i u'_j}$ را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز می‌نامند. تنها تفاوت معادلات جریان آرام با آشفته نیز حضور همین ترم است. به طور کلی این ترم، از لحاظ فیزیکی دارای مفهوم تنش نیست، بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی است[16].

به طور کلی مدل k-ω دارای دو نوع استاندارد و انتقال تنش برشی (SST) است. از جمله مزیت‌های مدل SST نسبت به مدل استاندارد در شبیه‌سازی جریاناتی با گرادیان فشار معکوس، ایرفویل‌ها و موج‌های ضربه‌ای است. مدل انتقال تنش برشی که توسط منتر[17] توسعه پیدا کرده است، مدلی دقیق و کارامد درمعادله نویسی نواحی نزدیک دیواره است. تعریف ویسکوزیته آشفتگی در این مدل با انتقال تنش برشی آشفته تصحیح می‌شوند. معادلات مربوط به انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ پراکندگی در رابطه‌های 4 و 5 بیان شده‌اند[15].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - \mathrm{Y}_k + S_k \qquad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - \mathrm{Y}_\omega + S_\omega \qquad (5)$$

درمعادلات فوق G_k نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی مربوط به گرادیان سرعت و G_ω نشان دهنده تولید ω است. Γ ، Y و S به ترتیب بیانگر پراکندگی مؤثر، پراکندگی آشفتگی و ترم تعریف‌شده توسط کاربر است. در مدل k-ω، پراکندگی مؤثر از طریق معادلات 6 و 7بدست می‌آید[15].

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \qquad (6)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \qquad (7)$$

دراین روابط σ_k و σ_ω به ترتیب بیانگر عدد پرانتل آشفتگی مربوط به k وω می‌باشند. ویسکوزیته آشفتگی از رابطه 8 محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \qquad (8)$$

روابط مربوط به تعیین ضریب میراکننده ویسکوزیته آشفتگی (α^*) به طور کامل در مرجع [15] بیان شده است.

2-2-روابط حاکم بر نازل‌های دارای دو گلوگاه

مقدار ضریب تخلیه (C_d) و ضریب تراست (C_f) در نازل‌های دارای دو گلوگاه با استفاده از روابط 9و 10 محاسبه می‌شود[9].

$$C_d = \frac{W_p + W_s}{W_{ip}} \qquad (9)$$

$$C_f = \frac{F_r}{F_{ip} + F_{is}} \qquad (10)$$

که در آن W_p بیانگر دبی وزنی اندازه‌گیری شده برای جت اولیه، W_s بیانگر دبی وزنی اندازه‌گیری شده برای جت ثانویه، W_{ip} بیانگر دبی وزنی ایده‌آل برای نازل اولیه، F_{ip} بیانگر تراست ایده‌آل آیزنتروپیک نازل اولیه و F_{is} بیانگر تراست ایده‌آل آیزنتروپیک نازل ثانویه است. مقدار F_r که بیانگر تراست برایند است با رابطه 11 بیان می‌شود [9].

$$F_r = \sqrt{{F_A}^2 + {F_N}^2} \qquad (11)$$

در آن F_A بیانگر نیروی محوری وF_N بیانگر نیروی عمودی اندازه‌گیری شده است. زاویه برآیند حول محور عرضی بردارهی تراست با رابطه 12 محاسبه می‌شود[9].

$$\delta_p = \tan^{-1}\frac{F_N}{F_A} \qquad (12)$$

بازدهی بردارهی تراست (η) با رابطه 13 بر حسب درجه بر درصد تزریق بیان می‌شود. این پارامتر بیانگر میزان زاویه چرخش بردار تراست نسبت به درصد دبی جرمی ثانویه تزریق شده به درون نازل است و یکای آن معادل درجه بر درصد تزریق است[9]. بنابراین بیشترین مقدار آن 1 نبوده و هر مقداری را می‌تواند اختیار کند. مفهوم آن بدین گونه است که، سیستم کنترل

www.SID.ir
Archive of SID

بردار تراست در ازای چند درصد تزریق دبی جرمی ثانویه، چند درجه می‌تواند در راستای نیروی تراست انحراف ایجاد نماید. مقدار بازدهی بردارده‌ی هنگامی به بیشینه مقدار خود نزدیک می‌شود که به ازای کمترین درصد تزریق، بیشترین انحراف در بردار تراست به وجود آید.

$$\eta = \frac{\delta_p}{W_s/(W_p + W_s)} \times 100 \quad (13)$$

جهت ساده‌سازی معادلات از رابطه (14) استفاده می‌شود. در این رابطه به جای درصد تزریق دبی جرمی ثانویه به دبی جرمی کل جریان ورودی (مجموع دبی جرمی اولیه و ثانویه) از پارامتر ϕ استفاده می‌شود.

$$\phi = W_s/(W_p + W_s) \quad (14)$$

مقدار F_{ip} و W_{ip} به تر تیب در معادلات 15 و 16 محاسبه می‌شوند[19،18].

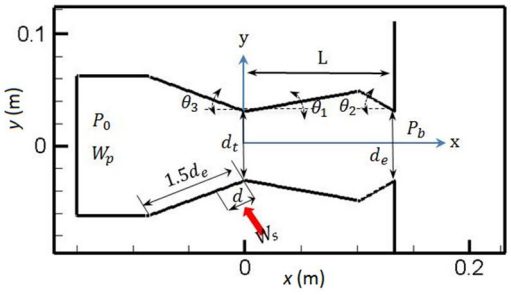
$$F_{\text{ideal}} = \dot{m}\sqrt{RT_0\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right)\left[1-\left(\frac{P_{\text{ambient}}}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad (15)$$

$$W_{\text{ideal}} = \frac{P_0 A_{\text{throat}}}{\sqrt{RT_0}}\sqrt{\gamma}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (16)$$

که در این معادلات γ بیانگر نرخ گرمای ویژه (γ=1.4) و R ثابت جهانی گازها (R=287.3 kJ/kgK) و P_0 و T_0 بیانگر فشار و دمای سکون می‌باشند.

3- تولید شبکه و شرایط مرزی

متغیرهای طراحی هندسه نازل دارای دو گلوگاه در شکل 2 نشان داده شده است[10.9]. هندسه نشان داده شده در این شکل، که سابقاً توسط قلام و همکاران [9] مورد آزمایش قرار گرفته بود به عنوان هندسه مبنا در شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر و اعتبارسنجی آن در نظر گرفته شده است. سپس تأثیر تغییر در اندازه d، بر پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست و نازل دارای دو گلوگاه بررسی شده است. در جدول 1 جزئیات ابعاد نازل دارای دو گلوگاه شبیه‌سازی شده نشان داده شده است[9-11].



شکل2 هندسه نازل دارای دو گلوگاه شبیه‌سازی شده

جدول1 جزئیات هندسه نازل شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار
d_e(cm)	6/15
d_t(cm)	6/15
L(cm)	13/36
θ_1(deg)	10
θ_2(deg)	30
θ_3(deg)	20
A_e/A_t	1

حفره، θ_3 بیانگر زاویه همگرایی نازل، d_t بیانگر کمترین ارتفاع بالادست و d_e بیانگر کمترین ارتفاع پایین دست نازل است. لازم به ذکر است نسبت سطح مقطع گلوگاه به سطح مقطع خروجی نازل، برابر یک در نظر گرفته شده است. برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه، نازل دارای دو گلوگاه، با سه اندازه سلول مختلف که جزئیات آن در جدول2 آمده است، به صورت مربعی شبکه‌بندی شده تا عدم وابستگی به شبکه محاسباتی، مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد.

نمایش استقلال محاسبات از شبکه با استفاده از مدل SST k-ω برای نسبت فشار استاتیکی محلی بر فشار مطلق کل ورودی (P/Pt) بر حسب نسبت فاصله محوری از مقطع ورودی بر طول کل نازل (x/L) بر روی دیواره فوقانی نازل برای سه شبکه‌بندی مختلف، در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به مطابقت نتایج بدست آمده از دو شبکه B و C به دلیل صرفه جویی در هزینه محاسباتی، از شبکه B برای تحلیل جریان درون نازل استفاده شده است. لازم به ذکر است که اندازه میانگین سلول‌ها در این شبکه، مقدار 0/6 میلی‌متر است.

در شکل 4 کل دامنه حل عددی، نمونه‌ای از شبکه انتخاب شده، ابعاد هندسه نازل و شرایط مرزی مختلف در نظرگرفته شده برای شبیه‌سازی جریان درون نازل نشان داده شده است. شرایط مرزی اعمال شده به این صورت است که در مقطع ورودی نازل، شرط مرزی فشار ورودی بر مبنای شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی متناظر با قطر خروجی اعمال شده است. در مقطع خروجی دامنه حل عددی، شرط مرزی فشار دوردست و برای دیواره‌های نازل شرایط آدیاباتیک و عدم لغزش در نظر گرفته شده است. جریان ثانویه نازل با شرط مرزی دبی جرمی ورودی ایجاد شده است. نسبت فشار نازل ($NPR = P_0/P_b$) به صورت متغیر در دو حالت 1/89 (نسبت فشار طراحی نازل) برای اعتبار سنجی حل عددی و مقدار 2 برای مطالعه پارامتیک اعمال شده است. دبی جرمی جریان ثانویه از صفر تا 10 درصد جریان اولیه نازل در نظر گرفته شده است. جزئیات مربوط به چگونگی شبیه‌سازی و تنظیمات مقادیر ورودی در جدول3 آمده است.

جدول 2 جزئیات شبکه‌های مختلف تولید شده (بر حسب mm)

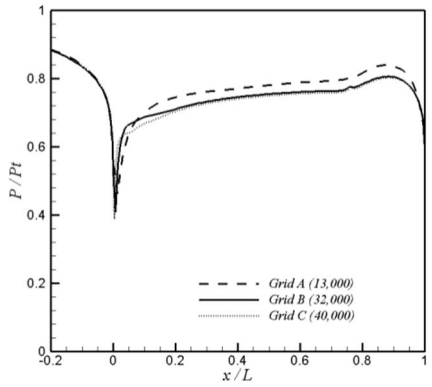
نام شبکه	شبکه A	شبکه B	شبکه C
اندازه سلول‌ها	0/8	0/6	0/3
تعداد سلول‌ها	13000	32000	4000

جدول 3 جزئیات چگونگی شبیه‌سازی انجام شده برای نازل مورد نظر

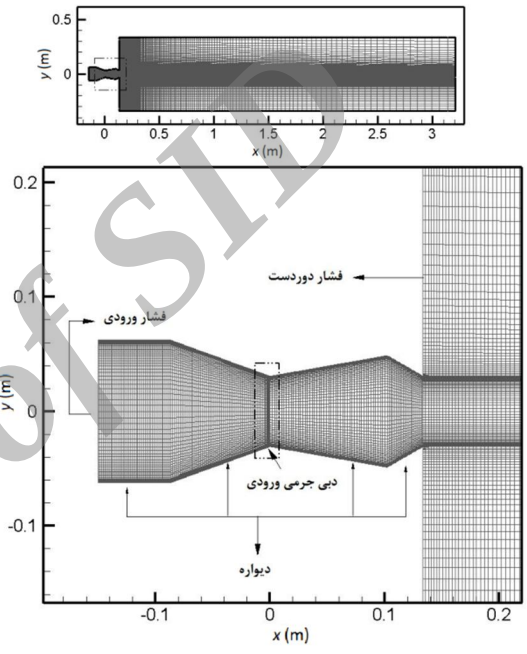
فضای حل	دو بعدی
مدل آشفتگی	SST k-ω
سیال	هوا
دمای سکون (T_0)	300 کلوین
فشار پشت (P_b)	101325 پاسکال
نسبت فشار طراحی	1/89
درصد تزریق جریان ثانویه	%10-0
شدت آشفتگی	%10
عدد ماخ جریان دوردست	0/01
قطر هیدرولیکی	11/59 سانتی‌متر

Archive of SID

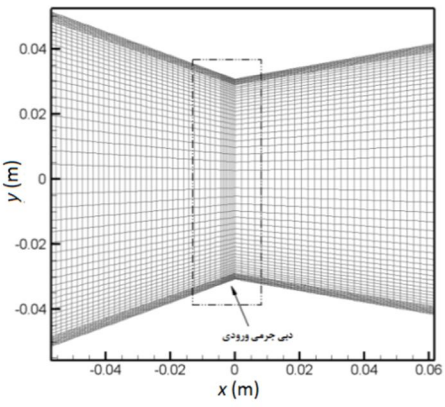
www.SID.ir



شکل 3 نمایش استقلال حل عددی از شبکه تولید شده



(الف)



(ب)

شکل 4 نمایش شبکه ایجاد شده (الف) کل دامنه حل عددی به همراه شرایط مرزی (ب) جزئیات شبکه‌بندی در نزدیکی گلوگاه نازل

4- اعتبار سنجی حل عددی

در این بخش عملکرد سیستم کنترل بردار تراست، به کمک نازل‌های دارای دو گلوگاه و تزریق جریان ثانویه، بررسی شده است. معادلات جریان، انرژی جنبشی آشفتگی و معادلات نرخ ویژه اضمحلال درون کانال بر مبنای روش حل مرتبه اول و با استفاده از نرم‌افزار تجاری Fluent نسخه 6.3.26 تحلیل شده و شرط همگرایی، کاهش خطای ناشی از حل معادلات تا مرتبه صدهزارم و همچنین مقایسه دبی جرمی در مقطع ورودی و خروجی تا دقت یک هزارم در نظر گرفته شده است.

عملکرد سه مدل آشفتگی مختلف با یکدیگر و نتایج تجربی مقایسه شده تا بتوان مدل آشفتگی که رفتار جریان درون نازل دارای دو گلوگاه را به درستی پیش‌بینی می‌کنند، برگزید. بدین منظور نتایج بدست آمده از سه مدل آشفتگی مختلف برای پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست در جدول4 آمده است. همان طور که در این جدول نشان داده شده نتایج بدست آمده با دقت قابل قبولی با یکدیگر یکسان هستند اما نتایج مدل SST k-ω دقیقاً با نتایج تجربی برابر است. بنابراین با توجه به نتایج دقیق‌تری که مدل SST K-ω ارائه می‌دهد، از این مدل برای شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر استفاده شده است.

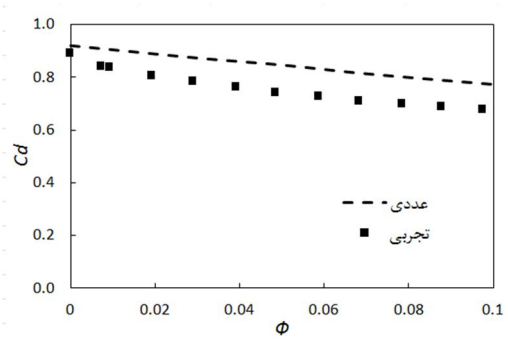
برای اعتبار سنجی حل عددی، جریان گاز مافوق صوت درون نازل شبکه‌بندی شده به صورت دو بعدی، با مدل آشفتگی انتقال تنش‌های برشی SST k-ω ، به صورت عددی تحلیل شده است. جریان گاز اولیه و ثانویه در این شبیه‌سازی‌ها، هوا در نظر گرفته شده است. دما و فشار محیط نیز، شرایط متعارف در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های 5 تا 8 نمودار مقایسه نتایج عددی بدست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی گزارش شده توسط فلام و همکاران[9] به ترتیب برای ضریب تخلیه و تراست نازل، بازدهی و زاویه انحراف بردار تراست با نسبت فشار طراحی نازل بر حسب دبی جرمی جریان ثانویه از صفر تا 10 درصد جریان اولیه نازل نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج عددی بدست آمده با اختلاف کمتر از 10% با نتایج تجربی مطابقت دارند. با افزایش درصد دبی جرمی ثانویه، مقدار ضریب تراست، ضریب تخلیه نازل و بازدهی سیستم کنترل بردار تراست کاهش می‌یابد. همچنین اگر با تزریق جریان ثانویه کمتر، زاویه بردارده‌ی بیشتری ایجاد شود، سیستم کنترل بردار تراست از بازدهی بیشتری برخوردار خواهد بود.

جدول 4 مقایسه نتایج سه مدل آشفتگی مختلف

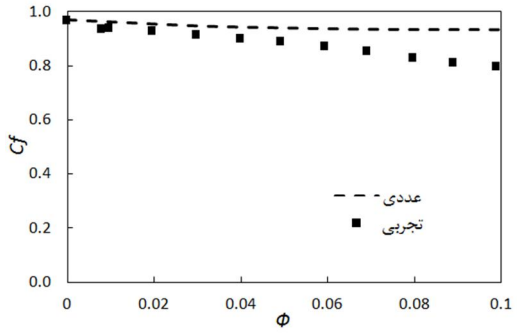
C_f	C_d	
0/98	0/89	RSM
0/99	0/89	k-ε
0/97	0/89	SST k-ω
0/97	0/89	تجربی



شکل 5 مقایسه نتایج عددی و تجربی برای ضریب تخلیه

Archive of SID

www.SID.ir

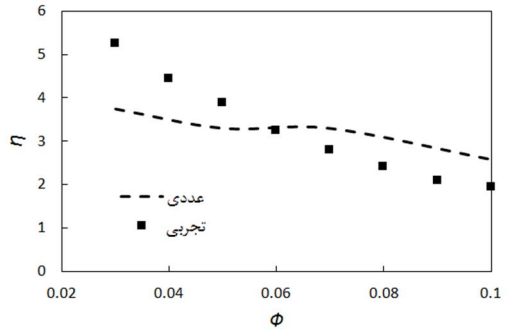


شکل 6 مقایسه نتایج عددی و تجربی برای ضریب تراست

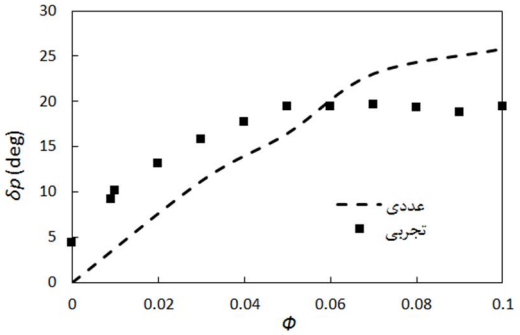
همانطور که در این دو شکل مشاهده می‌شود، نتایج عددی بدست آمده با اختلاف کمتر از 10% با نتایج تجربی مطابقت دارند. با افزایش درصد دبی جرمی ثانویه، مقدار ضریب تراست و ضریب تخلیه نازل کاهش می‌یابد.

تغییر رفتار بازدهی بردارهی در شکل 7 نشان می‌دهد که هر چقدر بتوان با تزریق جریان ثانویه کمتر، زاویه بردارهی بیشتری را تولید نمود، سیستم کنترل بردار تراست از بازدهی بیشتری برخوردار خواهد بود. شکل 8 نشان می‌دهد که نتایج تجربی گزارش شده برای مقدار زاویه انحراف بردار تراست، با رفتار واقعی جریان اختلاف دارد، به طوری که در حالت بدون تزریق جریان ثانویه، مقدار زاویه انحراف بدست آمده در آزمایشگاه حدود 5 درجه است، درحالی‌که به دلیل تقارن نازل هیچ‌گونه انحرافی نباید در بردار تراست مشاهده شود. این در حالی است که در حالت بدون تزریق نتایج عددی بدست آمده، مقدار زاویه بردارهی را به درستی پیش‌بینی کرده و مقدار صفر را نشان می‌دهد. به همین دلیل تا حدودی احتمال وجود خطا در نتایج تجربی وجود دارد.

در مجموع وجود اختلاف کمتر از 10% در مقایسه نتایج عددی و تجربی برای پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست، با در نظر گرفتن وجود خطا در نتایج تجربی، صحت شبیه‌سازی عددی انجام شده را تأیید می‌نماید.



شکل 7 مقایسه نتایج عددی و تجربی برای بازدهی بردارهی



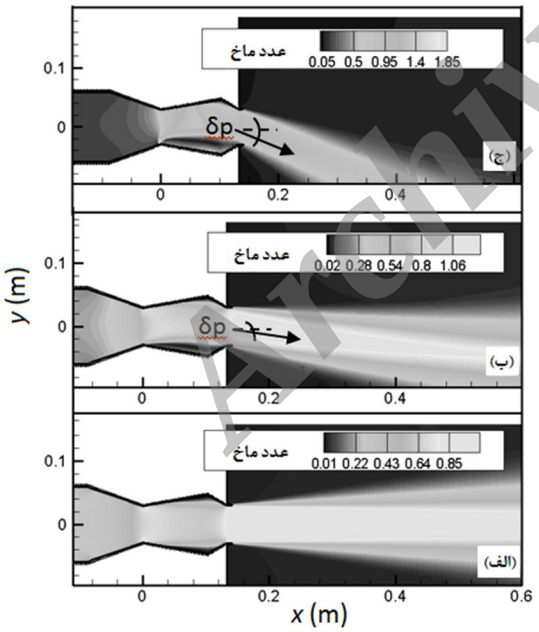
شکل 8 مقایسه نتایج عددی و تجربی برای زاویه بردارهی

در شکل 9 کانتور عدد ماخ، برای نازل دارای دو گلوگاه با هندسه اصلی مورد نظر، با دبی جرمی جریان ثانویه مختلف (بدون تزریق، 3% و 10%) در نسبت انبساط 2 نشان داده شده است. تأثیر افزایش دبی جرمی ثانویه بر عملکرد سیستم کنترل بردار تراست در این شکل به خوبی نشان داده شده است.

5- بحث و بررسی نتایج

در بررسی تأثیر سطح مقطع تزریق جریان ثانویه بر عملکرد نازل‌های دارای دو گلوگاه و سیستم کنترل بردار تراست، چهار نازل با اندازه طول شیار (d) تزریق جریان ثانویه مختلف با شرایط اشاره‌شده در بخش‌های قبلی شبیه‌سازی شده است. در جدول5 جزئیات ابعاد شیارهای در نظر گرفته شده برای مقطع جریان ثانویه نشان داده شده است.

هندسه نازل مورد بررسی، همان هندسه‌ای است که سابقاً توسط محققان [10،9] به عنوان هندسه مبنا، به صورت عددی دو بعدی، سه بعدی و تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که در هر دو مرجع [10،9] با تغییر در چند پارامتر هندسی، مطالعه پارامتریک انجام شده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر نیز همین هندسه به عنوان هندسه مبنا در نظر گرفته شده و با تغییر در طول شیار، تأثیر آن بر عملکرد کنترل بردار تراست مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، پارامتر d در این شبیه‌سازی‌ها، برابر با قطر مجرای جریان ثانویه هندسه‌ای است که فلام و همکاران [9] به صورت تجربی و دیری و همکاران [10] به صورت عددی مطالعه کرده‌اند. مقدار این پارامتر برابر0/234 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین برای مطالعه پارامتریک تأثیر سطح مقطع تزریق جریان ثانویه، نسبت فشار نازل2 در شبیه‌سازی‌ها اعمال شده است.



شکل 9 نمایش کانتور عدد ماخ با درصد دبی جرمی ثانویه مختلف (الف) بدون تزریق، (ب) 3% و (ج) 10%

جدول 5 جزئیات ابعاد شیارتزریق جریان ثانویه شبیه‌سازی شده

حالت	مقدار (cm)	رابطه
حالت 1	0/117	D_1 =0/5d
حالت 2	0/234	D_2 = d
حالت 3	0/351	D_3 =1/5d
حالت 4	0/468	D_4 = 2d

www.SID.ir
Archive of SID

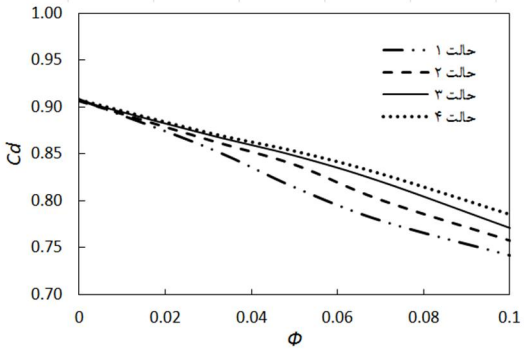
باید توجه داشت که با ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی ثانویه، سطح مقطع تزریق جریان با سرعت جریان ثانویه ورودی رابطه معکوس دارد و این بدین معنی است که با کاهش سطح مقطع تزریق جریان، عملاً مومنتوم جریان ثانویه افزایش می‌یابد. بنابراین، در این بخش به طور غیرمستقیم، تأثیر تغییر در مومنتوم جریان ثانویه بر زاویه و بازدهی بردارده‌ی تراست مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل 10 ضریب تخلیه بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها برای شیارهای مختلف بر حسب نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به کل جریان، نشان داده شده است. همانطور که در شکل10 نشان داده شده است، با افزایش طول شیار تزریق جریان ثانویه، ضریب تخلیه نازل افزایش می‌یابد اما با افزایش درصد تزریق جریان ثانویه ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. برای نمونه با افزایش طول شیار از حالت 1 به حالت4 و با تزریق 7% دبی جرمی ثانویه، مقدار ضریب تخلیه نازل حدود 10% افزایش می‌یابد.

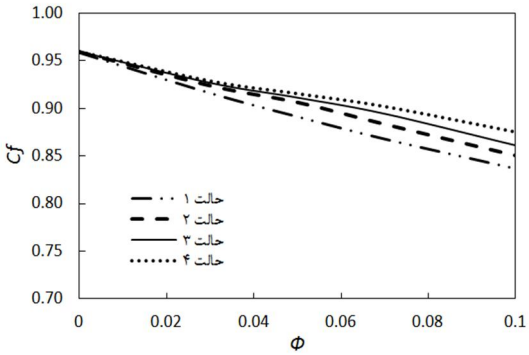
نتایج بدست آمده برای ضریب تراست نازل با اندازه شیارهای مختلف در شکل11 نشان داده است. با توجه به نحوه تغییرات ضریب تراست بر حسب درصد دبی جرمی و مقایسه آن با شکل 10، این نتیجه حاصل می‌شود که رفتار ضریب تراست مشابه ضریب تخلیه است. شکل10 و 11 نشان می‌دهند که با افزایش تزریق جریان ثانویه به درون نازل دارای دو گلوگاه ضریب تراست و ضریب تخلیه نازل کاهش می‌یابد، که این مطلب، از جمله معایب سیستم کنترل بردار تراست با استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه به شمار می‌آید.

درصد افت تراست ایجاد شده در اثر تزریق جریان ثانویه نسبت به حالت بدون تزریق برای شیارهای با ابعاد مختلف بر حسب درصد دبی جرمی ثانویه با یکدیگر مقایسه شده و در شکل 12 نشان داده شده است.

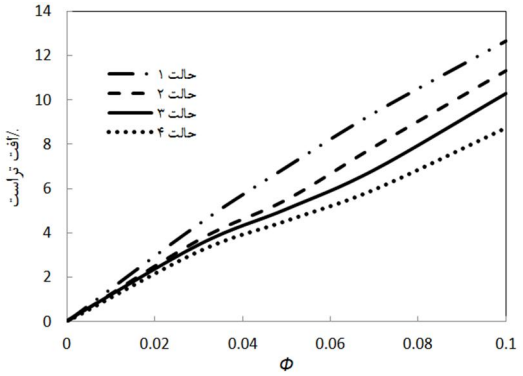
همانطور که در شکل 12 مشاهده می‌شود در حالت1 (کوچک‌ترین شیار) بیشترین درصد افت تراست نسبت به حالت بدون تزریق جریان ثانویه به



شکل 10 مقایسه ضریب تخلیه بدست آمده با شیارهای مختلف



شکل 11 مقایسه ضریب تراست بدست آمده با شیارهای مختلف



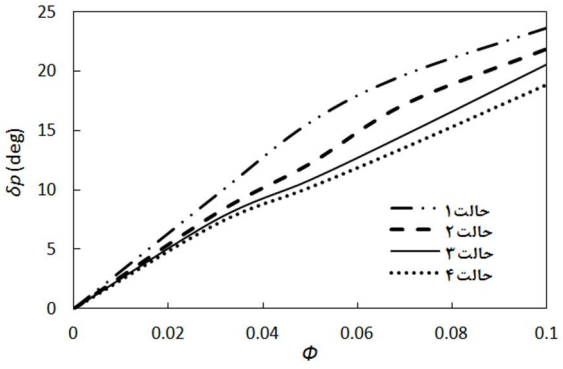
شکل 12 مقایسه درصد افت تراست ایجاد شده نسبت به حالت بدون تزریق

وجود می‌آید و به طور کلی با افزایش طول شیار تزریق، مقدار افت تراست سیستم کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه برای تزریق 10% جریان ثانویه، نازل با کوچک‌ترین شیار مقدار 13% و با بزرگ‌ترین شیار مقدار 8% افت تراست در سیستم ایجاد می‌کنند.

در شکل‌های 13 و 14 به ترتیب، نحوه تغییرات زاویه بردارده‌ی (درجه) و بازدهی برداده‌ی تراست بر حسب تغییرات طول شیار و درصد دبی جرمی نشان داده شده است. در این شکل‌ها به خوبی مشهود است که با کاهش طول شیار تزریق جریان ثانویه، زاویه و بازدهی بردارده‌ی تراست بدست آمده افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش طول شیار از حالت4 به حالت1 و با تزریق 7%دبی جرمی ثانویه، مقدار زاویه بردارده‌ی نازل از 12درجه به 20 درجه می‌رسد. همچنین با افزایش درصد دبی ثانویه میزان زاویه بردارده‌ی تراست افزایش و بازدهی بردارده‌ی کاهش می‌یابد.

از جمله معایب استفاده از روش استفاده از نازل دارای دو گلوگاه برای کنترل بردار تراست می‌توان به این مطلب اشاره کرد که جهت افزایش زاویه انحراف در بردار تراست به درصد تزریق جریان ثانویه بیشتری نیاز است درحالی‌که با این عمل (افزایش تزریق دبی جرمی جریان ثانویه) ضریب تخلیه و ضریب تراست نازل کاهش می‌یابد. به طور دقیق‌تر با افزایش درصد تزریق، بازدهی سیستم کنترل بردار تراست کم می‌شود. بدین منظور که در مواقعی که زاویه انحراف بیشتری در بردار تراست نیاز باشد، تراست سیستم با کاهش مواجه می‌شود.

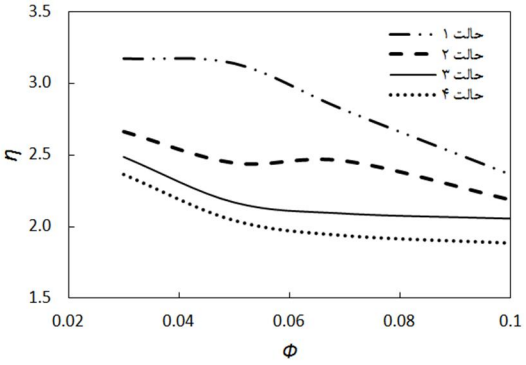
در شکل 15 تأثیر تغییر در طول شیار تزریق جریان ثانویه بر عملکرد سیستم کنترل تراست با 3% تزریق دبی جرمی به صورت کانتور عدد ماخ نشان داده شده است. از شکل 13 نیز بر می‌آید که با افزایش طول شیار، زاویه بردارهی تراست کاهش می‌یابد.



شکل 13 مقایسه زاویه بردارهی (درجه) بدست آمده با شیارهای مختلف

Archive of SID

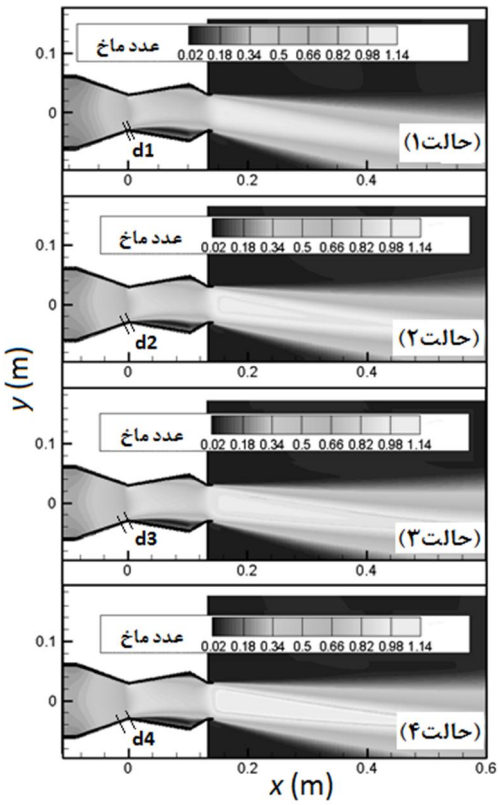
www.SID.ir



شکل 14 مقایسه بازدهی بردارهی بدست آمده با شیارهای مختلف

به طور کلی نتایج حاصله از بررسی تأثیر تغییر در طول شیار تزریق جریان ثانویه، نشان می‌دهند که افزایش طول شیار، باعث می‌شود که پارامترهای عملکردی نازل (ضریب تراست و ضریب تخلیه) کاهش یابند اما پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست (بازدهی و زاویه بردارهی) افزایش یابند. بنابراین برای طراحی سیستم کنترل بردار تراست، در مواقعی که به انحراف بیشتر بردار تراست نیاز باشد از شیار با طول کمتراستفاده می‌شود و در مواقعی که نیاز به تراست بیشتر است از شیار با طول بیشتر استفاده می‌شود.

لازم به ذکر است که تا کنون مطالعات انجام شده در این زمینه، فقط بر روی مقیاس آزمایشگاهی سیستم کنترل بردار تراست به کمک نازل‌های دارای دو گلوگاه انجام شده است و هنوز به صورت واقعی عملیاتی نشده است. به همین دلیل محدوده نیرو و سرعت نیز در بازه محدودی قرار دارد تا بتوان به صورت تجربی در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار داد.



شکل 15 نمایش کانتور عدد ماخ با اندازه شیارهای تزریق جریان ثانویه مختلف

6- نتیجه گیری

در این تحقیق، عملکرد نازل‌های دارای دو گلوگاه و سیستم کنترل بردار تراست به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. هندسه نازل با ابعاد معین و جریان مافوق صوت تراکم‌پذیر با مدل آشفتگی SST K-ω با نسبت فشار (NPR) معین شبیه‌سازی شد. پس از اعتبار سنجی حل عددی و مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تجربی موجود، تأثیر سطح مقطع تزریق جریان ثانویه بر پارامترهای عملکردی نازل از قبیل ضریب تخلیه (C_d) و ضریب تراست (C_f) و همچنین پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست نظیر بازدهی بردارهی (η) و زاویه بردارهی تراست (δ_p) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- با افزایش دبی جرمی ثانویه، مقدار ضریب تراست، ضریب تخلیه نازل و بازدهی سیستم کنترل بردار تراست کاهش یافته و میزان زاویه بردارهی افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول شیار تزریق جریان ثانویه، ضریب تخلیه و ضریب تراست نازل افزایش می‌یابد. برای نمونه با افزایش طول شیار از حالت1به حالت4 (با چهار برابر نمودن طول شیار) و با تزریق 7%دبی جرمی ثانویه، مقدار ضریب تخلیه نازل حدود 10% افزایش می‌یابد.
- ضریب تخلیه نازل با افزایش دبی جرمی جریان ثانویه کاهش می‌یابد، که این یکی از مشکلات استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه است که تأثیر نامطلوب در عملکرد موتور ایجاد می‌نماید.
- میزان شیب تغییرات ضریب تراست بیشتر از مقدار ضریب تخلیه است که این مسئله بیانگر این مطلب است که با افزایش تزریق دبی جریان ثانویه به درون نازل دارای دو گلوگاه ضریب تراست نازل بیشتر از ضریب تخلیه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تأثیرات نامطلوب سیستم کنترل بردار تراست با استفاده از نازل‌های دارای دو گلوگاه بر ضریب تراست کمتر از ضریب تخلیه است.
- بیشترین درصد افت تراست نسبت به حالت بدون تزریق جریان ثانویه، در حالت1 (کوچکترین شیار) به وجود می‌آید و به طور کلی با افزایش طول شیار تزریق، مقدار افت تراست سیستم کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه برای تزریق 10% جریان ثانویه، نازل با کوچکترین شیار مقدار 13% و با بزرگترین شیار مقدار 8% افت تراست در سیستم ایجاد می‌کنند.
- با کاهش طول شیار تزریق جریان ثانویه، زاویه بردارهی و بازدهی سیستم کنترل بردار تراست افزایش می‌یابد. به طوری که با کاهش طول شیار از حالت4 به حالت1 و با تزریق 7%دبی جرمی ثانویه، مقدار زاویه بردارهی نازل از 12درجه به 20 درجه می‌رسد.
- افزایش طول شیار تزریق جریان ثانویه، باعث می‌شود که پارامترهای عملکردی نازل (ضریب تراست و ضریب تخلیه) کاهش یابند اما پارامترهای عملکردی سیستم کنترل بردار تراست (بازدهی و زاویه بردارهی) افزایش یابند.

Archive of SID

www.SID.ir

7- فهرست علائم

A_t	سطح مقطع گلوگاه نازل (cm^2)
A_e	سطح مقطع خروجی نازل (cm^2)
C_d	ضریب تخلیه نازل
C_f	ضریب تراست نازل
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
d	طول شیار تزریق جریان ثانویه (cm)
DTN	نازل‌های دارای دوگلوگاه
F_A	نیروی محوری (N)
F_{ip}	تراست آیزنتروپیک جریان اولیه (N)
F_{is}	تراست آیزنتروپیک جریان ثانویه (N)
F_N	نیروی عمودی(N)
F_r	نیروی برآیند(N)
l	طول حفره نازل اولیه (cm)
M	عدد ماخ
NPR	نسبت فشار نازل
P_a	فشار محیط (Pa)
P_b	فشار پشت نازل(Pa)
$P_t\,(P_0)$	فشار سکون (Pa)
T_0	دمای سکون (K)
W_{ip}	دبی جرمی ایده‌آل جریان اولیه
W_p	دبی جرمی جریان اولیه
W_s	دبی جرمی جریان ثانویه
k	انرژی جنبشی جریان آشفته(m^2/s^2)
u	سرعت گاز(m/s)
u'	سرعت نوسانی(m/s)

علائم یونانی

δ_p	زاویه بردارده‌ی حول محور افقی (درجه)
η	بازدهی سیستم کنترل بردار تراست
Θ_1	زاویه واگرایی حفره نازل (درجه)
Θ_2	زاویه همگرایی حفره نازل (درجه)
Θ_3	زاویه همگرایی نازل (درجه)
μ_t	ویسکوزیته دینامیکی‌آشفته(kg/ms)
P	چگالی جریان(kg/m^3)
ϕ	دبی جرمی ثانویه به کل جریان ورودی

8- مراجع

[1] K. A. Deere, B. L. Berrier, J. D. Flamm, S. K. Johnson, A Computational Study of a New Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle Concept, *AIAA-2005-3502,* July,2005.

[2] K. A. Deere, B. L. Berrier, J. D. Flamm, S. K. Johnson, Computational Study of Fluidic Thrust Vectoring Using Separation Control in a Nozzle, *AIAA-2003-3803,* 2003.

[3] K. A. Deere, Summary of Fluidic Thrust Vectoring Research Conducted at NASA Langley Research Center. *AIAA- 2003-3800,* 2003.

[4] S. N. Anathesha, Sridhara, D. Vamsidhar, Numerical Investigation and Parametric Study of Fluidic Thrust Vectoring by Shock Vector Control Method*, SAS Tech,* VI, 2007.

[5] H. J. Kowal, Advances in thrust vectoring and the application of flow control technology, *Canadian Forces College,* Vol.48,pp. 145-151, 2002.

[6] C. A. Hunter, K. A. Deere, Computational Investigation of Fluidic Counter-flow Thrust Vectoring. *AIAA 99-2669,* 1999.

[7] J. D. Flamm, Experimental Study of a Nozzle Using Fluidic Counter-flow for Thrust Vectorin. *AIAA 98-3255,* 1998.

[8] J. D. Flamm, B. L. Berrier, S. K. Johnson, K. A. Deere, An Experimental Study of a Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle Concept,*AIAA-2005-3503,* July 2005.

[9] J. D. Flamm, K. A. Deere, M. L. Mason, B. L. Berrier, S. K. Johnson, Experimental Study of an Axisymmetric Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle for a Supersonic Aircraft Application,*AIAA-2007-5084,* 2007.

[10] K. A. Deere, J. D. Flamm, B. L. Berrier, S. K. Johnson, Computational Study of an Axisymmetric Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle Concept for Supersonic Aircraft Application*, AIAA-2007-5085,* 2007.

[11] J. D. Flamm, K. A. Deere, M. L. Mason, B. L. Berrier, S. K. Johnson, Design Enhancements of the Two-Dimensional, Dual Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle Concept. *AIAA-2006-3701, 2006.*

[12] C. S. Shin, H. D. Kim, T. Setoguchi, S. Matsuo, A Computational Study of Thrust Vectoring Control Using Dual Throat Nozzle, *Journal of Thermal Science,* Vol, 19, pp.486−490, 2010.

[13] M. Heydari, A. Pooramir, Simulation of Thrust Vector Control with Using Single Fluid Injector, Journal of High Energy Material, Vol. 1, pp.33-43, 2011 (in Persian).

[14] R. Gu, J. Xu, Effects of Cavity on the Performance of Dual Throat Nozzle During the Thrust-Vectoring Starting Transient Process. *Journal of Engineering Gas Turbines and Power,* Vol.136, 2013.

[15] Fluent, "*User's Guide Fluent 6.3.26, Fluent Incorporated*", Lebanon, NH, 2006.

[16] M.H. Shojaeefard, A. Noorpur*, Computational Fluid Dynamic,* Industrial and Science University, 2000. (In Persian).

[17] F. R. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA journal,* Vol.32, pp. 1598-1605, 1994.

[18] M. L. Mason, L. E. Putnam, J. R. Richard, The Effect of Throat Contouring on Two Dimensional Converging-Diverging Nozzles at Static Condition*, NASA Technical Paper 1704,* 1980.

[19] A. M. Geatz*, A Prediction Code for the Thrust Performance of Two Dimensional, Non-Axisymmetric, Converging Diverging Nozzles,* Air Force Institute of Technology, PH.D Thesis, 2005.

Archive of SID

www.SID.ir