

مطالعه تجربی کنترل فعال جریان به وسیله عملگر پلاسمایی برای جابه جایی زاویه واماندگی یک ایرفویل NACA0012

سید آرش سید شمس طالقانی^۱، عبدالله شادآرام^۲ و مسعود میرزایی^۲

دانشکده‌های مهندسی مکانیک و مهندسی هوافضا

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۱/۱۵)

چکیده

کنترل جریان به طور عمومی در طراحی اجسام پرنده و به طور خاص روی فلپها و سطوح کنترلی اهمیت بسیار زیادی دارد. به کارگیری عملگر پلاسمایی روی یک سطح کنترلی می‌تواند سبب تغییر مکان نقطه جدایش یا حذف آن شود. این ابزار کنترل جریان که به تازگی مورد بررسی محققان قرار گرفته، یک نیروی حجمی ایجاد می‌کند که سبب تولید یک میکرو جت در نزدیک دیواره می‌شود. تحقیق حاضر اثرات عملگر پلاسمایی روی جریان در اطراف یک ایرفویل مدل NACA0012 را تا زوایای ۶ درجه بعد از زاویه واماندگی به منظور جابه‌جایی نقطه جدایش بررسی می‌کند. به همین منظور، اثرات این عملگر با موج سینوسی در سیکل‌های کاری مختلف از پلاسمای غیر دائمی روی توزیع فشار روی این ایرفویل و ضریب لیفت مطالعه می‌شود. تحقیق حاضر در رینولدز حدود 3.7×10^5 انجام شده است. تولید پلاسمای به وسیله منبع تغذیه ولتاژ بالا و در ولتاژهای تا حدود ۱۴ کیلو ولت از نوع AC انجام شده است. نتایج حاضر افزایش ضریب لیفت در زوایای تا ۶ درجه بعد از واماندگی با سیکل‌های کاری حدود ۱۴٪ را نشان می‌دهد و این تأثیر بهتر از سیکل‌های کاری بالاتر از ۵۰٪ است.

واژه‌های کلیدی: عملگر پلاسمایی، کنترل فعال، ایرفویل، سیکل کاری

Experimental Investigation of Active Flow Control for Changing Stall Angle of a NACA0012 Airfoil, Using Plasma-Actuator

S.A. Sayyed-Shams Taleghani, A. Shadaram, and M. Mirzaei

Mech. Eng. and Aerospace Eng. Dep'ts.

K.N. Toosi Univ. of Tech.

(Received: 12 Feb., 2011; Accepted: 3 April, 2012)

ABSTRACT

Active flow control has great importance in design of flying objects in general and control flaps in particular. Using dielectric barrier discharge as plasma actuators over control flaps can cause a change in position of separation point or can eliminate it. This new flow control device produces a body force that causes generating a micro wall jet. The present study aims to investigate experimentally the effects of the plasma actuator over a NACA0012 airfoil in high angle of attacks (up to 6 degrees above the stall) in order to displace the separation point. Therefore, the effects of the plasma actuator with sine wave unsteady excitation and different duty cycles on airfoil pressure coefficient distribution and lift coefficient were studied. The experiments were performed at $Re_c = 3.7 \times 10^5$. The plasma generation was performed, using a high voltage AC power supply at voltages up to $14kV_{p-p}$. The results indicate that lift coefficient increases with unsteady plasma actuation at post stall angles of attack up to 6 degree. The improvement of the pressure coefficient distribution in upper side of the airfoil for lower duty cycles about 14% is better than higher duty cycles above 50%.

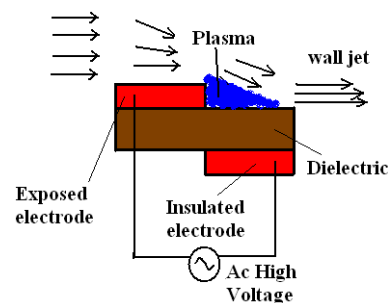
Keywords: Plasma Actuator, Active Control, Airfoil, Duty Cycle

۱- دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): Arash.taleghani@gmail.com

۲- دانشیار

۱- مقدمه

ایجاد پلاسمای سطحی به وسیله عملگر پلاسمایی نوع DBD در اثر یک میدان الکتریکی قوی سبب ایجاد یک سرعت موضعی در حد چند متر بر ثانیه می‌شود. این پدیده به تازگی مورد علاقه محققان آیرودینامیک به عنوان یک ابزار کنترل جریان قرار گرفته است [۴-۱]. اصول کاری این وسیله به گونه‌ای است که یک میدان الکتریکی قوی سبب جابه‌جایی و حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در نزدیک سطح شده و این جابه‌جایی باعث حرکت ذرات خنثی محیط شده است که در نتیجه یک میکروجت در حد چند متر بر ثانیه در نزدیک سطح ایجاد می‌شود [۵]. در شکل ۱ شماتیکی از این وسیله نشان داده شده است. علی‌رغم اینکه تا کنون از این وسیله بیشتر در جریان‌های سرعت پایین مورد استفاده قرار گرفته است، اما نمونه‌های دیگری از کنترل جریان توسط عملگر پلاسمایی با تحریک ناپایداری‌های لایه مرزی در سرعت‌های مافوق صوت [۶] دیده می‌شود.



شکل (۱): شماتیک یک عملگر پلاسمایی از نوع DBD.

نوع دیگر عملگر پلاسمایی که سابقه طولانی‌تری نسبت به DBD دارد، نوع کرونا^۱ است [۷] که تولید پلاسمای آن به طور حجمی است. به دلیل اینکه کرونا در ولتاژهای بالا خیلی سریع به محدوده قوس الکتریکی گذر می‌کند، سرعت کمی را از خود نشان می‌دهد [۸]. با توجه به این مسئله و تولید پلاسمای به طور سطحی و موضعی، روث^۲ و همکارانش [۹] در سال ۱۹۹۸ برای اولین بار تخلیه سد دی الکتریکی (DBD) که قبلاً آن را به نام خود ثبت اختراع کرده بودند [۱۰] برای کنترل لایه مرزی مورد استفاده قرار دادند.

بعد از گذشت بیش از یک دهه از معرفی این وسیله توسط روث و همکارانش [۹]، کاربردهای متفاوتی از آن، تا به امروز توسط محققان ارائه شده است. به طور نمونه می‌توان به کارهای تحقیقاتی توسط دانشگاه پوآتیه^۳ [۱۵]- [۱۱] اشاره کرد که عمدتاً بر روی بهینه‌سازی عملگر در تولید سرعت بیشتر و مصرف انرژی پایین‌تر، اندازه‌گیری پروفیل سرعت در محیط ساکن و به کارگیری عملگر روی ایرفویل در موقعیت‌های مختلف، به منظور حذف ناحیه حباب در سرعت‌های خیلی کم متمرکز هستند. محققین دیگری که بیشترین فعالیت را روی کنترل فعال جریان به وسیله عملگر پلاسمایی انجام داده اند، از دانشگاه نوتردام آمریکا هستند. بیشترین فعالیت این تیم روی افزایش نیروی حجمی توسط پلاسمای [۱۶]، استفاده از عملگر پلاسمایی به منظور کاهش نیروی درگ و افزایش لیفت [۱۷]، استفاده در پره‌های توربین کم فشار [۱۸] و مدل‌سازی عددی اثرات نیروهای حجمی [۱۹] متمرکز شده است.

در این پروژه به منظور بررسی کارایی عملگر پلاسمایی روی یک ایرفویل متقارن، اثرات عملگر پلاسمایی در شرایط مختلف پلاسمای غیردائمی و با فرکانس‌های موج و تحریک متفاوت بررسی می‌شود. هدف از این کار جابه‌جایی زاویه واماندگی ایرفویل و افزایش لیفت در زوایای بالاتر از زاویه واماندگی است. گام زمانی یونیزاسیون با توجه به نتیجه‌های نیکولاس^۴ و همکارانش [۲۰] 10^{-10} است و مقیاس زمانی سرعت جریان در کار حاضر حدود 10^{-3} تا 10^{-2} است. با توجه به کوچک‌تر بودن گام زمانی یونیزاسیون نسبت به مقیاس زمانی سرعت جریان، می‌توان گفت که پلاسمای اثر جریان را نمی‌بیند.

۲- عملگر دائمی و غیر دائمی

عملگر غیر دائمی زمانی مورد توجه قرار گرفت که مشاهده شد با میزان مصرف انرژی کمتر در این حالت می‌توان به کارایی بالاتری نسبت به حالت دائمی دست یافت. شکل ۲ به خوبی مفهوم حالت دائمی و غیر دائمی را نشان می‌دهد. در قسمت بالای این شکل، تحریک به طور دائم نشان داده شده

3- Poitiers Univ.

4- Nicholas

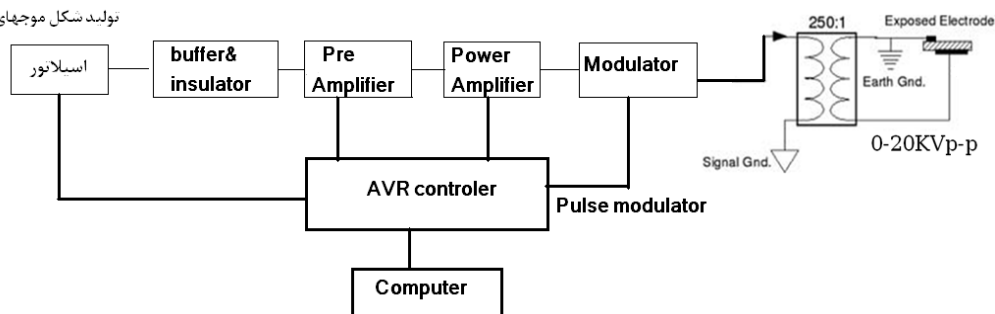
1 - Corona

2- Roth

۳- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌های حاضر در تونل باد مدار باز مدل TE54 ساخت کارخانه پلینت انجام شده است. سطح مقطع کاری این تونل $305 \times 305 \text{ mm}$ و سرعت ماکزیمم حدود ۳۶ متر بر ثانیه است. آزمایش‌ها در سرعت بیشینه انجام شده است. تونل باد حاضر از نوع مکشی و شدت آشفستگی آن توسط یک لایه توری تا حدود ۱٪ در سرعت بیشینه پایین آورده شده است. مدل مورد آزمایش یک ایرفویل مدل NACA0012 است که جنس آن از چوب کاملاً صیقلی و طول وتر و منظر آن به ترتیب 152 mm و 300 mm است. برای اندازه‌گیری توزیع فشار پیرامون این ایرفویل از ۲۳ تب فشاری استفاده شده است. برای قرائت مقادیر فشار در این تب‌ها از مبدل فشار الکترونیکی دیفرانسیلی ۲۰ کاناله مدل FCO44 به همراه آمپلی فایر استفاده شده است که توزیع فشار بالا و پایین ایرفویل در دو مرحله جداگانه انجام می‌شود. دقت این مبدل فشار الکترونیکی $\pm 0.5 \text{ mm}$ است. عدم قطعیت در اندازه‌گیری ضریب فشار $0.123 \pm$ است. برای اندازه‌گیری سرعت و فشار استاتیک جریان آزاد از یک لوله پیتوت-استاتیک استفاده شده است. کلیه داده برداری‌های متوسط فشار به منظور تکرارپذیری نتیجه‌ها حدود ۵ بار در هر مرحله تکرار شد. با این تکرار یک خطای نسبی حدود ۳٪ برای متوسط ضریب فشار در هر نقطه تخمین زده شد. برای تولید پلاسما از یک دستگاه منبع تغذیه که توسط نویسندگان مقاله طراحی و ساخته شده، استفاده شده است. این دستگاه از سه بخش اصلی: یک اسیلاتور، یک آمپلی فایر تغییر توان و یک ترانسفورماتور تنظیم ولتاژ بالا برای آماده‌سازی ولتاژ مورد نیاز پلاسما تشکیل شده است. مدار کامل مولد پلاسما در شکل ۳ نشان داده شده است.

تولید شکل موجهای مورد نظر



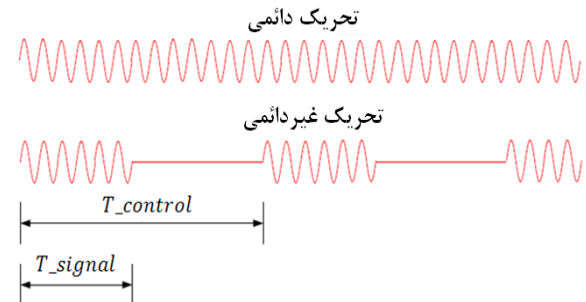
شکل (۳): شماتیک مدار الکترونیکی تولید پلاسما.

است. همان‌طور که در این شکل پیداست، یک نوع موج مشخص به طور پیوسته و با یک فرکانس خاص تا به انتها تکرار می‌شود. اما در قسمت پایین شکل که عملگر در حالت غیر دائمی در آن نشان داده شده است، در بخشی از یک زمان مشخص این موج ولتاژ اعمال می‌شود و سیستم روشن است و در بخشی دیگر که قابل کنترل است، این موج خاموش می‌شود. زمان اعمال سیگنال به عملگر پلاسمایی در این شکل با T_{signal} و زمان یک موج شامل بخش روشن و خاموش که قابلیت کنترل را دارد با T_{control} نشان داده می‌شود. پارامتری که در کیفیت پلاسمای تولیدی مؤثر نشان داده شده است، سیکل کاری است که با پارامتر β نمایش داده و از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$\beta = \frac{T_{\text{signal}}}{T_{\text{control}}} \times 100\%.$$

همچنین، فرکانس تحریک، پارامتر مؤثر کنترلی دیگری است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$f_{\text{excitation}} = \frac{1}{T_{\text{control}}}. \quad (2)$$



شکل (۲): حالت‌های دائمی و غیردائمی عملگر پلاسمایی.

برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی متوسط از مولتی متر عقربه‌ای ساخت شرکت کیوریتسو مدل ۱۱۰۹ استفاده شده است. یک مقاومت ۱,۰۰۰ اهمی در سر راه جریان قرار دارد که با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر این مقاومت، مقدار جریان قابل محاسبه است. خطای اندازه‌گیری در مقادیر جریان اندازه‌گیری شده ۳٪± است.

۴- مشخصات هندسی و الکتریکی عملگر پلاسمایی

قبل از شروع آزمایش‌ها، شناسایی هندسی و رفتار عملگر پلاسمایی ساخته شده ضروری است. عملگر پلاسمایی از دو الکتروود فلزی با ضخامت ۵۰ میکرومتر و جنس مس تشکیل شده است. پهنای الکتروود در معرض جریان ۱cm و الکتروود پوشیده شده برابر ۳cm است. طول این الکتروودها ۳۰cm است که در راستای منظر بال قرار گرفته است. برای جلوگیری از تماس الکتروودها با هم، بین آنها ۴ لایه عایق دی الکتریک کاپتون قرار داده شده است که ضخامت هر لایه ۵۰ میکرومتر است. برای اندازه‌گیری فشار در محل تب‌هایی از ایرفویل که عملگر روی آنها قرار دارد، این الکتروودها و عایق‌ها سوراخ شده است. برای اینکه تمرکز بار در این نواحی بیشتر خواهد شد و این تمرکز سبب ایجاد قوس الکتریکی و نویز در سیستم می‌شود، این سوراخ‌ها به وسیله پانچ به طور کاملاً گرد ایجاد شده است و تا حد امکان از رفتن به ناحیه قوس الکتریکی جلوگیری می‌کند. شکل ۵ نحوه قرارگیری عملگر پلاسمایی بر روی بال با تب‌های فشاری و تشکیل پلاسمای آن را نشان می‌دهد. عملگر پلاسمایی در موقعیت $\frac{x}{c} = 0/14$ قرار داده شد که بر اساس مدل‌سازی‌های عددی انجام شده قبل از آزمایش، این نقطه حوالی نقطه جدایش در زاویه حمله ۱۴ درجه انتخاب شد. با توجه به مراجع [۹] و [۲۱] ضخامت پلاسمای تشکیل شده در حدود ۱/۵mm است.

قبل از شروع آزمایش ابتدا مشخصه‌های الکتریکی این عملگر در شرایط مختلف بررسی شده است. شکل ۶ تغییرات ولتاژ بر حسب جریان متوسط زمانی را نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ مقدار جریان افزایش یافته و رفته رفته شیب افزایش جریان کاهش می‌یابد.

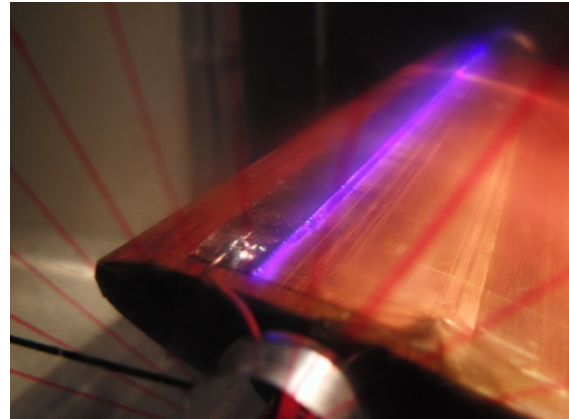
در شکل ۴ تصویری از واحد مورد اصلی که شامل اسیلاتور و مدولاتور است، نشان داده شده است. روی این دستگاه نشانگرهای پارامترهای شکل موج (چهار نوع موج مثلثی، سینوسی، مستطیلی و دندان‌اره‌ای)، فرکانس تحریک، سیکل کاری، فرکانس حامل و ولتاژ ورودی قابل نمایش و تغییر است. این تغییر به دو شکل دستی و رایانه‌ای انجام‌پذیر است. این واحد از طریق ۳ کابل اتصال به ترانسفورماتور وصل می‌شود که این ۳ کابل جهت اتصال به زمین، ولتاژ و اسیلاتور هستند. اسیلاتور از چندین بخش تشکیل شده که وظیفه آماده کردن یک فرکانس خروجی از ۱ تا ۳۰KHz را به عهده دارد. منبع تغذیه ورودی همان شرایط برق شهر، ولتاژ ۲۲۰V و فرکانس ۵۰Hz است. بخش اسیلاتور حامل، جهت تولید اشکال موج سینوسی، مثلثی، مربعی و دندان‌اره‌ای به کار گرفته می‌شود. خروجی اسیلاتور حامل به گونه‌ای طراحی شده است تا امکان ایجاد پالس از فرکانس ۱۰ تا ۲۰۰۰Hz فراهم باشد. این بخش از اسیلاتور با نام اسیلاتور مدولاسیون که وظیفه روشن و خاموش کردن را به طور پالسی به عهده دارد، شناخته می‌شود. نسبت زمان روشن بودن به زمان خاموش بودن (سیکل کاری) روی اسیلاتور مدولاسیون بین ۲٪ تا ۹۸٪ قابل تغییر است. این دستگاه به گونه‌ای است که همه تنظیمات روی اسیلاتور شامل فرکانس تحریک، فرکانس حامل، بزرگی ولتاژ و سیکل کاری به طور مستقل و بدون هیچ اثری روی یکدیگر قابل تغییر هستند. در انتهای مدار یک ترانسفورماتور قرار دارد که وظیفه بالا بردن ولتاژ ورودی تا خروجی حدود ۲۰KV_{p-p} را دارد.



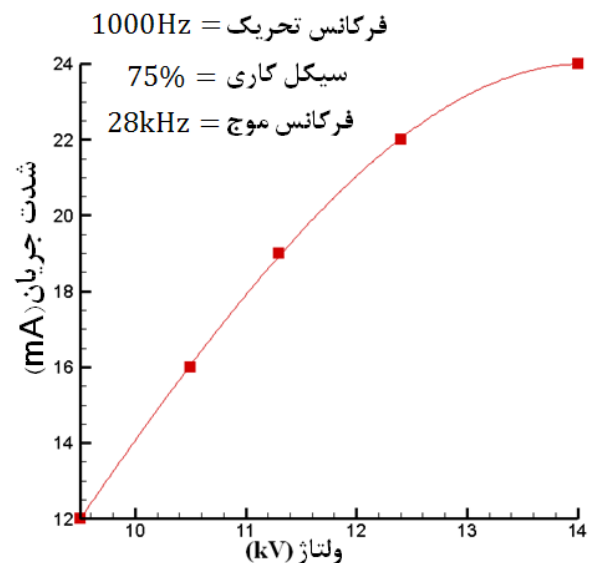
شکل (۴): تصویر واحد اصلی دستگاه تولید پلاسمای با قابلیت نمایش متغیرهای قابل تنظیم.

گفت که افزایش فرکانس تحریک سبب برخورد بیشتر در الکترون‌ها و یون‌ها می‌شود که این افزایش بیشتر برخورد سبب کاهش مقاومت الکتریکی محیط پلاسما و در نتیجه افزایش آمپر می‌شود. در فرکانس‌های بالاتر از یک حد آستانه، فرکانس برخوردها تا حدی بالا می‌رود که دیگر تأثیری بر مقاومت الکتریکی محیط پلاسما ندارد و جریان متوسط ثابت خواهد ماند. با افزایش فرکانس موج، میزان شدت جریان افزایش می‌یابد که این افزایش شدت جریان نیز به صورت افزایش شدت نور ساطع شده قابل مشاهده است. اما این افزایش جریان تا حوالی فرکانس ۲۴kHz ادامه می‌یابد و بعد از آن شاهد کاهش هستیم. این نقطه که بیشینه جریان را نیز در آن شاهد هستیم، به نوعی توسط مطالعه کانهارت [۲۲] قابل توجیه است. نتیجه‌های کانهارت نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس موج، مقدار ولتاژ نسبی آغاز تشکیل پلاسما کمتر می‌شود و بعد افزایش می‌یابد و در یک فرکانس موج خاص نیاز به کمترین مقدار ولتاژ برای تشکیل پلاسما است. هر چه ولتاژ نسبی کمتر باشد، یونیزاسیون بهتری در یک ولتاژ ورودی ثابت اتفاق می‌افتد و یونیزاسیون بیشتر باعث افزایش شدت جریان می‌شود. به عبارتی می‌توان روند تغییر شدت جریان بر حسب فرکانس موج را عکس روند تغییراتی ولتاژ نسبی تشکیل پلاسما بر حسب فرکانس موج دانست. همچنین نتیجه‌های پورتر و همکارانش [۵] نشان می‌دهد که برای یک ولتاژ ثابت و در فرکانس‌های ۵ تا ۲۰ KHz توان مصرفی رابطه‌ای تقریباً خطی با فرکانس موج دارد و در این محدوده راندمان انتقال مومنوم به هوا ثابت است. از آنجا که در ولتاژ ثابت میزان مصرف انرژی رابطه‌ای خطی با جریان دارد، رفتار تقریباً خطی فرکانس موج با مقدار شدت جریان در محدوده فرکانس‌های ۵ تا ۲۰ KHz به خوبی در این نمودار تأیید می‌شود.

در شکل ۹ در دو ولتاژ مختلف با فرکانس تحریک و فرکانس موج ثابت، تأثیر میزان سیکل کاری بر شدت جریان متوسط نشان داده شده است. با افزایش مقدار سیکل کاری، تا حوالی ۹۰٪، افزایش در میزان شدت جریان را شاهد هستیم و بعد از آن مقدار شدت جریان در سیکل‌های کاری بالاتر کمی کاهش می‌یابد. این افزایش در سیکل کاری به

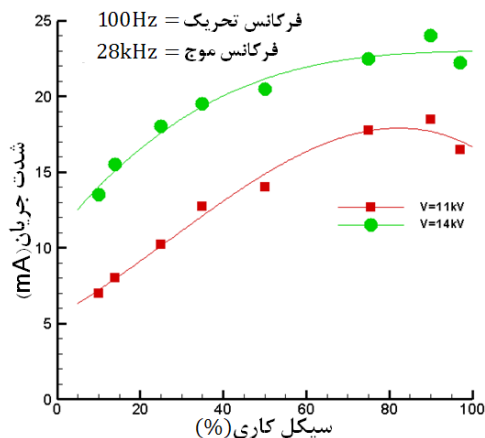


شکل (۵): نحوه قرارگیری عملگر پلاسمایی روی ایرفویل و تشکیل پلاسما روی آن.



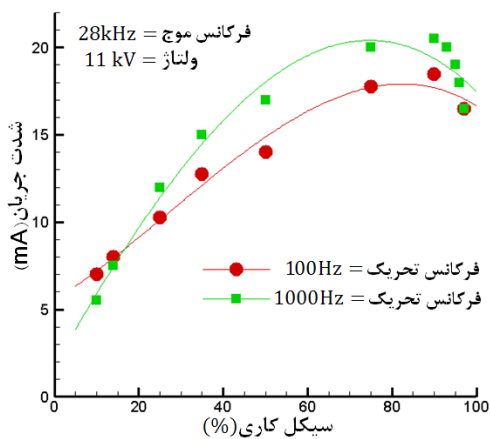
شکل (۶): تغییرات ولتاژ بر حسب جریان در عملگر پلاسمایی.

در شکل‌های ۸-۷ اثر فرکانس‌های موج و تحریک بر شدت جریان در ولتاژ ۱۴ کیلوولت و سیکل کاری ۷۵٪ نشان داده شده است. از این دو نمودار می‌توان به این نتیجه رسید که فرکانس موج در مقایسه با فرکانس تحریک، تأثیر بیشتری بر شدت جریان دارد. در فرکانس‌های تحریک بالاتر از ۳۰۰ Hz جریان به مقدار ثابتی می‌رسد و در فرکانس‌های پایین‌تر این مقدار کمتر می‌شود. با افزایش فرکانس تحریک، مقاومت الکتریکی محیط پلاسما به یک مقدار ثابتی می‌رسد که پس از یک آستانه فرکانسی است. به عبارتی می‌توان



شکل (۹): تأثیر سیکل کاری بر شدت جریان در ولتاژهای متفاوت.

رفتاری که عملگر پلاسمایی از خود نشان می‌دهد، برآیند برخورد میلیون‌ها الکترون و یون با یکدیگر است که حرکتی کاملاً تصادفی دارند. بنابراین پیش‌بینی دقیق این رفتار کاری مشکل است.



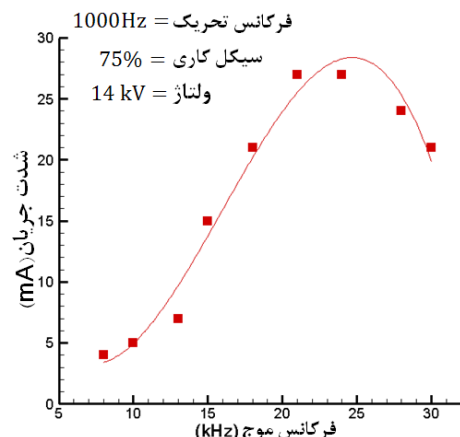
شکل (۱۰): تأثیر سیکل کاری بر شدت جریان در فرکانس‌های تحریک مختلف.

۵- نتایج و بحث

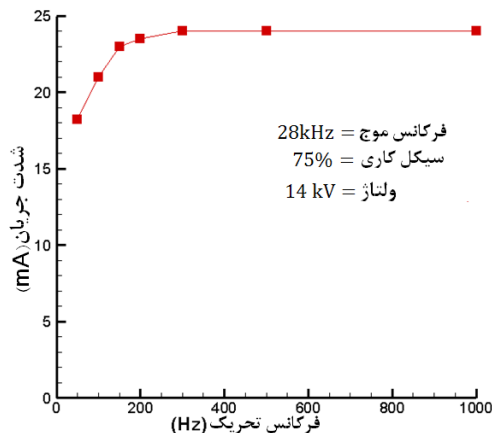
به منظور بررسی تأثیر عملگر بر روی توزیع فشار حول ایرفویل آزمایش‌ها در شرایط مذکور انجام شد. در شکل ۱۱ نمودار توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۲ درجه برای عملگر در دو حالت خاموش و روشن تحت شرایط ولتاژ ۱۴ کیلو ولت، فرکانس موج ۲۸kHz، سیکل کاری ۱۴٪، فرکانس تحریک ۱۰۰Hz و موج سینوسی مقایسه شده

مفهوم زمان دادن بیشتر برای عبور جریان از عملگر پلاسمایی است که این افزایش زمان سبب بالا رفتن متوسط جریان است. با مقایسه دو ولتاژ ۱۱ و ۱۴ کیلو ولت در این شکل، اختلاف جریان تقریباً ثابتی را در سیکل‌های کاری مختلف شاهد هستیم. به بیان ریاضی می‌توان گفت که $\frac{dI}{dV}$ مستقل از مقدار سیکل کاری است.

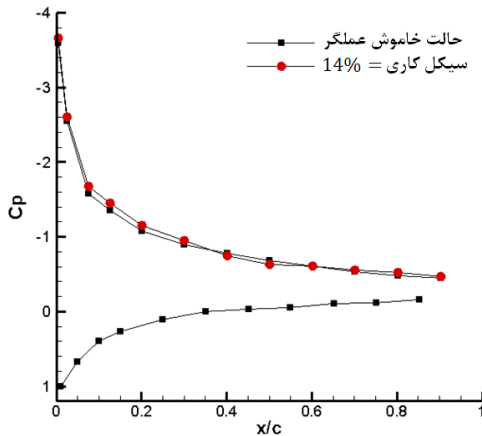
در شکل ۱۰ تأثیر میزان تغییرات سیکل کاری بر شدت جریان در دو فرکانس تحریک ۱۰۰Hz و ۱,۰۰۰Hz با شرایط ولتاژ و فرکانس موج ثابت با هم مقایسه شده است. با توجه به این دو نمودار می‌توان دریافت که در سیکل‌های کاری کمتر از ۱۶٪ با فرکانس تحریک کمتر، جریان بیشتری نسبت به حالت فرکانس تحریک بیشتر در عملگر برقرار می‌شود. اما در سیکل‌های کاری بالاتر رفتاری عکس را نشان می‌دهد و در فرکانس تحریک پایین‌تر، جریان کمتری را نسبت به فرکانس تحریک بالاتر شاهد هستیم.



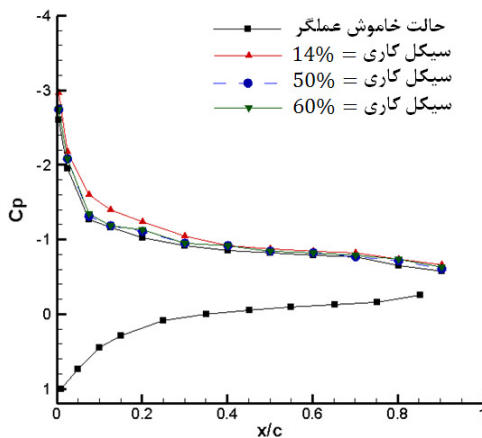
شکل (۷): اثر فرکانس موج بر شدت جریان متوسط.



شکل (۸): اثر فرکانس تحریک بر شدت جریان متوسط.



شکل (۱۱): توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۲ درجه در حالت‌های عملگر روشن و خاموش.



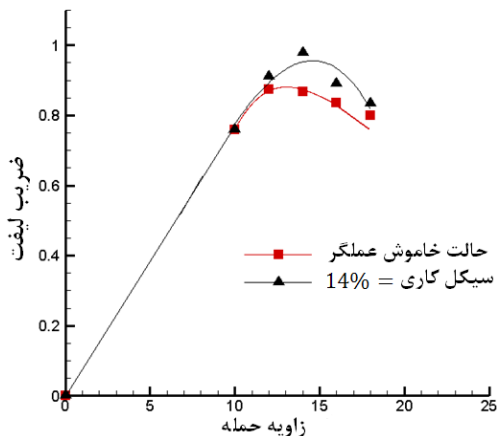
شکل (۱۲): توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۴ درجه در حالت‌های عملگر خاموش و مدهای مختلف عملگر روشن.

در زاویه حمله ۱۶ درجه تأثیر پلاسما بر بهبود توزیع فشار کمتر شده و با توجه به شکل ۱۳ تنها تا ناحیه $x/c < 0.3$ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ضمن اینکه میزان این تأثیر نسبت به زاویه حمله ۱۴ درجه کمتر می‌شود. با توجه به شکل ۱۴ این میزان تأثیر پلاسما در زاویه حمله ۱۸ بسیار ناچیز خواهد بود. با توجه به افزایش زاویه حمله بعد از زاویه واماندگی ناحیه حباب تشکیل شده در بالای ایرفویل افزایش می‌یابد. در زوایای نزدیک به زاویه واماندگی تا حدود ۱۶ درجه که مقدار این حباب خیلی بزرگ نیست، جریان القا شده توسط پلاسما توان مقابله و حذف ناحیه حباب را دارد؛

است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در این زاویه حضور عملگر در حالت روشن تأثیر چندانی بر روی توزیع فشار ندارد. با توجه به اینکه در این زاویه حمله ناحیه حباب در حوالی لبه حمله وجود ندارد، تشکیل پلاسما فقط کمی سرعت‌های نزدیک سطح را تغییر می‌دهد که این افزایش سرعت باعث اندکی بهبود در ضریب فشار و کمی تغییر در ضریب اصطکاک می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات ضریب اصطکاک در لایه مرزی به مطالعه انجام شده توسط گراندمن و همکارانش [۲۳] مراجعه شود.

در شکل‌های ۱۴-۱۲ نمودار توزیع فشار در زوایای حمله ۱۴ تا ۱۸ درجه برای حالت‌های عملگر خاموش و روشن (ولتاژ ۱۴ کیلوولت، فرکانس موج ۲۸kHz، فرکانس تحریک ۱۰۰Hz و موج سینوسی) در سیکل‌های کاری مختلف با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۲ برای ایرفویل با زاویه حمله ۱۴ درجه، تأثیر عملگر پلاسمایی در سیکل کاری ۱۴٪ با افزایش ضریب فشار تا نواحی $x/c = 0.4$ به خوبی مشهود است. این تأثیر افزایش فشار با سیکل‌های کاری ۵۰٪ و ۶۰٪ نیز در این زاویه حمله بررسی شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، سیکل‌های کاری بالاتر تأثیر چندانی در بهبود فشار ندارد. سیکل کاری پایین‌تر احتمالاً سبب ایجاد عدم توازن بیشتری در چگالی یون‌ها و الکترون‌ها شده که در نهایت سبب بالا رفتن دانسیته بار خالص و افزایش نیروی حجمی تولید شده می‌شود. در سیکل‌های کاری پایین‌تر، عملگر مصرف انرژی کمتری دارد، به همین دلیل می‌توان گفت که کارایی آن در تبدیل انرژی الکتریکی به جنبشی بالاتر از سیکل‌های کاری بیشتر است. به طور مثال در این شرایط عملگر و با سیکل کاری ۱۴٪ مصرف انرژی حدود ۹/۶W بوده و در سیکل کاری ۵۰٪ این مقدار به حدود ۴۶W می‌رسد. با توجه به نتایج ارائه شده توسط پورتر و همکارانش [۵] می‌توان گفت که در سیکل کاری کمتر اگر چه مقدار روشن بودن پلاسما کمتر است، ولی مقدار بیشینه نیروی تولیدی آن بیشتر است و این مسئله باعث افزایش کارایی در سیکل کاری ۱۴٪ نسبت به مقادیر بیشتر علی‌رغم برقراری جریان الکتریکی کمتر با توجه به شکل‌های ۱۰-۹ است.

شرایط پلاسمای اشاره شده، در شکل ۱۱ با هم مقایسه شده است. با توجه به این نمودار می‌توان تأثیر افزایش بر ضریب لیفت را در زوایای حمله تا ۶ درجه بعد از واماندگی مشاهده کرد. تشکیل پلاسمای در زاویه حمله ۲ درجه بعد از زاویه واماندگی (۱۴ درجه) که ناحیه حباب کوچک است و جدایش جریان به طور ضعیف‌تری تشکیل می‌شود، بیشترین تأثیر را در افزایش ضریب لیفت دارد.

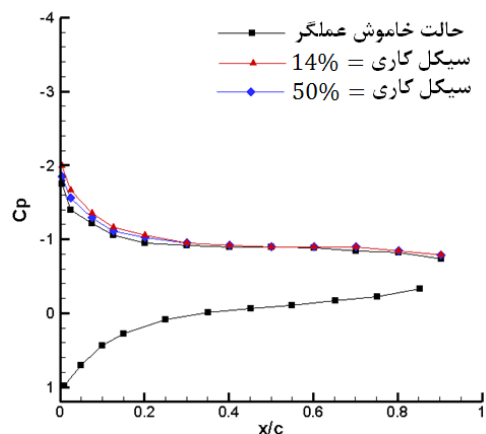


شکل (۱۵): تأثیر عملگر پلاسمایی بر روی ضریب لیفت در زوایای حمله مختلف.

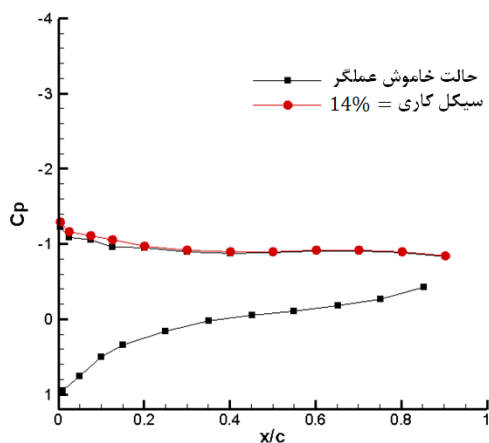
۶- نتیجه‌گیری

عملکرد الکتریکی عملگر پلاسمایی و اثرات آن در حالت غیر دائمی روی توزیع فشار اطراف ایرفویل در زوایای حمله مختلف بررسی شد. با توجه به افت کارایی بال در زوایای حمله بالا، بررسی‌ها در زوایای حمله بعد از زاویه واماندگی انجام شده است. نتیجه‌ها در بهترین حالت که در ۲ درجه بعد از زاویه واماندگی اتفاق می‌افتد ۱۳٪ افزایش لیفت را نشان می‌دهد. این افزایش با توان مصرفی حدود ۹/۶W برای طول الکتروود ۳۰cm به دست آمد. روند بهبود ضریب لیفت به وسیله پلاسمای تا حوالی ۶ درجه بعد از زاویه واماندگی اتفاق می‌افتد و این تأثیرپذیری تا جایی امکان می‌یابد که سرعت القایی توسط پلاسمای لازم برای تغییر در اندازه ناحیه حباب را داشته باشد. با توجه به نتیجه‌های ارائه شده برای عملگر حاضر، می‌توان گفت که بهبود در ضریب لیفت و توزیع فشار در سیکل‌های کاری پایین (در حدود ۱۴٪) بهتر از سیکل‌های کاری بالاتر است.

ولی با افزایش زاویه حمله این ناحیه بزرگ شده و عملگر پلاسمایی توان حذف یا کاهش این ناحیه را ندارد. به طوری که در زاویه حمله ۱۶ درجه این ناحیه به وسیله پلاسمای کاهش داده شده است؛ ولی تأثیر آن به طور کلی حذف نمی‌شود. در زاویه حمله ۱۸ درجه دیگر جریان القایی به علت توان محدود خود نمی‌تواند این ناحیه بزرگ را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل (۱۳): توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۶ درجه در حالت‌های عملگر خاموش و مدهای مختلف عملگر روشن.



شکل (۱۴): توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه در حالت‌های عملگر روشن و خاموش.

در شکل ۱۵ نمودار ضریب لیفت بر حسب زاویه حمله برای دو حالت خاموش و روشن عملگر با سیکل کاری ۱۴٪ و

مراجع

14. Jolibois, J., Forte, M., and Moreau, E. "Application of an AC Barrier Discharge Actuator to Control Airflow Separation above a NACA0015 Airfoil: Optimization of the Actuation Location along the Chord", *J. Electrostatics*, Vol. 66, No's. 9-10, pp. 496-503, 2008.
15. Sosa, R. and Artana, G. "Steady Control of Laminar Separation over Airfoils with Plasma Sheet Actuators", *J. Electrostatics*, Vol. 64, No's. 7-9, pp. 604-610, 2006.
16. Enloe, C.L., McLaughlin, T.E., VanDyken, R.D., Kachner, K.D., Jumper, E.J., Corke, T.C., Post, M., and Haddad, O. "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects", *AIAA J.*, Vol. 42, No. 3, pp. 595-604, 2004.
17. Corke, T.C., Post, M.L., and Orlov, D.M. "SDBD Plasma Enhanced Aerodynamics: Concepts, Optimization and Applications", *J. Progress in Aerospace Sci.*, Vol. 43, No's. 7-8, pp.193-217, 2007.
18. Huang, J., Corke, T.C., and Thomas, F.O. "Unsteady Plasma Actuators for Separation Control of Low Pressure Turbine Blades", *AIAA J.*, Vol. 44, No. 7, pp. 1477-1487, 2006.
19. Corke, T.C., Post, M.L., and Orlov, D.M. "Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications", *J. Exp. Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp.1-26, 2009.
20. Nicholas, W., Hitchon, G., Sommerer, T.J., and Lawler, J.E. "A Self-Consistent Kinetic Plasma Model with Rapid Convergence", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 19, No. 2, pp. 113-121, 1991.
21. Jayaraman, B. and Shyy, W. "Modeling of Dielectric Barrier Discharge-Induced Fluid Dynamics and Heat Transfer," *J. Progress in Aerospace Sci.*, Vol. 44, No. 3, pp. 139-191, 2008.
22. Kunhardt, E.E., "Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 28, No. 1, pp. 189-200, 2000.
23. Grundmann, S., Klumpp, S., and Tropea, C. "Experimental and Numerical Investigations of Boundary Layer Influence, Using Plasma-Actuators", *Notes on Num. Fluid Mech. and Multi-disciplinary Design*, Vol. 95, pp. 56-68, 2007.
1. Font, G.I. "Boundary Layer Control with Atmospheric Plasma Discharges", *AIAA J.*, Vol. 44, No. 7, pp. 1572-1578, 2006.
2. Post, M.L. and Corke, T.C. "Separation Control, Using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil", *AIAA J.*, Vol. 44, No. 12, pp. 3125-3135, 2006.
3. Juckes, T.N. and Choi, K.S. "Flow Control around a Circular Cylinder, Using Pulsed Dielectric Barrier Discharge Surface Plasma", *Phys. of Fluids*, Vol. 21, No. 8, pp. 1-12, 2009.
4. Benard, N., Jolibois, J., and Moreau, E. "Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator", *J. Electrostatics*, Vol. 67, No's. 2-3, pp. 133-139, 2009.
5. Porter, C.O., Baughn, J.W., McLaughlin, T.E., Enloe, C.L., and Font, G.I. "Plasma Actuator Force Measurements", *AIAA J.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1562-1570, 2007.
6. Matlis, E.H. "Controlled Experiments on Instabilities and Transition to Turbulence on a Sharp Cone at Mach 3.5", PhD Dissertation, Univ. of Notre Dame, 2004.
7. Ketchman, J. and Velkoff, H. "Effect of an Electrostatic Field on Boundary Layer Transition", *AIAA J.*, Vol. 6, No. 7, pp. 1381-1383, 1968.
8. Moreau, E. "Airflow Control by Non-thermal Plasma Actuators", *J. Phys. D. Appl.*, Vol. 40, No. 3, pp. 605-636, 2007.
9. Roth, J.R., Sherman, D.M., and Wilkinson, S.P. "Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma", *AIAA Meeting Paper 98-0328*, p. 29, 1998.
10. Roth, J.R., Tsai, P.P., and Liu, C. "US Patent #5387842", 1995.
11. Artana, G., D'Adamo, J., Leger, L., Moreau, E., and Touchard, G. "Flow Control with Electrohydrodynamic Actuators", *AIAA J.*, Vol. 40, No. 9, pp. 1773-1779, 2002.
12. Artana, G., Sosa, R., Moreau, E., and Touchard, G. "Control of the Near-Wake Flow around a Circular Cylinder with Electrohydrodynamic Actuators", *Exp. Fluids*, Vol. 35, No. 6, pp. 580-588, 2003.
13. Moreau, E., Louste, C., and Touchard, G. "Electric Wind Induced by Sliding Discharge in Air at Atmospheric Pressure", *J. Electrostatics*, Vol. 66, No's. 1-2, pp. 107-114, 2008.

