ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

بررسی عددی عوامل موثر بر کارایی محرک های پلاسمایی پایا و نایایا بر روی جریان هوای عبوری از روی صفحه تخت

مجتبى احمديون رودسرى1، حميد پرھيزكار2*، غلامحسين پوريوسفى3، عباس طربى2

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق يستى hparhiz@mut.ac.ir ،15875-1774

چکیدہ	اطلاعات مقاله
توانایی کنترل جریان، یکی از نیازهای اساسی در علم مکانیک سیالات است که پیوسته توسط محققین دنبال میشود. یکی از روش های نوین در این حیطه، استفاده از عملگرهای پلاسمایی است که به وسیلهی تزریق ممنتوم به لایه مرزی، سبب تأخیر در وقوع پدیده جدایش میشود. هدف از این بررسی، کمک به بهینه سازی پرامترهای الکتریکی به منظور دستیابی به گردابههای تولیدی قویتر و به دنبال آن باد یونی موثرتر، ایجاد	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 14 شهریور 1396 پذیرش: 09 آذر 1396 ارائه در سایت: 15 دی 1396
شده توسط محرکهای پلاسمایی تخلیه سد دی الکتریکی پایا و ناپایا (موج ورودی به این محرک دارای رفتار غیردائمی میباشد) بر روی جریان هوای عبوری از روی یک صفحه تخت میباشد. برای این منظور، صفحه تخت مذکورتحت جریان هوای عبوری با سرعت 5 m/s شبیهسازی گردید. پروفیل های سرعت متوسط باد یونی القایی نشان داد که در هر دو محرک پایا و ناپایا، با افزایش فرکانس و ولتاژ اعمالی به محرک، سرعت متوسط جریان افزایش مییابد و به سطح نزدیکتر میگردد. همچنین در محرک ناپایا با افزایش سیکل وظیفه قدرت گردابههای تولید شده توسط محرکهای پلاسمایی افزایش مییابد. در ادامه با بررسیهای انجام شده بر روی سرعت با سرعت القایی در موقعیتهای مختلف بر	<i>کلید واژگان:</i> محرک پلاسما روش فعال کنترل جریان لایه مرزی سیکل وظیفه
روی صفحه (در بالا دست و پایین دست محرک)، مشاهده دردید که مقدار ماکریمم سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک و در تردیکی سطح اتفاق میافتد.	

Numerical investigation of factors affecting in the steady and unsteady plasma actuators performance on the airflow through the flat plate

Mojtaba Ahmadpour Roudsari¹, Hamid Parhizkar^{1*}, Gholam Hossein Pouryoussefi², Abas Tarabi¹

1-Aerospace Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2-Aerospace Department, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran

* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, hparhiz@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT The ability to control the flow, is one of the basic needs of Fluid Mechanics that constantly pursued by Original Research Paper Received 05 September 2017 researchers. One of the new methods in this area, is using Dielectric barrier discharge (DBD) plasma Accepted 30 November 2017 actuators that by injecting momentum into the boundary layer, causing a delay in the phenomenon Available Online 05 January 2018 separation. The main object in this work was to help to optimize the electrical parameters to obtain stranger vortex and more effective ionic wind created by steady and unsteady plasma actuators on the air through the flat plate. For this reason, simulation is done for a flat plate with the compressible 5 m/s Plasma Actuator Active Flow Control Method velocity airflow. The time averaged velocity profiles of the ionic wind show that averaged velocity Boundary Layer come more and the position of the maximum velocity come near the surface by increasing the excitation voltage and frequency. The power, of the vortices that are shed form the unsteady actuator, increases by increasing duty cycle percentage. Our results on the ionic wind velocity on different position on the flat plate indicate that the maximum averaged velocity occurs in downstream of plasma actuator

کنترل جریان یکی از مسائل اساسی در علم آیرودینامیک میباشد که از دیرباز مورد توجه و علاقه محققین این حوزه قرار گرفته است. اثرات مهمی که کنترل جریان بر روی بال به وجود میآورد شامل کاهش نیروی پسا، افزایش نیروی برآ و افزایش زاویه واماندگی بال، از طریق به تعویق انداختن جدایش جریان میباشد. به طور کلی، جدایش جریان زمانی اتفاق میافتد که

Please cite this article using:

Keywords:

Duty Cycle

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Ahmadpour Roudsari, H. Parhizkar, GH. H. Pouryoussefi, A. Tarabi, Numerical investigation of factors affecting in the steady and unsteady plasma actuators performance on the airflow through the flat plate, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 111-121, 2018 (in Persian)

در روش کنترل فعال جریان، انرژی خارجی در ورودی سیستم میتواند به شکل حرارت، لیزر، اشعه الکترونی، ریز موجها، انرژی آکوستیک و پلاسما باشد. در این روش این امکان وجود دارد که هرگاه نیاز باشد سیستم کنترل جریان را خاموش و هر وقت که بخواهیم سیستم را روشن نماییم.

از اینرو روش کنترل فعال جریان انعطاف و قابلیت بیشتری نسبت به روش کنترل غیرفعال جریان دارد.

در سالیان اخیر از محرکهای پلاسمایی دی بی دی بهطور موثری جهت کنترل فعال جریان استفاده شده است. در محرکهای پلاسمایی، تخلیه پلاسما عاملی است که میزان مومنتوم ذرات را در مناطق مورد نیاز افزایش میدهد. این محرکها مولکول های هوا را یونیزه کرده و در طی فرآیند برخورد ذرات باردار در حال حرکت با ذرات خنثی هوا، یک مومنتوم محلی (مومنتم القایی پلاسما) به جریان اضافه میکنند و باعث تولید یک جریان القایی در سیال به نام باد یونی میشوند.

پلاسما گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه میدهند. برای اولین بار لانگمیر در سال 1928 عبارت پلاسما را برای توصیف حالت یونیزه حاصل از تخلیه الکتریکی در گازها به کار گرفت. امروزه از پلاسما در ادوات نیمه هادی، تولید لیزر و تولید انرژی الکتریکی، دستگاههای جوش کاری و برش کاری و بسیاری دیگر از کاربردهای صنعتی استفاده میشود [2].

ملیک و همکارانش از نیروی جت حاصل از یک تخلیه توسط جریان مستقیم بهمنظور ایجاد یک ناحیه پلاسما و در نهایت کاهش نیروی پسا بر روی صفحات تخت استفاده کردند. پس از آنها افراد مختلفی از عمل تخلیه الکتریکی به منظور تولید بردار نیروی حجمی و کنترل جدایش لایه مرزی جریان و افزایش نیروی برابر روی اجسام مختلف استفاده کردند [4].

فرت و همکارانش به بررسی تاثیر استفاده از عملگر پلاسمایی بر جریان عبوری از روی ایرفویل ها پرداختند. آن ها در زمینه هایی چون تاثیرات هندسه، جنس الکترودها، ولتاژ ورودی، فرکانس و پارامترهای دیگر عملگر پلاسمایی تحقیقات زیادی انجام دادهاند [5].

سین و همکارانش پدیده جدایش جریان را توسط عملگرهای پلاسمایی بر روی یک صفحه تخت دارای زاویه حمله بهصورت عددی بررسی کردند. آنها در این تحقیق از مدل خود پایدار عملگر پلاسمایی برای یافتن میدان نیروی الکتریکی و اعمال آن به معادلات ممنتوم استفاده کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که اعمال نیروی حجمی حاصل از عملگر به سیال سبب افزایش ممنتوم در نزدیکی دیواره و از بین رفتن حبابهای ریز داخل جریان میشود [6].

بهطور كلى، محركهاى پلاسمايى سرد را مىتوان به سه گروه عمده تقسيم كرد: (1) ابزارهاى باد كرونا كه با منبع تغذيه پلاسماى جريان مستقيم كار مىكنند [7-8]، (2) ابزارهاى تخليه مانع دىالكتريك يا همان محركهاى پلاسمايى¹ دى بى دى كه با منبع تغذيه پلاسماى جريان متناوب كار مىكنند [9-10] و (3) ابزارهاى ورقه پلاسما [11,11]. در محركهاى پلاسمايى دى بى دى بهدليل اينكه فاصله ميان الكترودها با يك ماده عايق، كه مقاومت الكتريكى آن نسبت به تخليه الكتريكى زياد است (يك لايه دى الكتريك مانند پلكسى گلس يا كپتون و ...)، پوشيده شده است، مىتوان از الكترودهايى با فاصله بسيار كمتر استفاده نمود و در نتيجه شدت ميدان الكتريكى و همزمان نرخ يونيزاسيون مولكولهاى هوا، افزايش مىيابد.

بنابراین میتوان پلاسمایی با قدرت بیشتر جهت تأثیرگذاری بهتر بر

میدان جریان سیال تولید کرد. همچنین این امر باعث کاهش قابل ملاحظه اندازه و ابعاد این نوع محرکها شده و امکان نصب آنها را در محیطهایی کوچکتر و حتی دقیقاً در محل موردنظر، فراهم می آورد.

محرکهای پلاسما دی بی دی یکی از روشهای نوین کنترل فعال جریان آیرودینامیکی هستند و بیش از یک دهه است که از آنها استفاده می شود. این محرک کاربردهای بسیاری در کنترل جدایش در لبه حمله ایرفویل [14,13]، کنترل واماندگی دینامیکی ایرفویل [15]، کنترل جریان در اجسام دارای انحنا (بلاف بادی) [17,16]، کنترل جریان لایه مرزی [19,18]، کاربردهای افزایش برآ [20] و کنترل جریان در توربوماشینها [22,21]، دارد.

از جمله مزایای استفاده از این محرکها در حوزه حمل و نقل هوایی، میتوان به (1) توانایی و قدرت عالی این محرکها جهت کنترل جریان (کنترل جدایش و نویزهای آیرودینامیکی)، (2) پاسخ دینامیکی عالی و در نتیجه کنترل سریع جریان روی وسایل پرنده، (3) توان مصرفی الکتریکی نسبتاً پایین، (4) نصب آسان بر روی هر نوع سطوح آیرودینامیکی و سادگی و سهولت کار کردن با آنها (انطباق کامل با سطح موردنظر و عدم تأثیرگذاری بر هندسه مسأله)، (5) عدم نیاز به برداشتن محرک در مواقعی که نیاز به استفاده از آن نمیباشد، و (6) داشتن قابلیت اطمینان بالا به دلیلی نداشتن قسمتهای متحرک، اشاره کرد [23].

بهعلاوه این تحقیقات بیان میکنند که بهراحتی میتوان محرکهای پلاسمایی دی بی دی را در نسل فعلی هواپیماهای تجاری و همچنین گستره وسیعی از پهبادها به کاربرد و به سیستمهای آنها متصل^۲ نمود.

محرکهای پلاسمایی دی بی دی معمولاً از دو الکترود صفحهای (مانند نوار آلومینیوم یا مس) تشکیل شدهاند که توسط یک منبع تغذیه الکتریکی جریان متناوب از نوع ولتاژ بالای فرکانس حامل بالا، تحریک میشوند. یکی از این الکترودها در معرض هوا قرار دارد و الکترود دیگر درون ماده دی الکتریک جاسازی میشود.

به عبارت دیگر این دو الکترود توسط یک لایه دی الکتریک از هم جدا می گردند. هنگامی که محرکهای دی بی دی با ولتاژ و فرکانس بالا تغذیه و تحریک می شوند، یک هاله نورانی برافروخته به رنگ آبی و بنفش (که در روشنایی اتاق مشاهده می شود)، بر روی سطح محرک (بر فراز الکترود پوشیده) مشاهده می شود که نشان دهنده فرآیند یونیز اسیون هوا و تشکیل رژیم پلاسما می باشد.

به این نوع از رژیم تخلیه پلاسما، رژیم تخلیه برافروختگی می گویند. تشکیل پلاسما در نهایت باعث اعمال یک نیروی حجمی مؤثر بر ذرات خنثی هوای محیط اطراف محرک (میدان جریان سیال) میشود [24,23]. طرحوارهای از محرکهای پلاسمایی نوع تخلیه مانع دی الکتریک (میدان جریان سیال) در "شکل 1"، نشان داده شده است.

منابع تغذیه الکتریکی که در محرکهای پلاسمایی دی بی دی استفاده میشوند، معمولاً برای عملکرد در دو حالت تحریک پایا و تحریک ناپایا طراحی و ساخته میشوند. در حالت تحریک ناپایا، دو متغیر اضافی جدید به نامهای (1) فرکانس تحریک (فرکانس ناپایی) و (2) نسبت سیکل وظیفه، برای سینگال الکتریکی خروجی منبع تغذیه تعریف میشود. سیگنال خروجی منبع تغذیه در محرکهای پایا، همواره و دائماً در حالت روشن^۳ باقی میمانند که به آن سیگنال موج حامل می گویند. در حالی که در محرکهای ناپایا، در

¹ Dielectric barrier discharge

² Retrofit ³ Plasma on

بخشی از یک زمان مشخص، سیگنال موج حامل روشن و در بخشی دیگر که قابل کنترل است، خاموش میشود⁽. مدت زمان اعمال سیگنال به محرک را با T_{signal} و دوره تناوب یک موج پالس (تحریک ناپایا)، شامل دو بخش روشن و خاموش سیگنال را با T_{control} نشان میدهند [25] (شکل 2).

نسبت این دو زمان، سیکل وظیفه eta است که بهصورت زیر تعریف می شود:

 $\beta = (T_{\text{signal}}/T_{\text{control}}) \times 100 \tag{1}$

$$f_{\text{excitation}} = 1/T_{\text{control}} \tag{2}$$

بهطور کلی، مکانیزمهای الکتروهیدرودینامیک میتوانند حرکتهایی برای افزایش آهنگ انتقال جرم از سیستمهای تک فازه یا دو فازه به وجود آورند. نیروهای مؤثر شناخته شده در این مکانیزمها عبارتند از: نیروی الکترو استاتیک کولمب، نیروی دی الکتروفوریتیک و نیروی الکترواستریکشن [26]. در محرکهای پلاسمایی دی بی دی، بهدلیل ماهیت متناوب جریان الکتریکی ناشی از منبع تغذیه، نیروی حجمی پلاسما (ناشی از اعمال نیروی استاتیک) نیز متناوب است.

براساس فرمولاسیونی که توسط ارلوو و همکارانش [28,27] ارائه شده است، جهت نیروی حجمی همواره از الکترود در معرض به سمت الکترود پوشیده شده میباشد. این نتیجه بهعلت فرضهایی است که در فرمولاسیون این مدل وجود دارد. بویژه "شبه-پایا^۲" که در آن، مقیاس زمانی حرکت الکترون و یون بسیار کوچکتر از تناوب میباشد. البته این موضوع برای الکترونها صحیح است ولی در مورد یونها، این موضوع مبحثی است که هنوز هم به عنوان یک سؤال در میان محققان مطرح میباشد.

براساس پیشنهاد فونت و همکارانش [30,29] در نیم سیکل اول که الکترونها از الکترود در معرض رانده میشوند و یونهای مثبت به سمت این الکترود جذب میشوند، مومنتم خالص صفر نیست، بلکه بهدلیل غلبه یون ها،





Fig. 2 The difference electrical signal between steady and unsteady actuators [25]

شکل 2 تفاوت سیگنال الکتریکی در محرکهای پایا و ناپایا [25]

(3)

به سمت الکترود در معرض میباشد. در نیم سیکل دوم که جهت میدان الکتریکی معکوس میشود، یونهای مثبت به دلیل نیروی دافعه از الکترود در معرض رانده میشوند و جهت نیروی منتخبه به سمت الکترود پوشیده میباشد. اندازه نیروی حجمی در نیم سیکل دوم به مراتب بزرگتر از اندازه این نیرو در نیم سیکل اول میباشد (چون چگالی یونهای مثبت در نیم سیکل دوم بسیار بالاتر است، حدود 10 برابر نیم سیکل اول [31]) و بنابراین برآیند

نیروی حجمی اعمالی در یک سیکل، به سمت الکترود پوشیده میباشد. فرضیه پیشنهاد شده توسط فونت و همکارانش را میتوان فرضیه "کشش-رانش^۳" و فرضیه پیشنهاد شده توسط ارلوو و همکارانش را فرضیه "رانش-رانش^۴" نامید. مبنای نظری اعمال نیروی حجمی در دو نیم سیکل، برای دو فرضیه فوق، بهصورت طرح وارهای در "شکل 3" نشان داده شده است. آزمایشهایی که توسط فورت و همکارانش [30]، با عکسبرداری (اندازه گیری ال دی وی) از مؤلفههای سرعت محرک پلاسما در سیکل جریان متناوب انجام شده اند، نشان میدهند که در طول یک سیکل، مؤلفه مماسی سرعت بین یک مقدار مثبت بزرگ و یک مقدار مثبت کوچک نوسان می کند، ولی هیچگاه منفی نمیشود. این موضوع فرضیه رانش-رانش ارلوو و همکارانش را تأیید میکند.

مطابق با فرضیه رانش-رانش، اگرچه در نیم سیکل اول و نیم سیکل دوم، علامت الکترودها و همچنین جهت الکترون های آزاد تغییر میکند و عوض می شود، ولی همواره جهت نیروی حجمی اعمالی، از سمت الکترود در معرض به سمت الکترود پوشیده خواهد بود. به بیان دیگر، این نیرو همواره به سمت پایین دست محرک پلاسمایی وارد می شود و مقدار آن از رابطه (3) محاسبه می گردد [31]. در این رابطه، بردار نیروی حجمی *F*₈، تأثیر آیرودینامیکی محرک پلاسمایی بر روی میدان جریان سیال است (مومنتم القایی پلاسما) که در معادله ناویر – ستوکس وارد می شود.

 $F_{\rm B} = \rho_{\rm c} E$

با توجه به روابط ارائه شده توسط ارلوو و کروک [32] برای مدل سازی نیروی حجمی ناشی از تخلیه پلاسما ($F_{\rm B}$)، که مطابق فرضیه "رانش-رانش" ارلوو و همکاران [30-30] میباشد، معادلات حاکم بر میدان جریان سیال (حالت تراکمناپذیر) با حضور محرک پلاسمایی دی بی دی به شرح زیر است: $\nabla \cdot V = 0$ (4)



Fig. 3 The body force base is applied in two half-cycles, push-push hypothesis and push-pull hypothesis [30]

شکل 3 مبنای اعمال نیروی حجمی در دو نیم سیکل، برای فرضیه "رانش-رانش" و فرضیه "کشش-رانش" [30]

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.22.9

¹ Plasma off ² Quasi-Steady

³ Push-Pull ⁴ Push-Push

$$E_{x} = \frac{Ek_{2}}{\sqrt{K_{1}^{2} + K_{2}^{2}}}$$

$$E_{y} = \frac{Ek_{1}}{\sqrt{K_{1}^{2} + K_{2}^{2}}}$$
(12)

زمان مورد توجه در بررسی تاثیر عملگر لاسمایی بر روی سیال، مدت زمان تخلیه پلاسما (Δt) میباشد. به دلیل تخلیه سریع الکترودها، انتقال ممنتوم به سیال، فقط در طول بخشی از چرخه جریان متناوب رخ می دهد که مقدار زمان Δt در مقایسه با مقیاس زمان جریان سیال بسیار کوچک میباشد. بنابراین اجزای نیروی حجمی در راستای x و y را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$J_x = E_x \rho_c e_c$$

$$f_y = E_y \rho_c e_c$$
(13)

که در رابطه فوق e_c بار مقدماتی 7 و ho_{2} چگالی بار کل میباشد. برای اعمال این محدودیت که نیروی حجمی فوق فقط در ناحیه تشکیل پلاسما به سیال اعمال میشود از تابع دلتا استفاده میشود.

$$\begin{cases} \delta = 1 \quad \text{y.} \quad E < E_{\rm cr} \\ \delta = 0 \quad \text{y.} \quad E \ge E_{\rm cr} \end{cases}$$
(14)

که در رابطه فوق $E_{\rm cr}$ ، شدت میدان الکتریکی در حالت شکست میباشد. مقدار نیروی موثر بر مولکولهای خنثی نیز به صورت زیر میباشد: $f_{\rm effx} = lpha f_x \delta$ $f_{\rm effy} = lpha f_y \delta$ (15)

که در رابطه فوق α فاکتور راندمان برخورد میباشد. همان طور که گفته شد این نیرو فقط در طول زمان Δt (زمانی که پلاسما در حال شکل گیری است) به سیال اعمال میشود که فقط شامل نیمی از چرخه جریان متناوب میباشد که تولید پلاسما فقط در طی این بازه زمانی انجام میشود. از نیروی حجمی حاصل در نیمه دوم چرخه جریان متناوب میتوان به دلیل عدم تولید و یا مقدار بسیار کم پلاسما صرفنظر کرد.

همچنین بهدلیل فرکانس بالای تخلیه، میتوان مقدار نیروی اعمالی بر سیال را بهصورت یک متوسط زمانی ثابت فرض کرد که در تمام طول چرخه ثابت میباشد و تغییر نمیکند. مقدار نیروی حجمی متوسط را میتوان بهصورت زیر تعریف کرد:

$$F_{\text{tavex}} = \frac{f_{\text{effx}} \Delta t}{T_{\text{t}}}$$

$$F_{\text{tavey}} = \frac{f_{\text{effy}} \Delta t}{T_{\text{t}}}$$
(16)

در این حالت میتوان زمان *T*t را به جای زمان یک چرخه متناوب، زمان کل اعمال ولتاژ نامید. بنابراین نیروی متوسط اعمالی را میتوان در نهایت به صورت زیر نوشت:

$$F_{\text{tavey}} = \vartheta f_{\text{effx}} \Delta t$$

$$F_{\text{tavey}} = \vartheta f_{\text{effy}} \Delta t$$
(17)

که در رابطه فوق θ فرکانس ولتاژ اعمالی است. با جایگذاری رابطه (15) در رابطه فوق و درنهایت جایگزینی روابط (10) الی (12) در رابطه مذکور، نیروی حاصل از عملگر پلاسمایی در راستای x و y را میتوان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$F_{\text{tavex}} = \frac{\vartheta \alpha \rho_c e_c \Delta t E}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} k_2 \delta$$

$$F_{\text{tavey}} = \frac{\vartheta \alpha \rho_c e_c \Delta t E}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} k_1 \delta$$
(18)

$$\rho(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F_{\rm B}$$
⁽⁵⁾

$$F_{\rm B} = \rho_{\rm c} E = \left(-\frac{1}{\lambda_{\rm D}^2}\right) E \tag{6}$$

$$E = -\nabla \varphi \tag{7}$$

$$\frac{1}{\lambda_{\rm D}^2} = \frac{e^2 n_0}{\varepsilon_0} \left(\frac{1}{T_{\rm i}} + \frac{1}{T_{\rm e}}\right) \tag{8}$$

بهطور کلی، در شبیهسازی عددی پلاسما، برای حل معادلات جریان سیال و محاسبه مقدار نیروی حجمی، اساساً نیاز به تعیین مقادیر و نحوه توزیع تابع پتانسیل الکتریکی در میدان اطراف محرک میباشد. که این معادلات در بسیاری از مطالعات اخیر در زمینه محرکهای پلاسمایی دی بی دی نیز ارائه شده است [34,33].

مدل ارائه شده برای شبیه سازی نیروی حجمی، یک مدل فیزیکی کامل نمی باشد بلکه در حقیقت یک مدل ریاضی-عددی است که در آن برای محاسبه نیروی حجمی، هم از مفاهیم فیزیکی و هم از نتایج داده های تجربی استفاده می شود و در نهایت، مشابه اعمال شرط مرزی سرعت، عمل می کند.

2- شبیهسازی عددی نیروی حاصل از عملگر

برای تعیین توزیع نیروهای حجمی توسط مدل شای و همکارانش [3]، مقدار نیروی حجمی حاصل به طریقی که در "شکل 4" نمایش داده شده، محاسبه می گردد.

در این مدل تغییرات شدت میدان الکتریکی بهصورت زیر (خطی) فرض میشود:

$$|E| = E_0 - k_1 x - k_2 y (9)$$

که در رابطه فوق، E_0 مقدار شدت میدان الکتریکی در نقطه o است که توسط رابطه V ولتاژ بیشینه میان دو الکترود و D فاصله جدایش میان الکترودها در راستای x میباشد. مقادیر ثابت k_1 و k_2 نیز با استفاده از این شرط حاصل میشوند که شدت میدان الکتریکی در مرز میان پلاسما و سیال برابر مقدار شکست¹ میباشد. به عبارت دیگر میتوان نوشت:

$$k_1 = \frac{E_0 - E_b}{b} \tag{10}$$

$$k_2 = \frac{E_0 - E_{\rm b}}{a} \tag{11}$$

که در رابطه فوق، $E_{
m b}$ شدت میدان الکتریکی در حالت شکست میباشد. اجزای میدان الکتریکی در راستای x و y نیز بهصورت زیر میباشند:



Fig. 4 Schematic of body force area applied by actuator in Shyy and his partners model [3]

شکل 4 شمایی از ناحیه اعمال نیروی حجمی^۲ حاصل از محرک در مدل شای و همکارانش [3]

¹ Breakdown ² body force

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.22.9

³ Elementary Charge

میباشد که توسط شای و همکارانش [3] ارائه گردید. همان طور که گفته شد این نیرو فقط در یک ناحیه مثلثی کوچک در بالای عملگر ایجاد می شود. با جایگزینی معادلات فوق در معادلات ناویراستوکس می توان نیروی حجمی حاصل از عملگر را بر روی سیال عبوری، بررسی کرد.

معادلات حاکم بر جریان ناپایا، آشفته، دوبعدی و غیرقابل تراکم برای سیال با خواص ثابت و بدون در نظر گرفتن نیروهای حجمی بهصورت روابط زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{19}$$

 $\frac{\partial u_{i}}{\partial t} + \frac{\partial (u_{i}u_{j})}{\partial x_{i}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + v\frac{\partial^{2}u_{i}}{\partial x_{i}\partial x_{j}} - \frac{\partial \bar{u}_{i}\bar{u}_{j}}{\partial x_{i}}$ (20)

معادلات حاکم بر جریان، به روش حجم محدود حل شدهاند. در این روش، مدل سیال موردنظر به صورت المانهای حجمی شبیهسازی شده و انتگرال گیری می شود، معادلات انتگرالی به دست آمده گسستهسازی شده و در نهایت معادلات به دست آمده در یک فرآیند تکراری حل می شود. روش حل جریان نیز فشار مبنا بوده و در الگوریتم عددی استفاده شده به منظور حل میدان جریان برای کوپل کردن گرادیانهای سرعت و فشار از روش سیمپل و برای گسسته سازی معادلات مومنتوم از روش مرتبه دوم استفاده شده است. برای مدل سازی آشفتگی جریان نیز از مدل آشفتگی K – ۵ استفاده شده است که از نوع مدل دو معادلهای برپایه گردابه از جت می باشد.

دراین تحقیق جهت شبیه سازی جریان اطراف پله از نرمافزار فلوئنت و جهت ایجاد شبکه اطراف پله از نرمافزار گمبیت استفاده شده است. نرمافزار فلوئنت به طور استاندارد قادر به شبیه سازی نیروی حجمی حاصل از عملگر نمی باشد. به منظور افزودن نیروی حجمی خارجی در نرمافزار فلوئنت، باید از توابع توصیفی کاربر استفاده نمود.

توابع توصیفی کاربر توابعی هستند که توسط کاربر، برنامهنویسی و در نرمافزار فلوئنت بارگذاری میشود تا ویژگیها و قابلیتهای استاندارد کد نوشته شده در فلوئنت را ارتقا دهد. این توابع توسط زبان برنامهنویسی C کدنویسی میشوند. هر تابع توصیفی کاربر شامل یک فایل udf.h میباشد که در ابتدای هر فایل و بهصورت ("include "udf.h") در ابتدای هر کد آورده میشود و به توابع تعریف شده اجازه میدهد که به مدلسازی انجام گرفته توسط نرمافزار اعمال شود.

توابع توصیفی کاربر، قادر به انجام طیف وسیعی از کاربردهای مختلف در نرمافزار فلوئنت بوده که به صورت استاندارد در نرمافزار وجود ندارند ولی می توانند بنا به خواست موردنظر کاربر به مدل سازی اعمال شوند. از جمله این کاربردها عبار تند از:

- 1- تعریف شرایط مرزی پیچیدہ
 - 2- تعريف خاص مواد
 - 3- افزودن ترمهای منبع
- 4- تغییر نرخ واکنش سطحی و حجمی
- 5- ارتقای مدلهای مخلوطهای چند فازی

با توجه به تمام ویژگیهای گفته شده در مورد توابع توصیفی کاربر و همچنین سادهتر بودن استفاده از آنها نسبت به روشهای دیگر، این توابع کاربردهای بسیاری در مهندسی یافته و اغلب برای مدلسازیهای پیچیدهتر ارجحیت دارند. در این تحقیق نیز به منظور مدلسازی نیروی حجمی حاصل از عملگر از تابع توصیف منبع^۲ استفاده میشود. این تابع بهمنظور افزودن

ترمهای موردنظر کاربر به معادلات مختلف سیالاتی و حرارتی از جمله معادلات پیوستگی، ممنتوم، انرژی، نسبتهای جرمی ذرات و به کار برده میشود.

شکل کلی این تابع به صورت زیر میباشد:

DEFINE_SOURCE(name,c,t,ds,eqn) همان طور که مشخص است این تابع دارای 5 ترم ورودی می باشد. ترم اول داخل پرانتز نشاندهنده نام تابع بوده و cs. t و eqn متغیرهایی هستند که توسط حل گر فلوئنت به توابع توصیفی کاربر منتقل می شوند. متغیر c یک نشانگر است که سلولی را که ترم منبع به آن اعمال می شود، مشخص می کند و t نیز یک نشانگر به رشته سلول است. آرایه ds ترم منبع مشتق شده با توجه به متغیر وابسته به معادله موردنظر می باشد. این ترم ممکن است به منظور خطی سازی ترم منبع و افزایش پایداری کل، مورد استفاده قرار گیرد. ترم nep نیز نشاندهنده معادله ای است که ترم منبع به آن اعمال می شود.

C برای اعمال نیروی حجمی، کد موردنظر توسط زبان برنامهنویسی C نوشته شده و سپس توسط نرمافزار فلوئنت به نواحی مختلف بر روی سطح پله که پلاسما در آنجا تولید میشود، اعمال میشود.

3- شبیه سازی مدل صفحه تخت

به منظور بررسی تاثیر محرک پلاسما بر الگوی جریان، از یک صفحه تخت به طول 20 میلیمتر و از سه شبکه با تعداد سلولهای متفاوت استفاده شده است. لازم به ذکر است فاصله مرکز صفحه از مرز بالا برابر نصف طول صفحه یعنی 10 میلیمتر است. در جدول 1 پارامترهای انتخاب شده برای مدلسازی محرک در این مطالعه آورده شده و در "شکل 5" نمایی از این صفحه و میدان حل نشان داده شده است.

معادلات حاکم بر میدان حل توسط نرمافزار انسیس فلوئنت نسخه 16 حل شده است. برای شرایط مرزی ورودی از سرعت ورودی^۳ استفاده شده و مقادیر سرعت جریان، شدت آشفتگی^۴ و طول مشخصه^۵ به ترتیب 10 متر بر ثانیه، 1٪ و 0.01 متر قرار داده شده است. در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی^۶ استفاده شده، همچنین بر روی سطح از شرط مرزی دیواره^۷ همراه با شرط عدم لغزش^۸ استفاده شده است. نمایی از هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده در "شکل 5" نشان داده شده است.

در "شکل 6" نمایی از محرک پلاسمای استفاده شده در این تحقیق آورده شده است. در این شکل ابعاد محرک پلاسما و ناحیهی اعمال نیروی

جدول 1 مشخصات پارامترهای انتخاب شده برای مدل سازی محرک پلاسما Table 1 Selected parameters specifications for modeling plasma actuator

مقدار	واحد	پارامتر
1×10^{17}	1/m ³	چگالی عددی الکترون
3000	Hz	فركانس ولتاژ اعمال شده
1.602×10^{-19}		بار الكترون
67×10^{6}	sec	زمان تخليه پلاسما
3×10^{6}	V/m	قدرت ميدان الكتريكى
4000	Volts	ولتاژ اعمال شده

³ Velocity inlet

8 No Slip

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.22.9

¹User Defined Functions (UDF)

² DEFINE_SOURCE

⁴ Turbulent Intensity ⁵ Length Scale

⁶Pressure outlet

⁷ Wall



Fig. 5 Geometry and boundary conditions set for flow analysis شکل 5 هندسه و شرایط مرزی تعیین شده برای تحلیل جریان

حجمی ناشی از محرک قابل مشاهده می اشد. در "شکل 7" موقعیتهای مکانی مختلف، برای اندازه گیری سرعت متوسط و همچنین اعتبار سنجی نمودارهای به دست آمده نشان داده شده است.

"شکل 8" مربوط به نمایی از شبکهبندی استفاده شده برای مدل صفحه تخت است. برای بررسی حساسیت شبکه نسبت به حل از سه شبکه ریز، متوسط و درشت استفاده شده است. معیار استقلال از شبکه ضریب پسا برحسب تعداد شبکه میباشد. از آنجا که اختلاف مقادیر به دست آمده از شبکه متوسط و ریز بسیار کم است و نیز برای کوتاه کردن زمان حل و استقلال از شبکه، شبکه متوسط برای حل انتخاب میشود.

4- بحث و نتايج

در ابتدا به منظور اعتبارسنجی روش حل مورد استفاده، از مقاله شای [3] استفاده شده است. برای این منظور سرعت متوسط جریان عبوری از روی صفحه تخت در موقعیت ST4 که در "شکل 7" نشان داده شده، به دست آورده شده است.

از مقایسه نمودار بهدست آمده و نموداری که توسط شای ارائه گردیده



Fig. 6 Schematic model of plasma field

شكل 6 شماتيك ميدان مدل پلاسما



Fig. 7 The solution domain and flat plate boundary conditions in the presence of $\,$ plasma actuator $\,$

شکل 7 دامنه حل و شرایط مرزی صفحه تخت در حضور محرک پلاسمایی



Fig. 8 View of the production network with boundary layer created شکل 8 نمایی از شبکه تولیدی همراه با لایه مرزی ایجاد شده



Fig. 9 Compare computed average velocity chart with reference results in station number $4\,$

شکل 9 مقایسه نمودار سرعت متوسط محاسبه شده با نتایج مرجع در موقعیت شماره چهار [3]

است، میتوان به این اطمینان رسید که نتیجه حاصل شده تا حد بسیار زیادی با نتایج مرجع تطابق دارد. مقادیر پارامترهای استفاده شده برابر سرعت جریان آزاد 5 m/s 6، فرکانس حامل kHz و ولتاژ اعمالی 4 kV میباشد.

1-4- تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد محرک پایا

برای بررسی تاثیر پارامترهای الکتریکی (ولتاژ و فرکانس) و همچنین تغییر سرعت جریان آزاد بر عملکرد محرک پلاسمای پایا ابتدا نمودار سرعت جریان آزاد در چهار موقعیت مختلف در بالا دست و پایین دست محرک پلاسما در "شکل 10" نشان داده شده است (محل 4 موقعیت موردنظر در "شکل 7" قابل مشاهده است).

همانطور که در "شکل 10" قابل مشاهده میباشد، تغییرات نمودار سرعت متوسط جریان آزاد نشان میدهد که، در بالا دست محرک تغیییرات سرعت بسیار ناچیز میباشد و سرعت تقریباً برابر سرعت جریان آزاد باقی میماند (موقعیتهای شماره 1 و 2).

نتایج در پایین دست محرک بسیار متفاوت است. همان طور که قابل مشاهده است افزایش سرعت بلافاصله پس از محرک و اعمال نیروی حجمی به جریان آزاد آغاز میشود. در واقع ناحیهی اعمال پلاسما جریان آزاد را به سمت خود میکشد و همین مسئله باعث میشود که سرعت جریان آزاد در این ناحیه بیشتر گردد.

نکته دیگر این است که این مکش جریان باعث میگردد که جریان به سمت دیواره کشیده شود و سرعت در ناحیه نزدیک به سطح مقدار بیشتری داشته باشد. همین مسئله در ادامه باعث میگردد که طول ناحیه بازپیوست



Fig. 10 Average speed chart in the four different stations, Free stream velocity is 5 m/s, Applied voltage is 4 kV and Carrier frequency is 3 kHz

شکل 10 نمودار سرعت متوسط در چهار موقعیت مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، ولتاژ اعمالی 4 kV، فرکانس حامل 3 kHz

جریان کاهش یافته و جدایش جریان به تاخیر بیافتد، که این امر باعث کاهش پسای فشاری، بهبود برآ و سریعتر شدن فرآیند بازیابی فشار می گردد.

نتایج نشان میدهد که سرعت متوسط جریان آزاد در موقعیت شماره چهار به بیشترین مقدار خود میرسد. اما همان طور که از نمودار قابل مشاهده است با فاصله گرفتن از ناحیه اعمال نیروی حجمی توسط محرک رفته رفته از سرعت جریان آزاد کاسته میشود و در نهایت در فاصله دور دست از این ناحیه سرعت مجدداً با سرعت جریان آزاد در ورودی برابر می گردد. این تغییر نشاندهنده آن است که نیروی حجمی اعمالی از محرک در ناحیه بسیار کوچکی اعمال می گردد ولی تاثیر آن بسیار چشمگیر است.

از نمودار قبل میتوان به این نتیجه رسید که موقعیت شماره چهار مناسب ترین موقعیت برای بررسی عملکرد پارامترهای الکتریکی بر روی محرک است، به منظور بررسی تاثیر تغییر ولتاژ اعمالی بر عملکرد محرک پلاسما، نمودار سرعت متوسط جریان آزاد در موقعیت شماره چهار به دست آورده شده و در "شکل 11" نمایش داده شده است.



Fig. 11 Average velocity chart in the different applied voltages, station number 4, free stream speed is 5m/s, Carrier frequency is 3kHz شكل 11 نمودار سرعت متوسط در ولتاژهاى مختلف، موقعيت شماره 4، سرعت

جريان آزاد برابر 5m/s، فركانس حامل 8 kHz

همان گونه که در "شکل 11" مشاهده می شود، به طور کلی با افزایش مقادیر ولتاژ اعمالی، سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک افزایش می یابد. افزایش مقدار ولتاژ تا حدی می تواند سرعت متوسط جریان را افزایش دهد و با افزایش مقدار ولتاژ مشاهده می گردد که سرعت متوسط جریان تغییر چندانی نداشته است. علت این اتفاق می تواند این باشد که، فرآیند تخلیه پلاسما، از دو رژیم تخلیه نسبتاً متفاوت پیروی می کند. مرحله اول، تا قبل از اشباع شدن محرک، و مرحله دوم، بعد از اشباع شدن محرک.

در حالت اول (تخلیه برافروختگی یکنواخت) که سرعت القایی در حال رشد است، افزایش مقادیر ولتاژ اعمالی، باعث افزایش پدیده انتقال بار، افزایش چگالی پلاسما، افزایش برافروختگی (از طریق تشکیل پلاسمای یکنواخت)، افزایش مقدار نیروی حجمی اعمالی پلاسما به ذرات هوا (سیال) و در نهایت افزایش سرعت متوسط جریان میشود. این در حالی است که با اشباع شدن محرک در مرحله دوم، با افزایش بیشتر مقادیر ولتاژ اعمالی، سرعت موثر (میانگین) جریان القایی کاهش می یابد.

در حقیقت، اگر یک محرک پلاسمای دی بی دی به وسیله منبع تغذیه، بیشتر از ظرفیت خود، شارژ الکتریکی شود، محرک اشباع می شود و تخلیه پلاسما از حالت برافروختگی یکنواخت به حالت برافروختگی رگهای (غیریکنواخت) تبدیل می شود. از طرف دیگر، این پدیده باعث می شود در سایر نقاط محرک، قدرت چگالی پلاسما و نیز مقدار نیروی حجمی اعمالی به سیال کاهش یابد و نهایتا، سرعت متوسط جریان تغییر محسوسی نخواهد داشت.

شروع این پدیده (اشباع شدن محرک و تشکیل تخلیه برافروختگی رگهای) می تواند تابع عوامل مختلفی باشد، مانند جنس لایه دی الکتریک و ضخامت آن، هندسه و آرایش الکترودها، فشار و جنس ماده سیال و همچنین مشخصات و شکل موج سیگنال حامل اعمالی به محرک.

با توجه به "شکل 12" میتوان مشاهده نمود که با افزایش فرکانس حامل، سرعت متوسط جریان آزاد افزایش مییابد. در توجیه این روند میتوان به این نکته اشاره نمود که با افزایش فرکانس حامل، جریان الکتریکی مصرفی در محرک به صورت محسوسی افزایش مییابد که نشان دهنده افزایش تخلیه برافروختگی و چگالی پلاسما میباشد.



Fig. 12 Average velocity chart in the different carrier frequencies, station number 4, applied voltage is 4kV, free stream speed is 5m/s شكل 12 نمودار سرعت متوسط در فركانسهاى مختلف، موقعيت شماره 4، ولتاژ اعمالى برابر 4kV ، سرعت جريان آزاد برابر 5m/s

از "شکلهای 11 و 12" میتوان به این نتیجه دست یافت که حالت بهینه برای عملکرد محرک پلاسما، نزدیک شدن به حالتی است که محرک تشکیل یک پلاسمای برافروخته قوی ولی یکنواخت در امتداد طول محرک را میدهد. نکته دیگر اینست که محرک پلاسما میتواند متحمل حجم نسبتاً بزرگی از تخلیه دیالکتریکی در هوا بشود. این امر با تجمع الکتریکی بر روی سطح دیالکتریک و تشکیل رژیم پلاسما (در راستای طول الکترودها)، از طریق تخلیه برافروختگی ممکن میشود.

بررسیهای انجام شده نشان دهنده آن است که مطابق "شکل 13"، با افزایش سرعت جریان آزاد، پیک نمودار سرعت متوسط جریان در پایین دست محرک کاهش مییابد. در واقع پلاسما مومنتوم بسیار کمی را به لایه مرزی وارد میکند، این مومنتوم با سرعت القایی مشخصی وارد لایه مرزی میگردد که بسته به میزان ولتاژ اعمالی و فرکانس حامل مقدار آن متفاوت خواهد شد.

ذکر این نکته لازم است که در هر صورت سرعت القایی مومنتوم به سیال دارای یک پیک میباشد و از حد مشخصی بیشتر نمی گردد. همچنین باید توجه داشت که مومنتوم تولید شده توسط محرک پلاسما نیروی حجمی کمی را به سیال منتقل میکند.

با توجه به مطالب گفته شد میتوان به این نتیجه رسید که با افزایش سرعت جریان آزاد، محرک توان تزریق مومنتوم زیادی را به لایه مرزی نخواهد داشت. زیرا سرعت بالای جریان آزاد بر سرعت القایی محرک غلبه میکند و این امر باعث کاهش عملکرد محرک میگردد و همانطور که در نمودار "شکل 13" مشخص است با افزایش سرعت جریان آزاد پیک نمودار سرعت متوسط جریان در ناحیه اعمال نیروی حجمی کاهش مییابد

4-2- تاثیر پارامترهای مختلف در عملکرد محرک پایا

برای بررسی تأثیر پارامترهای گفته شده، ابتدا در سرعت جریان آزاد 5 m/s ، فرکانس 12 kHz و ولتاژ kV 15، در سیکل وظیفه 60 درصد و فرکانس تحریک 220 Hz در چهار موقعیت نشان داده شده در "شکل 7"، نمودار سرعت متوسط رسم شده است.

مطابق "شكل 14" تغييرات سرعت متوسط از موقعيت (1) به سمت



Fig. 13 Average velocity chart in the different free stream speeds, applied voltage is 4kV, Carrier frequency is 3kHz, station number 4 .4kV نمودار سرعت متوسط در سرعتهای مختلف جریان آزاد، ولتاژ فرکانس حامل 3 kHz، موقعیت شماره 4



Fig. 14 Average velocity chart in the different stations, Free stream velocity is 5 m/s, Applied voltage is 4kV, Carrier frequency is 3 kHz, excitation frequency is 200 Hz

شکل 14 نمودار سرعت متوسط در موقعیتهای مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، ولتاژ اعمالی 4 kV، فرکانس حامل 3 kHz، فرکانس تحریک Hz 200 Hz

موقعیت (4) بیشتر میگردد و در پایین دست محرک پلاسما به بیشترین مقدار خود میرسد و نشاندهنده آن است که محرک پلاسما به خوبی تأثیر خود را بر جریان آزاد اعمال میکند.

بررسیها نشان میدهد به محض روشن شدن محرک و شروع تخلیه پلاسما، یک نیروی حجمی به میدان سیال اطراف محرک اعمال میشود که منجر به تولید جریان القایی باد یونی می گردد. این جریان القایی به طرف پایین دست محرک (یعنی به طرف الکترود پوشیده) حرکت می کند و باعث تشکیل یک جت دیواره^۱، بر روی سطح محرک، بهصورت مماس بر دیواره میشود. با روشن شدن محرک، یک لایه برشی آزاد، بین دو جریان (1) جت دیواره زیرین و (2) هوای بالای محرک، تشکیل میشود که نهایتا منجر به تولید، رشد و ریزش یک گردابه به طرف پایین دست محرک می گردد.

در محرکهای ناپایا، پس از روشن شدن محرک و تشکیل گردابه آغازین، تداوم تخلیه پلاسما، باعث تداوم پدیده پیچش گردابه در لایه برشی شده و همزمان باعث میشود که گردابه در حالی که به طرف پایین دست حرکت میکند و از محرک دور میشود، اندازهاش رشد کند. در ادامه، با عبور گردابه آغازین از محرک (ریزش گردابه)، تداوم جریان جت دیواره (باد یونی)، باعث تشکیل یک لایه مرزی القایی بر روی سطح محرک (به طرف پایین دست) میشود.

اما آن چه که در این قسمت حائز اهمیت میباشد، آن است که با مقایسه "شکل 10 و 14" میتوان به این نکته پی برد که تفاوت پیک نمودار سرعت متوسط در این دو نمودار بسیار ناچیز است و این نتیجه باعث میگردد که ما بتوانیم با اطمینان بسیار زیادی از محرکهای ناپایا به جای محرکهای پایا استفاده کنیم زیرا این محرکها بسته به فرکانس تحریک و سیکل وظیفه تعریف شده برای آنها مدت زمان مشخصی را خاموش هستند و این خاموش بودن باعث کاهش مصرف انرژی در جایی که این پارامتر اهمیت بسیاری دارد، میگردد. همچنین در کاهش هزینهها نیز تاثیر چشمگیری دارد.

در ادامه، عملکرد و رفتار محرکهای پلاسمایی ناپایا، با توجه به اندازه گیری متغیرهای آن، بررسی شده است. در این راستا، تاثیر متغیرهای مختلف ورودی در این محرکها، یعنی تاثیر مقادیر فرکانس تحریک و سیکل

¹ Wall Jet

3.5 fe = 200 Hz fe = 50 Hz fe = 100 Hzfe = 10

Fig. 16 Maximum Average velocity chart in the different excitation frequencies and Duty cycles , Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz, Applied voltage is 5 kV

شکل 16 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در فرکانسهای تحریک و سیکلهای وظیفه مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz 6، ولتاژ اعمالی برابر 5 kV



Fig. 17 Maximum Average velocity chart in the different excitation frequencies and Applied voltages , Duty cycles is 30%, Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz

شکل 17 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در فرکانسهای تحریک و ولتاژهای اعمالی مختلف، سیکل وظیفه 30 درصد، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz

متناوب گردابهها در دنباله اجسام) میباشد، زیرا میتواند قابلیت تاثیرگذاری بیشتری بر کنترل جریان القایی داشته باشد.

در این موارد، استفاده از تحریک ناپایا، میتواند علاوه بر کاهش مصرف انرژی الکتریکی، قابلیت کنترل جریان بالاتری را نیز ایجاد کند.

نکته قابل توجه دیگر در زمینه عملکرد محرکهای ناپایا این است که مطابق مشاهدات عینی انجام شده در حین انجام آزمایشات تحقیق کنونی، آشکار شد که تحریک ناپایا (در مقایسه با تحریک پایا)، بهدلیل عدم گرمایش پیوسته (بهدلیل داشتن زمان برای استراحت و خنککاری هنگام خاموش بودن سیگنال، ناشی از عدم فعالیت پیوسته محرک)، میتواند باعث کاهش دمای محرک شده و از تخریب لایه عایق دیالکتریک (تغییر حالت، باد کردن و حباب زدن، و نهایتا ذوب شدن لایه پلکسی گلس)، در اثر گرمایش بیش از حد محرک (برای حالت عملکرد طولانی مدت محرک در ولتاژ اعمالی و فرکانسهای حامل بالا) جلوگیری کند. وظیفه، بر روی سرعت متوسط در موقعیت شماره (4) اندازه گیری و ارزیابی شده است. در کلیه بررسیها مربوط به بخش بررسی عملکرد محرکهای ناپایا، مقدار فرکانس حامل برابر 6 کیلوهرتز می باشد.

در ابتدا، تاثیر تغییرات مقدار سیکل وظیفه (برحسب درصد) بر روی عملکرد محرک مطالعه شده است. در این راستا، نمودارهای تغییرات سرعت القایی متوسط برحسب مقادیر مختلف سیکل وظیفه از 10 درصد الی 100 درصد (تحریک پایا)، از طریق افزایش ولتاژ اعمالی در فرکانس تحریک 200 هرتز، در "شکل 15" نشان داده شده است.

نتایج بررسیها حاکی از آن است که مطابق "شکل 15" با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، در یک فرکانس تحریک و سیکلهای وظیفه مختلف و معین، مقادیر سرعت القایی متوسط افزایش مییابد. این امر بیانگر افزایش حجم و قدرت پلاسما در این حالت است. روند این پدیده، تقریبا مشابه عملکرد محرک های پایا (در حالت رژیم برافروختگی یکنواخت) میباشد. بهعلاوه، با افزایش مقدار سیکل وظیفه، در یک فرکانس تحریک ثابت، و در نتیجه افزایش مدت زمان روشن بودن سیگنال اعمالی به محرک در هر پالس تحریک، مقادیر سرعت القایی متوسط افزایش می یابد.

نتایج بررسیها حاکی از آن است که مطابق "شکل 16" نمودار ماکزیمم سرعت متوسط با افزایش سیکل وظیفه و فرکانس تحریک، تقریبا به صورت خطی افزایش مییابد.

پس از مطالعه پارامتر سیکل وظیفه، حال نوبت بررسی تاثیر فرکانس تحریک، بر روی عملکرد محرک ناپایا و همچنین مشخصات جریان القایی آن می باشد. برای رسیدن به این مقصود، نمودار تغییرات ماکزیمم سرعت متوسط برحسب ولتاژ اعمالی در سیکل وظیفه 30 درصدی، برای سه فرکانس تحریک مختلف 50، 100 و 200 هرتز، در "شکل 17" ارائه شده است.

همان گونه که در "شکل 17" ملاحظه می شود، اگرچه با افزایش ولتاژ اعمالی، ماکزیمم سرعت متوسط افزایش می یابد، ولی تغییر مقدار فرکانس تحریک، تاثیر قابل ملاحظهای بر آنها ندارد و نمودار برای هر سه فرکانس، تقریباً بر روی یکدیگر افتاده است.

مزیت عمده محرکهای ناپایا، برای کنترل جریانهای ناپایا و پالسی است که شامل کنترل لایههای برشی ناپایا و کنترل جدایش جریان (ریزش



Fig. 15 Maximum Average velocity chart in the different Applied voltages and Duty cycles, , Free stream velocity is 5 m/s, Carrier frequency is 6 kHz, excitation frequency is 200Hz

شکل 15 نمودار ماکزیمم سرعت متوسط در ولتاژها و سیکلهای وظیفه مختلف، سرعت جریان آزاد 5m/s، فرکانس حامل 6 kHz 6، فرکانس تحریک 200 Hz

4-3- بررسی تاثیر محرک بر رفتار الگوی جریان

بهمنظور بررسی تاثیر محرک پلاسما بر الگوی جریان، پس از روشن کردن محرک، عملکرد آن در زمانهای مختلف بررسی شد. برای این منظور با نصب محرک بر روی صفحه تخت و روشن کردن آن تغییرات حاصل شده بر روی جریان نمایش داده شده است.

بررسیها نشان میدهد (مطابق شکل 18)، به محض روشن شدن محرک و شروع تخلیه پلاسما، یک نیروی حجمی به میدان سیال اطراف محرک اعمال میشود که منجر به تولید جریان القایی باد یونی می گردد. این جریان القایی به طرف پایین دست محرک (یعنی به طرف الکترود پوشیده) حرکت



Fig. 18 Contour of flow pattern in the presence of a plasma actuator (a):0.004 s , (b):0.005 s , (c):0.01 s , (d):0.02 s

شكل 18 كانتور الگوى جريان در حضور عملگر پلاسما، (الف): s 0.004، (ب): s 0.005، (ج): 0.016، (د): s 0.02

می کند و باعث تشکیل یک جت دیواره، بر روی سطح محرک، بهصورت مماس بر دیواره میشود. با روشن شدن محرک، یک لایه برشی آزاد، بین دو جریان (1) جت دیواره زیرین و (2) هوای بالای محرک، تشکیل میشود که نهایتا منجر به تولید، رشد و ریزش یک گردابه به طرف پایین دست محرک می گردد.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش متغیرهای موثر بر عملکرد محرکهای پلاسمای دی بی دی در حالت تحریک پایا و ناپایا مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مورد بررسی در رابطه با محرکهای پایا عبارتند از: فرکانس حامل، ولتاژ حامل و سرعت جریان آزاد. بهطور کلی مشخص گردید که با افزایش ولتاژ، سرعت متوسط جریان افزایش میابد، البته باید توجه داشت که، افزایش ولتاژ تا حدی قادر به افزایش پیک نمودار سرعت متوسط جریان خواهد بود و با تداوم افزایش ولتاژ، در پیک نمودار سرعت متوسط جریان خواهد بود و با تداوم افزایش نتایج نشان داد با افزایش فرکانس حامل نیز، پیک نمودار سرعت متوسط افزایش مییابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش سرعت جریان تازاد، عملکرد محرک پلاسما کاسته میشود. در بخش بررسی محرک ناپایا، نتایج نشان داد با افزایش مقدار سیکل وظیفه، نمودار سرعت تغییر نموده و بالاتر از 50 درصد بسیار ناچیز است.

همچنین با بررسی تاثیرات مقادیر مختلف فرکانس تحریک و سیکل وظیفه، بر روی عملکرد محرک و همچنین مشخصات کمی و کیفی جریان القایی، مشخص گردید که تغییرات در فرکانس تحریک، تاثیر چندانی بر مقدار ماکزیمم سرعت متوسط ایجاد شده ندارد، ولی با افزایش مقدار سیکل وظیفه، مقادیر مذکور تقریباً بهصورت خطی افزایش می یابند. بهعلاوه با افزایش فرکانس تحریک همزمان با افزایش فرکانس ریزش گردابهها از محرک، اندازه و قدرت گردابهها کاهش می یابد. این در حالی است که اگر فرکانس تحریک از یک حد مشخصی بالاتر رود جریان القایی در پایین دست محرک، تقریباً مشابه یک جریان پایا میشود.

بهطور کلی، میتوان نتیجه گرفت که استفاده از تحریک ناپایا در مقایسه با تحریک پایا، میتواند باعث کاهش قابل ملاحظه توان مصرفی الکتریکی محرک شده و همچنین قابلیت تاثیرگذاری بیشتری را بر کنترل جریان توسط محرک داشته باشد. در حقیقت، میتوان گفت که مزیت اصلی محرکهای ناپایا، توانایی آنها در تولید جریانهای القایی پالسی، لایههای برشی ناپایا و جریانهای گردابی میباشد که میتواند بهصورت موثری برای کنترل جریانهای ناپایا و گردابی و همچنین برای کنترل لایههای برشی جدا شده استفاده شود.

6- فهرست علايم

ρ	چگالی بار (kgm ⁻³)
T _{contro}	دوره تناوب موج پالس (تحریک ناپایا)
1	دما (K)
ı	سرعت (ms ⁻¹)
λ_{I}	طول دبای (m)
R	عدد رينولدز
fe	فرکانس تحریک (Hz)
I	فشار (kgm ⁻¹ s ⁻²)

resolved particle image velocimetry investigation, 4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Seattle, Washington, 23-26 June, 2008.

- [14] M. L. Post, T. C. Corke, Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators, AIAA Journal, Vol. 42, No. 11, pp. 2177-2184, 2004.
- [15] M. L. Post, T. C. Corke, Separation control using plasma actuators: Dynamic stall vortex control on oscillating airfoil, AIAA Journal, Vol. 44, No. 12, pp. 3125-3135, 2006.
- [16] H. Do, W. Kim, M. G. Mungal, M. A. Cappelli, Bluff body flow separation control using surface dielectric barrier discharges, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada, 2007.
- [17] J. W. Gregory, Ch. O. Porter, T. E. McLaughlin, Circular cylinder wake control using spatially distributed plasma forcing, 4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Wahington, 23-26 June, 2008.
- [18] G. I. Font, Boundary layer control with atmospheric plasma discharges, AIAA Journal, Vol. 44, No. 7, pp. 1572-1578, 2006.
- [19] D. M. Schatzman, F. O. Thomas, Turbulent boundary layer separation control with plasma actuators, 4th Flow Control Conference, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Wahington, 23-26 June, 2008.
- [20] C. He, T. C. Corke, M. P. Patel, Plasma flaps and slats: an application of weakly ionized plasma actuators, Journal of Aircraft, Vol. 46, No. 3, pp. 864-873, 2009.
- [21] J. Huang, T. C. Corke, F. O. Thomas, Plasma actuators for separation control of low-pressure turbine blades, AIAA Journal, Vol. 44, No. 1, pp. 51-57, 2006.
- [22] D. K. V. Ness, T. C. Corke, S. C. Morris, Turbine tip clearance flow control using plasma actuators, AIAA Paper, Vol. 21, pp. 2006, 2006.
- [23] F. O. Thomas, A. Kozlov, T. C. Corke, Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction, AIAA Journal, Vol. 46, No. 8, pp. 1921-1931, 2008.
- [24] C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. Van Dyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper, T. C. Corke, Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: Plasma morphology, AIAA Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 589-594, 2004.
- [25] G. H. Pouryussefi, Experimental Investigation of Leading Edge Separation Bubble Control on an Iced Airfoil by Plasma Actuator, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, K.N.Toosi University, Tehran, 2015. (فارسی in Persian)
- [26] B. L. Owsenek, J. Seyed-Yaghoobi, Theoretical and experimental study of electrohvdrodynamic heat transfer enhancement through wire-plate corona discharge, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 119, No. 3, pp. 604-610, 1997.
- [27] D. M. Orlov, T. C. Corke, M. L. Patel, Electric circuit model for aerodynamic plasma actuator, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, Nevada, 9-12 January, 2006.
- [28] D. M. Orlov, Modeling and Simulation of Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators, Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, Indiana, 2006.
- [29] G. Font, W. L. Morgan, Plasma discharge in atmospheric pressure oxygen for boundary layer separation control, 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Ontario, Canada, 6-9 June, 2005.
- [30] M. Forte, J. Jolibois, F. Moreau, G. Touchard, M. Gazalens, Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity-application to flow control, Experiments in Fluids, Vol. 43, No. 6, 2007, PP. 917-928.
- [31] T. C. Corke, M. L. Post, D. M. Orlov, Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: Physics, modeling and applications, Exp. Fluid, Vol. 46, No. 1, pp. 1-26, 2009.
- [32] D. M. Orlov, T. C. Corke, Numerical simulation of aerodynamic plasma actuator effects, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, Nevada, 10-13 January, 2005. [33] F. O. Thomas, T. C. Corke, M. Iqbal, A. Kozlov, D. Schatzman,
- Optimazation of dielectric barrier discharge plasma actuator for active aerodynamic flow control, AIAA Journal, Vol. 47, No. 9, pp. 2169-2178, 2009
- [34] F. O. Thomas, A. Kozlov, T. C. Corke, Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction, AIAA Journal, Vol. 46, No. 8, pp. 1921-1931, 2008.

مدت زمان اعمال سیگنال به محرک T_{signal}

ولتاژ (v) علايم يوناني

V

پتانسيل الكتريكي

چگالی (kgm⁻³) D سيكل وظيفه ß لزجت دینامیکی (kgm⁻¹s⁻¹) μ

> لزجت سينماتيكي υ

بالانويسها

محرك پلاسمايي تخليه سد دي الكتريک DBD

7– تقدير و تشكر

با تشک از اساتید گرامی جناب آقای دکتر حمید پرهیزکار و جناب آقای دکتر غلامحسین پوریوسفی که در روند انجام پژوهش حاضر نهایت همکاری را با حقير داشتهاند.

8- مراجع

- [1] M. Gad-el-Hak, M. Pollard, J. P. Bounnet, Flow Control: Fundamental and Practices, pp. 335-467, Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 1998.
- [2] M. P. Patel, T. T. Ng, S. Vasudevan, T. C. Corke, M. Post, T. E. McLaughlin, et al., Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator, Journal of Aircraft, Vol. 45, No. 1, pp. 223-236, 2008.
- W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson, Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics, Journal of Applied Physics, Vol. 92, No. 11, pp. 6434-6443, 2002
- [4] M. Malik, L. Weinstein, M. Hussani, Ion wind drag reduction, AIAA 21th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 83-0231, Reno, NV, Jan, 1983
- M. Forte, J. Jolibois, F. Moreau, G. Touchard, M. Gazalens, Optimization of [5] a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity-application to flow control, *Experiments in Fluids*, Vol. 43, No. 6, pp. 917-928, 2007 K. P. Singh, S. Roy, D. Gaitonde, Study of control parameters for separation
- [6] mitigation using an asymmetric single dielectric barrier plasma actuator, Plasma Sources Science and Technology, Vol. 15, No. 4, pp 735-743, 2006.
- G. M. Colver, S. El-Khabiry, Modeling of DC corona discharge along an electrically conductive flat plate with gas flow, Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 35, No. 2, pp. 387-394, 1999.
- C. Noger, J. S. Chang, G. Touchard, Active controls of electrohydrodynamically induced secondary flow in corona discharge reactor, Proc. 2nd Int'l Symp Plasma Techn. Polution Cont, Bahia, pp. 136-141, 1997.
- [9] J. R. Roth, D. M. Sherman, S. P. Wilkinson, Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma, AIAA Journal, Vol. 38, No. 7, pp. 1166-1172, 2000.
- [10] S. P. Wilkinson, Investigation of an oscillating surface plasma for turbulent drag reduction, AIAA Paper, Vol. 1023, pp. 2003, 2003.
- [11] J. D'Adamo, G. Artana, E. Moreau, G. Touchard, Control of the airflow close to a flat plate with electrohydrodynamic actuators, ASME 2002 Joint US- European Fluids Engineering Division Conference, pp. 1339-1344, Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, 2002.
- [12] R. Sosa, E. Moreau, G. Touchard, G. Artana, Stall control at high angle of attack with periodically excited EHD actuators, 35th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Portland, Oregan, 28 June-1 July, 2004.
- [13] N. Benard, P. Braud, J. Jolibois, E. Moreau, Airflow reattachment along a NACA 0015 airfoil by a surface dielectric barrier discharge actuator-time-

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28