

بررسی تجربی تاثیر شعاع فلپ دایره‌ای بر بردار پیشرانیش یک نازل همگرا با استفاده از پدیده کواندا

پویا بیغمیان^{1*}، محمد حججی نجف آبادی²، میثم حکیمی³، محمد رضا صوفیوند⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک تبدیل انرژی، مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

pooya.ideas@gmail.com

2- استادیار مهندسی هوافضا، گروه هوافضا، دانشکده فنی مهندسی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

3- دانشجوی کارشناسی ارشد هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

4- دانشجوی دکترا مکانیک تبدیل انرژی، مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*نویسنده مخاطب

چکیده

را میان متخصصان پیرنگ تر کرده است، دریافت پاسخ از مرکز کنترل در حداقل زمان ممکن است. در شکل ۱ بصورت نمادین برخی از روشهای فوق به همراه میزان اثرگذاری بر انحراف بردار پیشرانیش به نمایش درآمده است. [1] یکی از روش های کنترل جریان در جت خروجی نازل ها، استفاده از پره ها و صفحه های هدایتگر در خروجی است. [2] مزیت این روش نسبت به روشهای مشابه سادگی در تحلیل، طراحی و پیاده سازی است. همچنین استفاده از بالچه های کواندا در سال های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است " اثر کواندا"، تمایل جریان یک گاز خروجی از روزنه و یا یک نازل به جهت دنبال کردن سطح روی منحنی گفته میشود. [3] و بیشتر این توجه به دلیل امکان به دست آوردن کنترل بردار رانش برای کاربردهای هواپیماهای V/STOL (Vertical/Short Take off and Landing) است. همچنین بررسی اثرات اندازه، شکل، موقعیت بالچه ها و نظیر آن در رژیم های مختلف جریان با استفاده از روش کواندا مورد توجه قرار گرفته است. [4] لذا در این تحقیق موضوع استفاده از روش کواندا در کنترل بردار رانش در رژیم صوتی جریان خروجی یک نازل صفحه ای مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

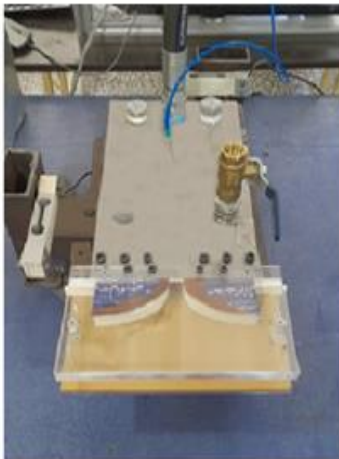
از آنجایی که یکی از مهمترین مراحل طراحی سیستمهای هوایی، مرحله طراحی المانهای کنترل کننده بردار پیشرانیش آنها است. در این پژوهش یک روش کارآمد و کم هزینه در کنترل بردار تراست پیشنهاد شده که متناسب با نازل همگرا در رژیم صوتی بوده و عدد ماخ اسمی آن 1 در نظر گرفته شده است. سیال مورد آزمایش هوا میباشد. در خروجی نازل 2 فلپ با ابعاد 40 تا 75 میلیمتر در طرفین مستقر میگردد. این فلپها 4 قطعه دایره ای شکل هستند که هریک بصورت مجزا جلوی جریان قرار گرفته و براساس میزان شعاع و همچنین نسبت فشار به فشار کل جریان میتوانند بر هدایت جریان و تاخیر بر پدیده جدایش موثر باشند. پس از باز کردن شیر جریان توزیع فشار و همچنین توزیع نیرو در زوایا و NPR های مختلف در 2 حالت گذرگاه باز و بسته مورد نقد و بررسی دقیق قرار میگردد. نتایج این تحقیق نشان میدهد که با افزایش شعاع چه در حالت گذرگاه باز و چه در حالت گذرگاه بسته NPR جدایش افزایش می یابد. علاوه بر آن با رسیدن به NPR بیشتر از 3.4، میتوان صرفا با افزایش شعاع فلپ از 50 میلیمتر به 75 میلیمتر NPR جدایش را تا حدود 15 درصد رشد افزایش داد.

واژه های کلیدی: نازل همگرا - رژیم صوتی - پدیده کواندا - NPR و فلپ دایره ای

1- مقدمه

نظریه کواندا برای اولین بار در سال 1911 توسط هنری کواندا به عنوان یک نظریه بنیادین بر پایه تولید یک تغییر زاویه موثر توسط یک یا چندین جت مطرح شد. [5]. نیومن در سال 1961 در مطالعه ای با عنوان انحراف صفحات جت توسط اثر کواندای ناشی از مرزهای مجاور، نشان داد اثر چسبندگی کواندا تاثیر مستقیمی بر توازن نیروی وارد بر سیال خواهد داشت. نتایج تحقیقات وی نشان داد که در زمان حرکت چسبندگی بر روی سطح منحنی وار نیروی وارد بر سیال بطور متوازن تحت تاثیر قرار خواهد گرفت و یک نیروی گریز از مرکز و فشار شعاعی ایجاد خواهد شد [6]. جریانهای کواندا مافوق صوت دارای ویژگی های پیچیده است و با نحوه قرارگر فلپ ها در خروجی نازل ارتباط مستقیمی دارد. برای مثال در مطالعه با موضوع تکنیک جریان شمارشی، سانتوس نشان داد که صفحاتی که کناره های یقه فلپ را می پوشانند می توانند زاویه انحراف رانش را (تا سقف 27 درجه) در مقایسه با نداشتن دیوارهای جانبی افزایش دهد. [7]. در نمونه دیگری از این مطالعات سونگ و همکاران در سال 2014 در مقاله ای با عنوان «استفاده از فلپ کوندا گام به عقب جهت کنترل بردار سیال سوپرسونیک» نشان دادند که اولاً هنگامی که جت سیال با سطح کواندا برخورد میکند حتی در حالتی که هنوز جت ثانویه فعال نشده است، سیال بواسطه خاصیت ویسکوزیته به سطح کواندا میچسبد و توسط آن منحرف

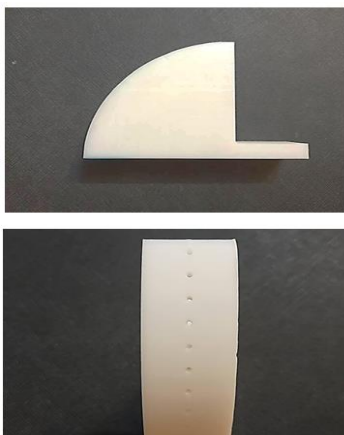
یکی از مهمترین مراحل طراحی سیستمهای هوایی، مرحله طراحی المانهای کنترل کننده بردار پیشرانیش آنها است. در این راستا روش های بسیاری برای کنترل بردار پیشرانیش وجود دارد. این روش ها عموماً به دو دسته روشهای مکانیکی و سیالاتی تقسیم بندی میشوند. در روشهای مکانیکی معمولاً از ادوات و تجهیزاتی مثل دم، بال و پره استفاده میشود. اما در روش های سیالاتی معمولاً تلاش میشود نیروی پیشران را با استفاده از خواص فیزیک حاکم بر جریان با روشهایی همچون استفاده از بالچه در خروجی نازل، نازل هایی با صفحه های متحرک، بکارگیری تزریق ثانویه گاز یا مایع به درون نازل بهبود بخشید. ذکر این نکته حائز اهمیت است که مکانیزم TVC (Thrust Vectoring Control) از جمله روشهای مهم و تاثیرگذار بر کنترل ماهوارهها و فضاپیماها به خصوص در زمان پرتاب محسوب میشود. زیرا در این زمان سطوح برآ افزای پرنده فاقد کارایی لازم آیرودینامیکی می باشد و وجود یک نیروی پیشران، موتور محرکه اصلی حرکت محسوب میشود. از دیگر کاربردهای این مکانیزم میتوان به افزایش مانورپذیری جسم پرنده اشاره کرد. یکی از مواردی که استفاده از این روش



شکل 3- ستاپ آزمایشگاهی به همراه نازل مورد استفاده

3- تجهیزات آزمایشگاهی

برای تمامی آزمایش ها از مخازن هوای فشرده با ظرفیت حداکثر ۱۵۰ بار استفاده شده است که میتواند فشار نسبی لازم ویژه محفظه آرامش را به حدود 3 بار برساند. در این پژوهش مجموعاً از 4 سری فلپ مختلف در دسته های دایره ای شکل استفاده شد که ابعاد این فلپ ها به صورت 40×40 ، 50×50 ، 60×60 ، 75×75 میلی متر در نظر گرفته شده اند. این فلپ ها به صورت متقارن در خروجی نازل نصب می شوند و بر اساس باز یا بسته بودن محفظه کناری جریان را به سمت خود هدایت می کنند. شکل 3 تصویر نمونه فلپ استفاده شده را نشان می دهد.



شکل 4- فلپ دایره ای با اندازه 60×60 میلی متر

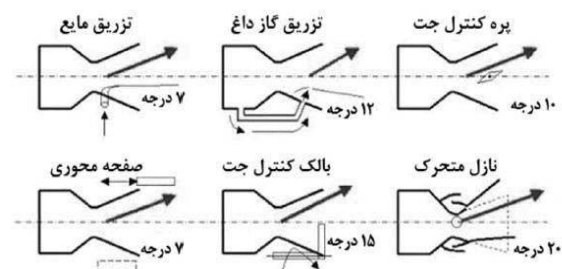
همچنین برای حفظ و نگهداری فلپ ها در خروجی نازل از دو صفحه نگهدارنده استفاده شد که از جنس پلکسی شفاف بوده و ابعاد آن 120×220 میلی متر مربع است و بر اساس مقالات موجود نقش آنها در آب بندی و چسبندگی جریان بر روی فلپ چشمگیر و مورد توجه بوده است.

3-1- میز نیرو

در این پژوهش از یک میز نیروی دو مولفه ای استفاده شده است که راستای X معرف نیروی تراست و راستای Y معرف نیروی جانبی است از این رو از 2 لودسل از نوع Zemic در راستای X و Y استفاده شده است. لودسل مورد استفاده در جهت X تا ۱۵ کیلوگرم و لودسل در جهت Y تا 2.5

میشود. نتیجه مهمی که در آزمایش ها بدست آمد این بود که در حالتی که فلپ بدون پله و نزدیک خروجی نازل اصلی است نسبت به حالتی که از مدل فلپ با گام عقب همراه با مقداری ارتفاع جت ثانویه استفاده شده است انحراف بردار جریان بیشتر است. [8] در سال 2016 یول لی و همکاران در مقاله ای با عنوان "بردار پیشران جت صوتی با استفاده از فلپ کواندا و شیر برقی" نشان دادند که استفاده از دیواره های جانبی در اطراف فلپ به چه میزان میتواند بر هدایت سیال توسط جسم کواندا موثر باشد [9]. از طرفی میتوان بدون استفاده از هرگونه مکند و یا دمنده در خروجی جریان میتوان بردار تراست را تا حدود 71 درجه منحرف کرد.

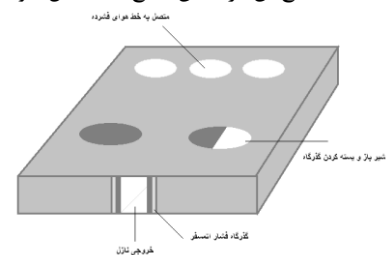
بر اساس بررسی های انجام شده پیرامون پدیده کواندا، این نتیجه حاصل شد که در طی سال های گذشته محققان جهت بهبود عملکرد بردار پیشران اغلب از روش هایی همچون تغییرات هندسه لبه فرار، تغییرات دبی خروجی هوا از نازل و همچنین بررسی اثرات سرعت ورودی در بالچه های دایروی استفاده کرده اند. از این رو در این مطالعه چگونگی تاثیر شعاع انواع بالچه های دایروی بر میزان انحراف بردار پیشران و همچنین تاخیر در پدیده جدایش به عنوان نوآوری کار مطرح شده است.



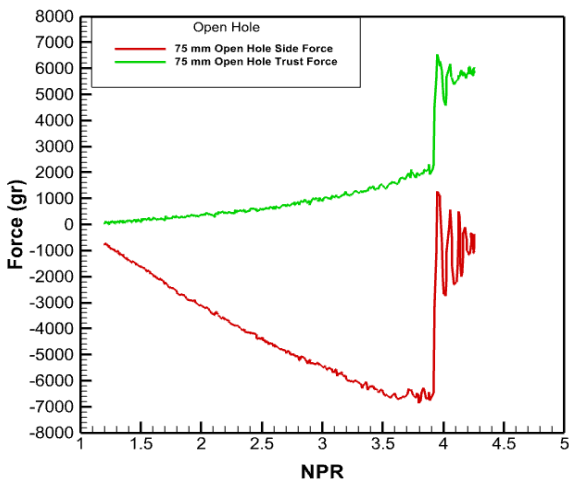
شکل 1- شماتیک کلی از روش های کنترل بردار تراست

2- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از یک نازل همگرا با ابعاد بیرونی 305×180 میلی متر مربع استفاده شده است. عدد ماخ اسمی در گلوگاه نازل برابر 1 است. گلوگاه نازل مستطیلی شکل بوده و ابعاد آن 20×10 میلی متر مربع است. همچنین برای انجام آزمایش ها از هوای فشرده استفاده شده است که توسط کپرسور به خط فشار هوا و پس از آن به خروجی نازل میرسد. همچنین 2 گذرگاه در کنار گلوگاه به عرض 1 میلی متر تعبیه شده است که به فشار اتمسفر متصل است. زمانی که جریان با فشار بالا از روی فلپ ها عبور میکند در صورتی که هریک از این گذرگاه ها باز باشد در نقش مکند عمل کرده و موجب هدایت جریان به سمت خود میشود. در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی در 2 حالتی که گذرگاه سمت چپ همواره بسته و گذرگاه سمت راست توسط یک شیر امکان باز یا بسته شدن داشته است مورد تست قرار گرفته است که نتایج آن در بخش نتایج به تفصیل خواهد آمد.

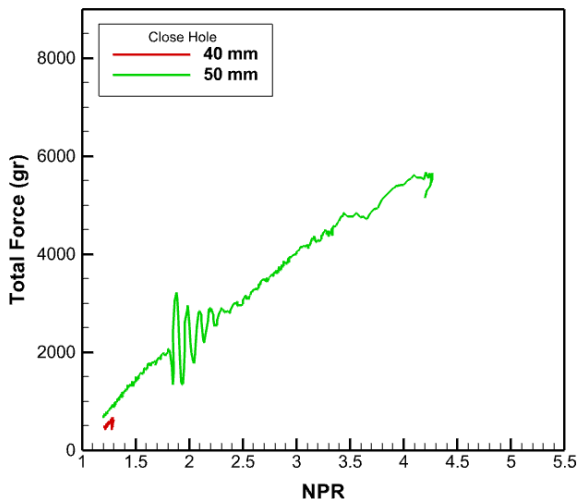


شکل 2- شکل شماتیک نازل



شکل 6- روند رشد نیرو های تراست و جانبی بر حسب NPR در حالت دریچه باز

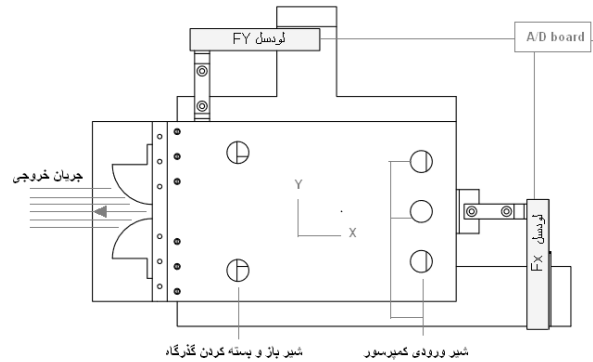
شکل 7 نیروی برآیند کل نسبت به NPR در حالت دریچه بسته برای فلپ های دایروی 40 و 50 میلی متر را نشان می دهد.



شکل 7- نیروی برآیند کل نسبت به NPR در حالت دریچه بسته فلپ های دایروی 40 و 50 میلی متر

همانطور که در شکل مشخص است، جریان سریع از روی فلپ 40 میلی متر جدا میشود. در حالی که تنها با افزایش 10 میلی متر در شعاع جریان ما شاهد رشد چشمگیری در رشد جریان خواهیم بود.

کیلوگرم را اندازه گیری می کند. دقت لودسل ها تا یک دهم درصد از مقیاس کلی آن ها است. کالیبراسیون میز نیرو با استفاده از وزنه های متعدد به صورت دقیق انجام شد. با این وجود دقت میزنیرو حدود 0.5 درصد است که به خاطر اثر کوپلینگ ناشی از خطای دو لودسل ایجاد میشود. شکل 4 شماتیک قرار گیری لودسل ها در ستاپ آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل 5- شماتیک قرار گیری لودسل ها در ستاپ آزمایشگاهی

3-2 سنسور های اندازه گیری فشار

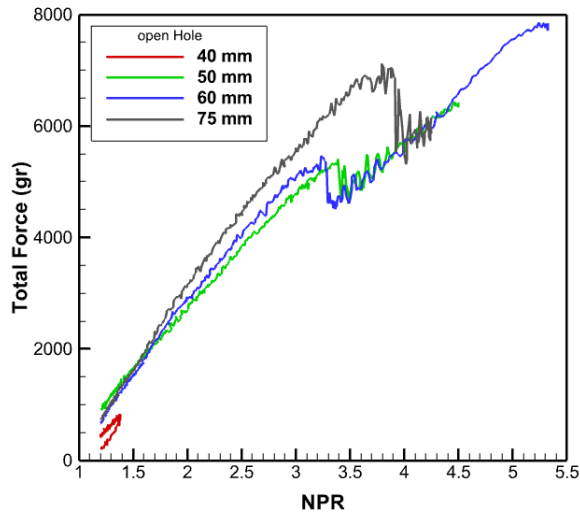
این سنسورها ابزارهایی هستند که برای اندازه گیری فشار در سیالات به کار گرفته می شوند نحوه کار آنها به این صورت است که برای انجام این کار ابتدا لازم است سنسو کالیبره شود. برای کالیبراسیون در ابتدا چند فشار توسط گیج به صورت دقیق اندازه گیری شده و توسط کارت داده برداری و در نرم افزار دیتا لگر میزان ولتاژ ای که هر یک از این فشارها را به عنوان خروجی می دهد محاسبه می شود. سپس یک نمودار فشار بر حسب ولتاژ با عنوان منحنی کالیبره سنسور ترسیم می شود که شیب این نمودار برابر است با ضریب کالیبره سنسور. از این به بعد می توان توسط منحنی ضریب کالیبره و رابطه $\Delta P = K \Delta V$ فشار را اندازه گیری شده توسط سنسور را به صورت تحلیلی و دقیق محاسبه کرد. در این تحقیق از این نوع سنسور ها با ظرفیت های مختلف با خطای یک دهم درصد از مقیاس کلی آن ها استفاده شده است.

3-3 کارت داده برداری

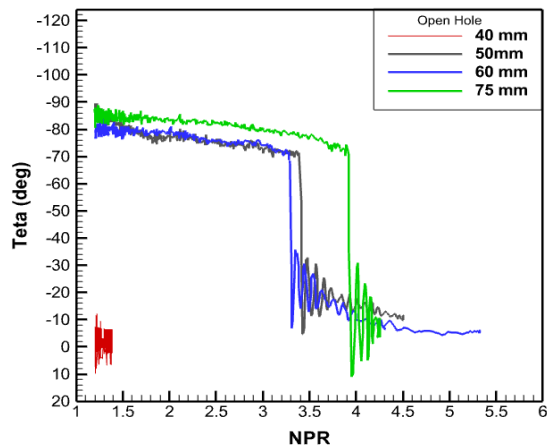
در این پژوهش جهت استخراج داده ها از یک کارت داده برداری 16 کاناله با سرعت 150 کیلو بیت بر ثانیه و رزولوشن 14 بیتی استفاده شد این کارت ساخت شرکت Advantech بوده و مدل آن A-4711USB است و همچنین فرکانس داده برداری روی 100 هرتز تنظیم شده است.

4- نتایج و بحث

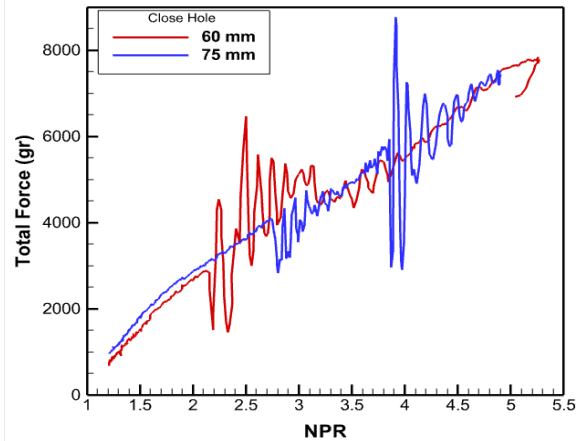
در ستاپ آزمایشگاهی تست ها در دو حالت گذرگاه باز و بسته برای اثرات مکش هوای اتمسفر به درون جت خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. لذا شکل 6 نمودار نیروی تراست و نیروی جانبی فلپ دایروی به ابعاد 75 میلی متر را نسبت به فشار کل محفظه آرامش به فشار اتمسفر که به اصطلاح (NPR(Nozzle Pressure Ratio نامیده میشود را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود در فلپ 75 میلی متری با باز کردن دریچه هوا، در حالتی که گذرگاه کناری باز و به فشار اتمسفر متصل بود نیروی جانبی افزایش و نیروی محوری به حرکت خود ادامه میدهد. پس از رسیدن به $NPR = 3.92$ جریان از روی سطح جدا شده و شاهد پرش چشم گیر نیروی تراست محوری خواهیم بود.



شکل 10- نیروی برآیند کل نسبت به NPR در حالت دریچه باز
 شکل 10 نمودار زاویه بردار پیشرانش برحسب NPR جدایش را برای تمامی فلپ های استفاده شده در آزمایش در حالت دریچه باز نشان می دهد. اولین نتیجه ای که از این نمودار میتوان گرفت اینست که در شعاع های مساوی و پایین تر از 40 میلیمتر جدایش جریان خیلی سریع اتفاق می افتد و این گونه فلپ ها نمیتوانند گزینه مناسبی جهت هدایت جریان باشند. ثابا با افزایش شعاع فلپ میزان NPR جدایش سیستم به صورت مستقیم افزایش می یابد. با این وجود هرچه شعاع افزایش میابد شیب منفی نمودار بیشتر میشود و این بدان معنی است که در شعاع های بالا تمایل سیستم برای رسیدن به جدا شدن جریان از روی سازه بیشتر میشود. مساله ای که در اینجا قابل تامل اینست که با افزایش شعاع میزان افت زاویه انحراف بردار پیشرانش بیشتر میشود.

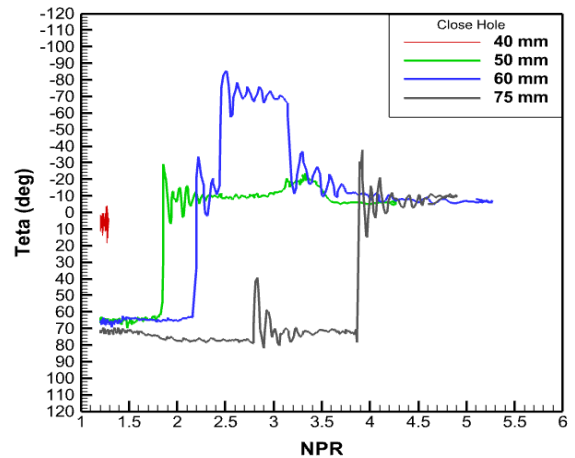


شکل 10- زاویه بردار رانش نسبت به NPR در حالت دریچه باز
 شکل 11 توزیع فشار بر روی سطح فلپ با شعاع 75 میلی متر را در حالت های باز و بسته بودن دریچه نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که روند توزیع فشار در دو حالت مختلف درجه و در یک شعاع ثابت یکسان است.



شکل 8- نیروی برآیند کل نسبت به NPR در حالت دریچه بسته فلپ های دایروی 60 و 75 میلی متر

در شکل 8 نمودار نیروی برآیند کل نسبت به NPR در حالت دریچه بسته برای فلپ های دایروی 60 و 75 میلی متر رانشان می دهد. همانطور که مشخص است ضمن اینکه بالچه ای که شعاع بیشتری دارد توانسته است حد بالاتری را در میزان نیروی کل از آن خود کند و در این راستا نمودار فلپ 75 میلی متر توانسته است تا $NPR = 3.92$ منجر به انحراف جریان بر روی سطح کواندا گردد.



شکل 9- زاویه بردار پیشرانش نسبت به NPR در حالت دریچه بسته
 شکل 9 نمودار زاویه بردار پیشرانش برحسب NPR جدایش را برای تمامی فلپ ها در حالت دریچه بسته نشان می دهد. در این نمودار همانند شکل 7 در شعاع های مساوی و پایین تر از 40 میلیمتر جدایش جریان خیلی سریع اتفاق می افتد. همچنین با افزایش شعاع فلپ تا شعاع 75 میلیمتر زاویه بردار پیشرانش به صورت مستقیم افزایش می یابد و پس از جدایش جریان زاویه انحراف بردار به شکل چشمگیری کاهش می یابد.

[3] M. Mamou and M. Khalid, Steady and unsteady flow simulation of a combined jet flap and coanda effects on a 2d airfoil aerodynamic performance. 2007.

[4] F. Kong, Y. Jin, and H. D. Kim, "Thrust vector control of supersonic nozzle flow using a moving plate," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 30, no. 3, pp. -1209 2016 01/03/2016 ,1216, doi: 10.1007/s4-0224-016-12206.

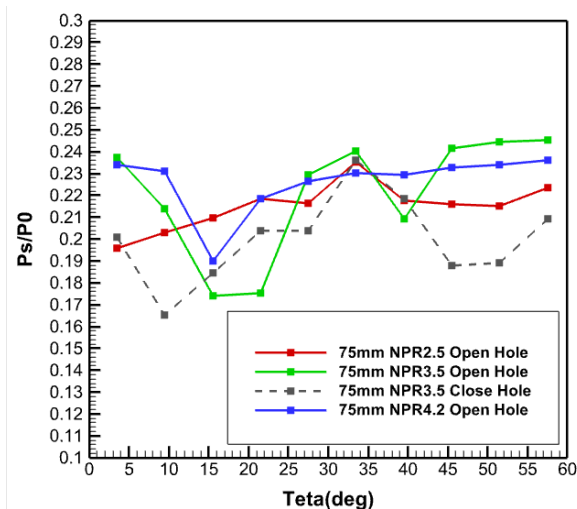
[5] Coanda, H., US Patent n. 1,104,963 "Improvement in Propellers1911", USA

[6] E. K. Parks and R. E. Petersen, "Analysis of a "Coanda" type flow," AIAA Journal, vol. 6, no. 1, pp. 01/01/1968 ,7-4 1968, doi: 3.4433/10.2514.

[7] Santos, M. M., "Experimental Study on Counter Flow Thrust Vectoring of a Gas Turbine Engine," Ph.D. Dissertation, Florida State Univ., Tallahassee, FL, 2004.

[8] M. Song, S. Park, and Y. Lee, "Application of Backstep Coanda Flap for Supersonic Coflowing Fluidic Thrust-Vector Control," AIAA Journal, vol. 52, no. 10, pp. ,2359-2355 2014 01/10/2014, doi: 1/10.2514.J052971.

[9] Y. Lee, S. Park, and Y. Kim, "Thrust Vectoring of Sonic Jet by Using Coanda Flap and Solenoid Valve," AIAA Journal, vol. 54, no. 9, pp. 2016 01/09/2016 ,2915-2909, doi: 1/10.2514.J054993.



شکل 11- توزیع فشار بر روی سطح فلپ با شعاع 75 میلی متر

5-نتیجه گیری

- نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش شعاع چه در حالت گذرگاه باز و چه در حالت گذرگاه بسته NPR افزایش می یابد به طوری که با افزایش شعاع از ۵۰ میلیمتر به ۷۵ میلیمتر NPR حدود 15 درصد رشد داشت.
- با افزایش شعاع زاویه جدایش تا ۷۰ درجه افزایش می یابد و این قضیه می تواند میزان مانورپذیری پرنده را بسیار گسترش دهد.
- نتایج این تحقیق نشان داد که برای کنترل و هدایت پذیری سیستم بهتر است از حالت گذرگاه باز نسبت به گذرگاه بسته استفاده کنیم چرا که نتایج و داده های به دست آمده روند دقیق تر و حساب شده تری را طی می کند و این قضیه می تواند مسئله هدایت پذیری جسم راحت تر کند
- نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن پلکسی ها در بالا و پایین فلپ ها می تواند مانع نشستی جریان و در پی آن باعث افزایش زاویه جدایش جریان گردد.
- شعاع مناسب جهت بهره گیری از پدیده کواندا در هدایت جریان در یک نازل همگرا، در یک محدوده مشخصی میگذرد که کمتر یا بیشتر از این محدوده میتواند پارامترهای ثانویه موثر بر جریان را تحت تاثیر خود قرار دهد و باعث افت کارایی سیستم شود.
- با توجه به نتایج به دست آمده از شکل 9 و 10 همانطور که مشخص است پس از جدایش جریان زاویه θ به صورت چشمگیری کاهش می یابد از این رو پیشنهاد میشود که در صورت تغییر در ارگونومی این فلپ ها می توان روند افت این کاهش را بهبود بخشید و در نتیجه طیف وسیع تری از زوایا را پوشش داد.

6-منابع

- [1] G.P., Sutton, O., Biblarz, Rocket Propulsion Elements, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001
- [2] G. Newman B, "The Deflection of Plane Jets by Adjacent Boundaries-Coanda Effect," Boundary Layer and Flow Control, 1961 1961.