



اثرات سیکل کاری عملگرهای پلاسمایی بر روی بهبود توزیع فشار حول ایرفویل NLF0414

سید آرش سید شمس طالقانی^۱، عبدالله شادآرام^{۲*}، مسعود میرزایی^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، Shadaram@kntu.ac.ir

چکیده- این مقاله به مطالعه اثرات سیکل کاری عملگرهای پلاسمایی بر بهبود توزیع فشار در سطح بالایی یک ایرفویل NLF0414 می‌پردازد. سه عملگر پلاسمایی از نوع تخلیه سد دی‌الکتریکی در سمت مکش ایرفویل و در موقعیت‌های مختلف نصب شده‌اند تا در زوایای حمله بعد از واماندگی سبب بهبود فشار حول ایرفویل شوند. داده‌برداری تجربی توسط تونل باد و حفره‌های فشار در $Re_c = 7.5 \times 10^5$ انجام شده است. هدف اصلی این آزمایش‌ها این است که بتوانیم سیکل‌های کاری موثرتر در فرکانس‌های تحریک مختلف را برای زوایای حمله مختلف شناسایی کنیم. نتایج نشان می‌دهد که عملگرهای پلاسمایی در تحریک‌های غیردائمی با فرکانس تحریک کم روی سیکل‌های کاری پایین کارایی بهتری دارند. در حالی که در فرکانس‌های تحریک بالاتر، سیکل‌های کاری پایین کارایی خود را از دست می‌دهند.
کلیدواژگان: عملگر پلاسمایی، فرکانس تحریک، سیکل کاری، کنترل فعال جریان، ایرفویل

Effects of duty cycles of the plasma actuators on improvement of the pressure distribution over NLF0414 airfoil

A. Shams Taleghani¹, A. Shadaram^{2*}, M. Mirzaei³

1- PhD Student of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Technology, Tehran, Iran

2- Assoc. Prof. of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Technology, Tehran, Iran

3- Assoc. Prof. of Mech. Eng., K. N. Toosi Univ. of Technology, Tehran, Iran

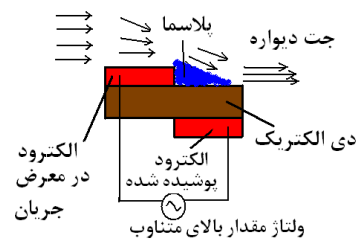
* P.O. B. 19395-1999 Tehra, Shadaram@kntu.ac.ir

Abstract- This paper deals with the effects of duty cycle on improvement of pressure distribution over a NLF0414 airfoil using the plasma actuators. Three Dielectric barrier discharges as the plasma actuators are flush mounted on the airfoil surface in different positions to improve pressure distribution at post-stall angles of attack. The experiments were performed in wind tunnel with pressure tabs measurements at $Re_c = 7.5 \times 10^5$. The main objective of these experiments is to find the most effective duty cycles for different excitation frequencies and different angles of attack. Results show that the plasma actuators in unsteady excitations are more effective in lower duty cycles on low excitation frequencies but the lower duty cycles lose their effectiveness on higher excitation frequencies.

Keywords: Plasma Actuator, Excitation Frequency, Duty Cycle, Active Flow control, Airfoil

۱- مقدمه

عملگر پلاسمایی به‌عنوان یک ابزار کنترل فعال جریان به سبب سادگی ساختاری، سبکی، مصرف کم انرژی و پاسخ زمانی بالا در یک دهه اخیر مورد بررسی محققان آیرودینامیک قرار گرفته است. این وسیله از دو الکتروود با ورق‌های نازک (معمولاً از جنس مس یا آلومینیوم) تشکیل شده که به صورت غیرممتقارن در مقابل هم قرار دارند. بین این دو الکتروود یک ماده عایق دی‌الکتریک (از جنس کاپتون، تفلون، شیشه و ...) قرار دارد تا مانع از برخورد دو الکتروود به هم شود. الکتروود بالایی که معمولاً در معرض جریان قرار دارد به منبع تغذیه ولتاژ بالا وصل شده و الکتروود پایینی که با دی‌الکتریک پوشانده شده است به زمین وصل است. شکل ۱ شماتیک این عملگر را نشان می‌دهد. وقتی یک ولتاژ بالا در حد چند کیلوولت به دو سر این الکتروودها اعمال شود، در اثر یونیزه‌شدن هوا روی سطح عایق در بالای الکتروود پوشیده شده یک تخلیه پلازما اتفاق افتاده و باعث افزایش مومنتوم ذرات هوا می‌شود. مقدار مومنتوم اضافه شده در تغییر وضعیت جریان هوا روی سطح عملگر موثر است.



شکل ۱ شماتیک عملگر پلاسمایی به همراه تاثیر جریان روی آن

یکی از کاربردهای این وسیله که توسط محققان دنبال می‌شود استفاده از آن در کنترل نقطه جدایش جریان روی ایرفویل است [۱-۴]. با به‌تعویق انداختن نقطه جدایش جریان روی ایرفویل توسط عملگر پلاسمایی می‌توان جریان برگشتی را به تعویق انداخت و بدین ترتیب حباب تشکیل‌شده در سمت مکش ایرفویل را کاهش داد. در نتیجه کاهش حباب جریان جدا شده سبب کاهش نیروی درگ و افزایش لیفت خواهد شد [۵-۷]. تاکنون کارهای متفاوتی جهت افزایش کارایی عملگر پلاسمایی انجام شده است که می‌توان به تحقیقات انجام‌شده در زمینه موقعیت قرارگیری عملگرها [۱، ۵، ۳، ۱]، تاثیر هندسه الکتروودها [۸-۹] و مشخصات الکتريکی عملگر پلاسمایی [۹-۱۰] اشاره کرد. کورک و همکارانش [۱۱] نشان دادند که عملگر

پلاسمایی در حالت غیردائمی و با فرکانس تحریکی برابر با عدد اشتروهل واحد ($St = f_e c / U_\infty = 1$) بهترین تاثیر را در اتصال مجدد جریان روی یک ایرفویل NACA0015 دارد. همچنین محققان دیگری چون گوکسل و همکارانش [۱۲] و هوآنگ و همکارانش [۲] عدد اشتروهل ۱ را به ترتیب برای افزایش لیفت روی ایرفویل و کاهش افت فشار در پره‌های توربین به‌عنوان حالت بهینه معرفی کرده‌اند. اما این نتیجه توسط محققانی مانند جولیبویس و همکارانش [۳] مشاهده نشده و به نظر می‌رسد که دو نظریه متفاوت در این مورد مطرح است. از طرفی نتایجی که نشان‌دهنده اشتروهل بهینه برابر ۱ است در یک مقدار سیکل کاری پایین ارائه شده است و در سیکل‌های کاری دیگر این مسئله تحقیق نشده است.

لذا تحقیق حاضر به بررسی تاثیر میزان سیکل کاری بر بهبود فشار روی یک ایرفویل می‌پردازد. این کار در مقایسه با کارهای انجام‌شده دیگر در رینولدز بالاتر انجام شده و همچنین تاثیر سیکل کاری را در فرکانس‌های تحریک متفاوت دنبال می‌کند. هدف از کار حاضر بررسی سیکل‌های کاری مختلف در زوایای حمله و فرکانس‌های تحریک متفاوت به منظور بهبود فشار حول ایرفویل، افزایش لیفت و کاهش درگ است. از طرف دیگر در این کار از عملگرهای پلاسمایی بهینه‌شده توسط فورت و همکارانش [۹] که دارای پهنای الکتروود پایینی بیشتر به منظور افزایش کارایی آن می‌باشد، استفاده شده است.

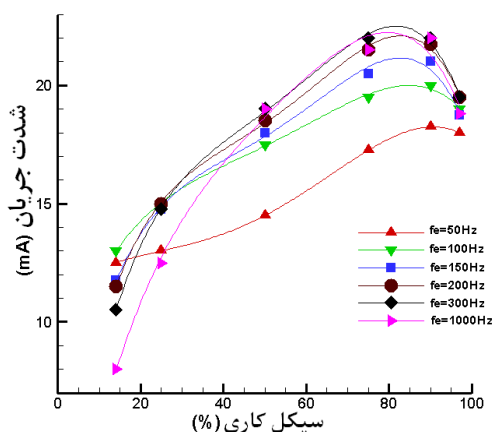
۲- تجهیزات آزمایشگاهی

این مطالعه تجربی در یک تونل باد مدار باز به ابعاد سطح مقطع کاری $1\text{ m} \times 1/2\text{ m}$ در طول $2/5\text{ m}$ انجام شده است. سرعت قابل کنترل جریان آزاد در تونل باد بین ۳ تا 60 m/s و شدت آشفتنگی آن حدود ۰/۱۵ درصد است. کلیه آزمایش‌ها در سرعت 25 m/s انجام شده است. مدل مورد آزمایش یک ایرفویل NLF0414 با طول وتر $0/45\text{ m}$ و طول منظر 1 m بوده که یک طرف آن با دیواره اتاق آزمایش و طرف دیگر آن با یک صفحه فلزی مقید شده است تا جریان دوبعدی باشد. برای اندازه‌گیری فشار حول ایرفویل از ۲۸ حفره فشاری روی سطح مکش ایرفویل و ۲۸ حفره در سطح فشار آن با قطرهای $0/8\text{ mm}$ استفاده شده است. در شکل ۲ موقعیت حفره‌های فشاری و همچنین موقعیت قرارگیری عملگرهای پلاسمایی بر روی این ایرفویل دیده می‌شود.

۳- نتایج و بحث

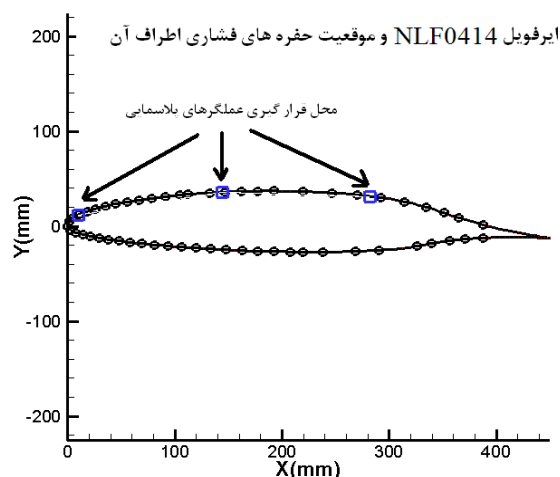
با توجه به مطالعات اولیه انجام شده [۱۳] روی توزیع فشار حول ایرفویل در زوایای حمله متفاوت، می‌توان بیان داشت که زاویه واماندگی این ایرفویل در حالت بدون نصب عملگر پلاسمایی برای شرایط مذکور در ۱۴ درجه اتفاق می‌افتد. در زوایای بیشتر از زاویه واماندگی، در سطح بالای ایرفویل یک ناحیه حباب همراه با جریان برگشتی تشکیل می‌شود که سبب افزایش فشار در بالای ایرفویل می‌شود. با بیشتر شدن زاویه حمله، این ناحیه حباب جدایش بزرگ‌تر شده و در یک زاویه خاص به دنباله تبدیل می‌شود. کنترل جریان برای بهبود ضرایب آیرودینامیکی در زوایای بعد از این زاویه که کارایی بالافت پیدا می‌کند دارای اهمیت بیشتری است. با توجه به این موضوع، در مقاله حاضر کارایی این عملگرها در زوایای حمله ۱۶ تا ۲۰ درجه مورد تحقیق قرار گرفته است.

در ابتدا برای شناخت رفتار الکتریکی عملگرهای پلاسمایی، منحنی میزان مجذور متوسط شدت جریان الکتریکی بر حسب تغییرات سیکل کاری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل ۳ رسم شده است. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار سیکل کاری تا حوالی ۹۰ درصد، شدت جریان الکتریکی افزایش یافته و بعد از آن به میزان کمی کاهش می‌یابد. روند تغییراتی مقدار شدت جریان بر حسب سیکل کاری در فرکانس‌های تحریک مختلف به غیر از اختلاف در شیب منحنی روند مشابهی دارند.



شکل ۳ تاثیر میزان سیکل کاری بر شدت جریان الکتریکی در فرکانس‌های تحریک مختلف

در بین مقادیر کمترین و بیشترین فرکانس تحریک ($f_e = 1000 \text{ Hz}$ و $f_e = 50 \text{ Hz}$) تفاوت‌هایی در رفتار نمودارها



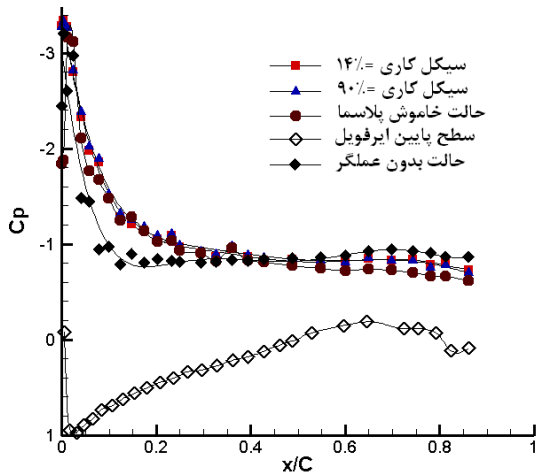
شکل ۴ شماتیک ایرفویل NLF0414 همراه با موقعیت تب‌های فشاری و عملگر پلاسمایی

قرائت همزمان فشارها توسط یک مبدل فشار الکترونیکی هانی‌ول مدل DC005NDC4 و یک کارت A/D ساخت نشنال اینسترومنت مدل PCI-6224 با یک مدول ۳۲ کاناله انجام می‌شود. داده‌ها در فرکانس ۱ kHz برای هر حفره فشار و در طول بازه زمانی ۲۰ ثانیه جمع‌آوری و متوسط‌گیری شده است. خطای اندازه‌گیری فشار حدود ۱ درصد است. کالیبراسیون تونل باد یک‌بار توسط لوله پیتوت و یک‌بار توسط پراب سیم داغ یک‌بعدی 55P11 شرکت دانتک در سرعت ۲۵ m/s انجام گرفت. غیریکنواختی سرعت در محفظه آزمایش در هر دو حالت $\pm 0.5\%$ درصد بود.

منبع تغذیه تولید پلازما از نوع AC با توان ۲۵۰ W و ولتاژ ماکزیمم ۲۰ kV_{p-p} است. فرکانس موج دارای قابلیت تغییر تا ۳۰ kHz و سیکل کاری دارای قابلیت تنظیم از ۲ درصد تا ۹۷ درصد است. فرکانس تحریک نیز از ۱۰ Hz تا ۲۰۰۰ Hz قابل تغییر است. مقادیر ولتاژ و پارامترهای دیگر ذکر شده به طور مستقل از هم قابل تنظیم‌اند.

عملگرهای پلاسمایی استفاده شده در این تحقیق ۳ عملگر یکسان است که الکترودهای آن از جنس مس به ضخامت ۵۰ μm می‌باشد. پهنای الکترودهای در معرض جریان و الکتروده پوشیده شده با عایق به ترتیب ۱ cm و ۳ cm است که در وسط بال و در راستای منظر آن قرار دارند. موقعیت این عملگرها به ترتیب در فاصله ۹/۶ mm، ۱۴۴/۶ mm و ۲۸۲/۳ mm از لبه حمله است. آزمایش‌ها در ولتاژ ۱۴ kV_{p-p} و فرکانس موج ۲۸ kHz و با شکل موج سینوسی انجام شده است.

بهبود در ضریب لیفت و ۱/۵ درصد بهبود در ضریب درگ را در مقایسه بین دو حالت روشن پلازما و خاموش آن نشان می‌دهد. اما حضور پلازما در مقایسه با حالت بدون حضور عملگر درصد بهبود در ضرایب لیفت و درگ را به همراه دارد.



شکل ۴ توزیع فشار در سطح بالای ایرفویل در زاویه حمله ۱۶ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۵۰ Hz، عملگر خاموش و بدون حضور عملگر

در شکل ۵ تاثیر پلازما با سیکل‌های کاری ۱۴ درصد، ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و ۹۰ درصد در فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz بر روی توزیع فشار در زاویه حمله ۱۶ درجه آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان پنداشت که در این زاویه حمله تغییر سیکل کاری بر میزان بهبود فشار حول این ایرفویل تاثیر چندانی ندارد. اما حضور پلازما مستقل از میزان سیکل کاری باعث بهبود توزیع فشار می‌شود. این بهبود توزیع فشار با کاهش شیب افزایش فشار همراه است که این خود یکی از نشانه‌های خط جریانی شدن و در نتیجه جلوگیری یا تاخیر جدایش است. با توجه به نتایج توزیع فشار در این زاویه حمله، ضریب لیفت با حضور عملگر پلاسمایی ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه برای حالت‌های خاموش عملگر و روشن با سیکل‌های کاری متفاوت در شکل ۶ آورده شده است. این نتایج برای فرکانس تحریک ۵۰ Hz ارائه شده است. با توجه به این نمودار، تغییر سیکل کاری بر توزیع فشار در حالت‌های روشن بودن پلازما تاثیری ندارد. اما روشن بودن پلازما در این فرکانس تحریک، مستقل از مقدار سیکل کاری باعث جابه‌جایی نقطه جدایش از

مشاهده می‌شود. در کمترین مقدار سیکل کاری (۱۴ درصد) مقدار شدت جریان برای فرکانس ۱۰۰۰ Hz کمترین مقدار را نسبت به فرکانس‌های تحریک دیگر دارد. در این سیکل کاری با کاهش فرکانس تحریک مقدار شدت جریان افزایش می‌یابد تا اینکه در فرکانس ۵۰ Hz این مقدار کاهش کمی پیدا می‌کند. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در یک مقدار سیکل کاری مشخص بالاترین مقدار جریان در یک فرکانس تحریک خاص اتفاق می‌افتد که با افزایش سیکل کاری این فرکانس افزایش می‌یابد تا جایی که مجدداً در سیکل‌های کاری بالاتر از ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. علت این کاهش مقدار شدت جریان در سیکل‌های کاری بالا با توجه به کافی بودن توان منبع تغذیه بر اساس مقالات منتشرشده [۱] می‌تواند تغییر در مدهای پلاسمایی و تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی باشد. اگر توان منبع تغذیه ناکافی بود، حداقل در فرکانس‌های تحریک ۵۰ Hz و ۱۰۰ Hz که اختلاف زیادی با مقادیر ماکزیمم شدت جریان در نمودارهای دیگر وجود دارد، نباید این کاهش شدت جریان را می‌دیدیم. پس به نظر می‌رسد که تنها عامل این کاهش می‌تواند تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی باشد.

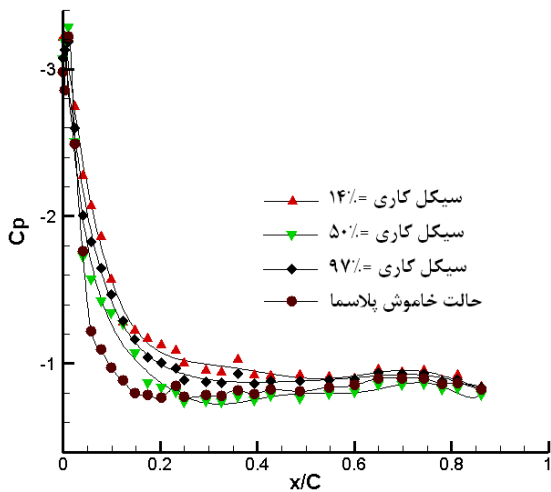
در شکل ۴ نمودار توزیع ضریب فشار روی بال با زاویه حمله ۱۶ درجه در شرایط روشن بودن عملگر با سیکل‌های کاری ۱۴ درصد و ۹۰ درصد (فرکانس تحریک برابر ۵۰ Hz) و در دو حالت خاموش بودن عملگر پلاسمایی و بدون حضور عملگر روی سطح با هم مقایسه شده‌اند. ضریب فشار بر اساس رابطه زیر ارائه شده است.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{q} = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

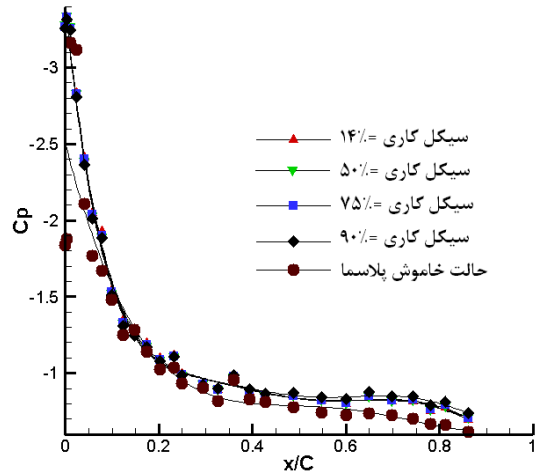
که در این رابطه C_p ضریب فشار، P فشار سطحی روی ایرفویل، ρ دانسیته هوا و P_∞ ، q و U_∞ به ترتیب فشار، فشار دینامیک و سرعت جریان آزاد در بالادست مدل‌اند.

با توجه به شکل ۴، تاثیر روشن بودن عملگر کمی در انتهای بال و کمی در حوالی الکتروود اول مشهود است. همان‌طور که از این شکل پیداست، نقطه جدایش به وسیله حضور عملگر و زبری ایجادشده توسط آن حذف شده است. این مسئله با توجه به وجود گرادیان فشار در طول بال و ثابت نماندن فشار در یک ناحیه خاص قابل درک است. بررسی سیکل‌های کاری در این فرکانس تحریک و برای این زاویه حمله تاثیر چندانی را نشان نمی‌دهد. مقادیر توزیع فشار در این شکل مقدار ۱۰ درصد

بهبود فشار را در مقایسه با دو مقدار دیگر سیکل کاری دارد. همچنین این بهبود فشار در سیکل کاری ۹۷ درصد که نزدیک به پلازما در حالت دائمی است و مصرف انرژی بالاتری دارد، تاثیر کمتری در مقایسه با سیکل کاری ۱۴ درصد دارد. با توجه به شکل ۳ سیکل کاری ۱۴ درصد جریان کمتری نسبت به مقادیر ۵۰ درصد و ۹۷ درصد دارد، ولی علی‌رغم مصرف انرژی کمتر کارایی بهتری در بهبود فشار دارد. علت این کارایی بالاتر را می‌توان ایجاد رشته‌ای از گردابه‌ها توسط عملگر پلاسمایی دانست که در سیکل کاری ۱۴ درصد، که نسبت به بقیه سیکل‌های کاری کمتر است، تاثیر بهتری در حذف یا کاهش ناحیه حباب تشکیل‌شده روی ایرفویل دارد.

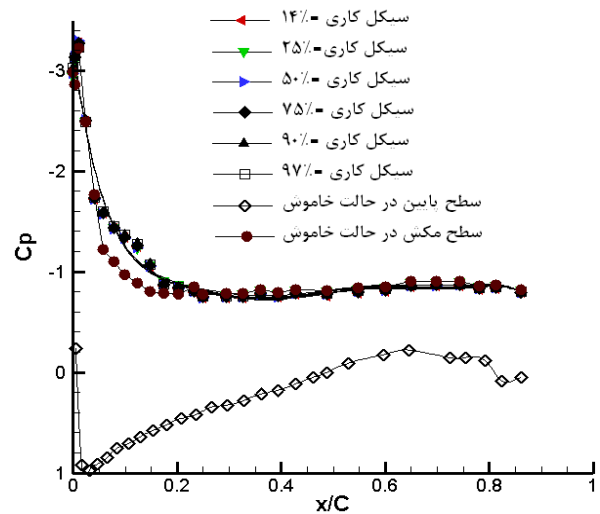


شکل ۵ توزیع فشار در سطح بالای ایرفویل در زاویه حمله ۱۶ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۱۰۰ Hz (سیکل‌های کاری متفاوت) و عملگر خاموش



شکل ۷ توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۱۰۰ Hz (سیکل‌های کاری متفاوت) و عملگر خاموش

شکل ۶ توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۱۸ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۵۰ Hz (سیکل‌های کاری متفاوت) و عملگر خاموش

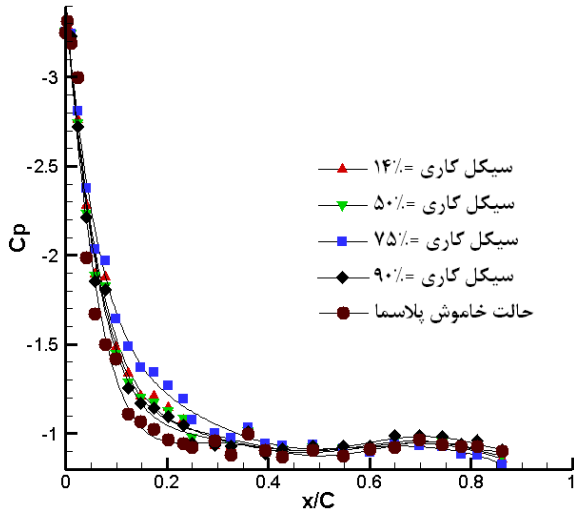


مکانیزم عملگرهای پلاسمایی ایجاد یک جریان جت میکرو در نزدیک سطح همراه با کمی مکش است که با ایجاد قطاری از گردابه‌ها و تولید ورتیسیت در جهت منظر بال همراه است. با توجه به ماهیت جریان در سطح بالای ایرفویل که بستگی به شرایطی مانند فرکانس و قدرت گردابه‌های ریزش‌شده، اتصال مجدد و تشکیل حباب، سایز حباب تشکیل‌شده و موقعیت قرارگیری آنها دارد کارایی پلازما در بهبود فشار تغییر می‌کند. مطالعات انجام‌شده توسط شادآرام و همکارانش [۱۴] نشان می‌دهد که عملگر پلاسمایی کمی بالاتر از دیواره باعث افزایش

شکل ۷ تاثیر میزان سیکل کاری بر توزیع فشار روی سطح بالایی ایرفویل در فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz و برای زاویه حمله ۱۸ درجه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌کنیم که سیکل کاری ۱۴ درصد بهترین میزان

1. Vortex Shedding

جابه‌جایی نقطه جدایش و بهبود فشار را شاهدیم و نقطه جدایش از حوالی $x/C = 0.20$ به حوالی $x/C = 0.30$ جابه‌جا شده است.



شکل ۹ توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۲۰ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۵۰ Hz (سیکل‌های کاری متفاوت) و عملگر خاموش

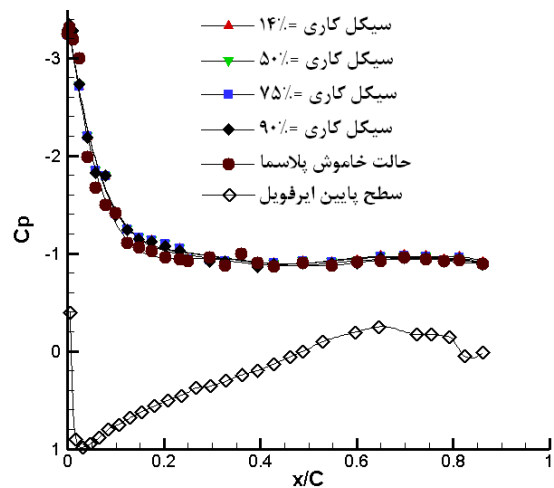
مقدار درصد افزایش لیفت بر حسب تغییرات فرکانس تحریک بی‌بعد (عدد اشتروهال) در سیکل‌های کاری ۱۴ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد در زاویه حمله ۱۸ درجه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، عدد اشتروهال بر اساس رابطه زیر تعریف شده است.

$$St = \frac{f_e c}{U_\infty} \quad (2)$$

در این رابطه f_e فرکانس تحریک، c طول وتر بال و U_∞ سرعت جریان آزاد است. با توجه به این شکل در سیکل‌های کاری کمتر، ماکزیمم لیفت در عدد اشتروهال کمتر اتفاق می‌افتد و در سیکل کاری ۵۰ درصد مقدار عدد اشتروهال بهینه افزایش می‌یابد. نکته دیگر در مورد این نمودار این است که عدد اشتروهال بهینه برخلاف نتیجه کورک و همکارانش [۱۱] در مقدار ۱ اتفاق نمی‌افتد، بلکه برای سیکل‌های کاری کم (۱۴ درصد و ۲۵ درصد) در حوالی $1/8$ تا ۲ قابل مشاهده است. روند مشابهی در نمودار تحقیق شده به وسیله گوکسل و همکارانش [۱۲] که روی یک MAV با $Re=20500$ انجام شده است دیده می‌شود و تنها تفاوت در عدد اشتروهال بهینه می‌باشد.

شدت آشفتگی جریان آزاد می‌شود و همچنین فرکانس ریزش گردابه با حضور پلازما کاهش می‌یابد. این افزایش شدت آشفتگی نیز می‌تواند باعث مقاومت بیشتر در جلوگیری از جدایش در شرایط گرادیان فشار معکوس شود. با توجه به این نمودار و بررسی روند تغییرات فشار، در بهترین حالت شرایط سیکل کاری در این فرکانس تحریک، نقطه جدایش از $x/C = 0.15$ به $x/C = 0.50$ جابه‌جا شده است.

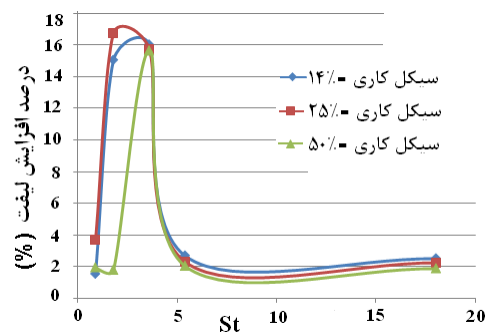
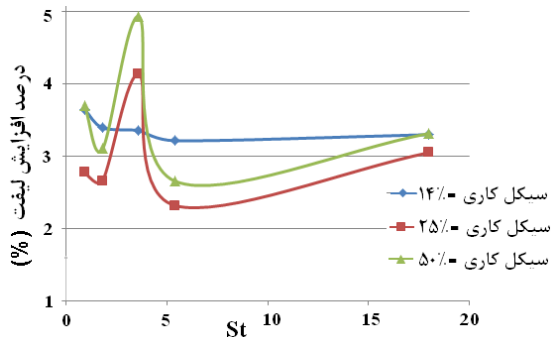
مطابق شکل ۸ میزان تاثیر عملگر پلاسمایی با سیکل‌های کاری متفاوت در بهبود فشار روی سطح بالایی این ایرفویل در زاویه حمله ۲۰ درجه و فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در این زاویه حمله، پلازما در سیکل‌های کاری متفاوت در این فرکانس تحریک تاثیر چندانی بر توزیع فشار در سطح بالایی ایرفویل ندارد. با توجه به بزرگ‌بودن زاویه حمله، در این شرایط عملگر پلاسمایی توانایی به تعویق انداختن جدایش را ندارد. به عبارت دیگر امکان اتصال مجدد وجود ندارد. در این زاویه حمله، تاثیر پلازما با فرکانس تحریک ۵۰ Hz نیز تحقیق شده است.



شکل ۸ توزیع فشار حول ایرفویل در زاویه حمله ۲۰ درجه در حالت‌های عملگر روشن با فرکانس ۱۰۰ Hz (سیکل‌های کاری متفاوت) و عملگر خاموش

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، حضور پلازما در این فرکانس تحریک تاثیر بهتری در بهبود فشار و جابه‌جایی نقطه جدایش از خود نشان می‌دهد. به طوری که نشان داده شده است در سیکل کاری ۷۵ درصد بهترین شرایط

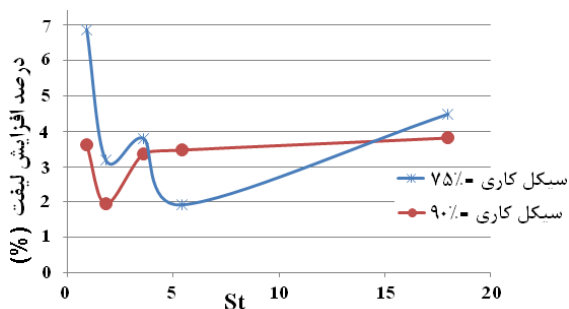
درصد یک مقدار ماکزیمم لیفت را شاهدیم که در حوالی عدد اشتروهل برابر ۳/۵ اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰ درصد افزایش لیفت بر حسب عدد اشتروهل در سیکل‌های کاری ۱۴ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد برای زاویه حمله ۱۸ درجه

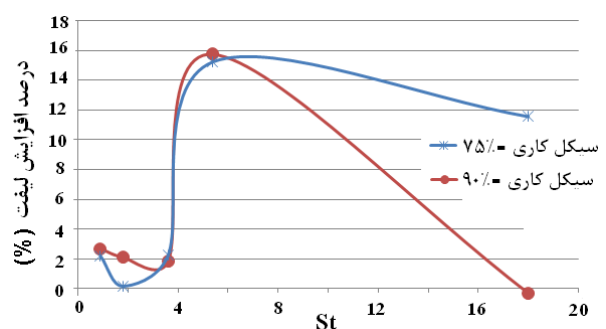
شکل ۱۲ درصد افزایش لیفت بر حسب عدد اشتروهل در سیکل‌های کاری ۱۴ درصد، ۲۵ درصد و ۵۰ درصد برای زاویه حمله ۲۰ درجه

تاثیر سیکل‌های کاری ۷۵ درصد و ۹۰ درصد در افزایش لیفت با تغییر عدد اشتروهل در شکل ۱۳ تحقیق شده است. با توجه به این شکل، در سیکل کاری ۷۵ درصد بیشترین افزایش لیفت در حوالی عدد اشتروهل برابر ۰/۹ دیده می‌شود. ولی به طور کلی وابستگی افزایش لیفت به عدد اشتروهل خیلی کم می‌شود.



شکل ۱۳ درصد افزایش لیفت بر حسب عدد اشتروهل در سیکل‌های کاری ۷۵ و ۹۰ درصد برای زاویه حمله ۲۰ درجه

مقدار درصد افزایش لیفت بر حسب تغییرات فرکانس تحریک بی‌بعد در سیکل‌های کاری ۷۵ درصد و ۹۰ درصد در زاویه حمله ۱۸ درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شکل نمودارها رفتار مشابهی در مقایسه با سیکل‌های کاری کمتر از ۵۰ درصد دارند، با این تفاوت که در سیکل‌های کاری بالاتر از ۵۰ درصد ماکزیمم افزایش لیفت در عدد اشتروهل بالاتری (حوالی ۵) اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به نمودارهای شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان بیان داشت که ماکزیمم افزایش لیفت در زاویه حمله ۱۸ درجه حدود ۱۷ درصد است.



شکل ۱۱ درصد افزایش لیفت بر حسب عدد اشتروهل در سیکل‌های کاری ۷۵ درصد و ۹۰ درصد برای زاویه حمله ۱۸ درجه

۴- نتیجه‌گیری

نتایج ارائه‌شده برای توزیع فشار روی سطح بالایی ایرفویل مدل NLF0414، یعنی جایی که عملگرهای پلاسمایی در سه ردیف در مکان‌های ذکرشده به کار گرفته شده است، بهبود فشار در زوایای حمله ۱۶ تا ۲۰ را نشان می‌دهد. این در حالی است که استفاده از عملگرهای پلاسمایی با مشخصات نامبرده شده در

با توجه به شکل ۱۲ در زاویه حمله ۲۰ درجه افزایش لیفت تحت حضور پلاسمای در مقایسه با زاویه ۱۸ درجه به طور کلی کارایی کمتری دارد. همچنین می‌توان بیان داشت که با بزرگ‌شدن زاویه حمله تا ۲۰ درجه حساسیت درصد افزایش لیفت به شرایط پلاسمای (فرکانس تحریک و سیکل کاری) کمتر می‌شود. اما همچنان در سیکل‌های کاری ۲۵ درصد و ۵۰

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود واجب می‌دانند تا از بخش صنایع پیشرو در وزارت صنایع و معادن که حمایت مالی در انجام این تحقیق را به عهده داشتند تقدیر و تشکر کنند.

۶- مراجع

- [1] Post M., Corke T. C., "Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 11, 2004, pp. 2177-2184.
- [2] Huang J., Corke T. C., Thomas F. O., "Unsteady Plasma Actuators for Separation Control of Low Pressure Turbine Blades", *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 7, 2006, pp. 1477-1487.
- [3] Jolibois J., Forte M., Moreau E., "Application of an AC Barrier Discharge Actuator to Control Airflow Separation above a NACA 0015 Airfoil: Optimization of the Actuation Location along the Chord", *Journal of Electrostatics*, Vol. 66, 2008, pp. 496-503.
- [4] Little J., Nishihara M., Adamovich I., Samimy M., "High-Lift Airfoil Trailing Edge Separation Control using a Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator", *Exp Fluids*, Vol. 48, 2010, pp. 521-537.
- [5] Sosa R., Artana G., Moreau E., Touchard G., "Stall Control at High Angle of Attack with Plasma Sheet Actuators", *Exp Fluids*, Vol. 42, 2007, pp. 143-167.
- [6] Huang J., "Separation Control over Low Pressure Turbine Blades using Plasma Actuators", PhD Thesis, University of Notre Dame, 2005.
- [7] Patel M. P., Sowle Z. H., Corke T. C., He C., "Autonomous Sensing and Control of Wing Stall Using a Smart Plasma Slat", *Journal of Aircraft*, Vol. 44, No. 2, 2007, pp. 516-527.
- [8] Enloe C. L., McLaughlin T. E., Van Dyken R. D., Kachner K. D., Jumper E. J., Corke T. C., Post M., Haddad O., "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, 2004, pp. 595-604.
- [9] Forte M., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M., "Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity: Application to Airflow Control", *Exp Fluids*, Vol. 43, 2007, pp. 917-928.
- [10] Enloe C. L., McLaughlin T. E., Van Dyken R. D., Kachner K. D., Jumper E. J., Corke T. C., "Mechanisms and Responses of a Single Dielectric

زاویه ۱۸ درجه بهترین تاثیر را دارد. این کارایی در زاویه حمله ۲۰ درجه نسبتاً کاهش می‌یابد. این بهبود فشار با تغییر نقطه جدایش همراه است که به نظر می‌رسد برای زاویه حمله ۱۸ درجه در بهترین شرایط این جابه‌جایی از $x/C = 0.15$ به کمی بعد از $x/C = 0.50$ و در زاویه حمله ۲۰ درجه به حوالی $x/C = 0.30$ جابه‌جا شده است. در بهترین حالت حضور عملگر پلاسمایی در شرایط مذکور حدود ۱۷ درصد افزایش لیفت را شاهدیم. نتایج توزیع فشار در حالت روشن کردن عملگر، در سیکل‌های کاری مختلف نشان می‌دهد که فرکانس‌های تحریک کم با سیکل‌های کاری پایین‌تر در افزایش لیفت در زاویه حمله ۱۸ درجه که نزدیک به نقطه واماندگی است موفق‌تر نشان می‌دهند. اما با افزایش فرکانس تحریک، کارایی پلاسمای در سیکل‌های کاری بالاتر بهتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های تحریک پایین‌تر کارایی بهتری دارد. احتمالاً، در فرکانس‌های تحریک نزدیک به فرکانس ریزش گردابه، پلاسمای کارایی بالاتری خواهد داشت. پلاسمای حاضر به دو شکل روی جریان اثرگذار است؛ یکی افزایش سرعت نزدیک دیواره و دیگری ایجاد ورتکس. ایجاد این ورتکس‌ها با فرکانسی معادل با فرکانس گردابه‌های ریزش‌شده از روی مدل می‌تواند کارایی بهتری در بهبود توزیع فشار داشته باشد. امکان پایین آمدن کارایی عملگر در فرکانس‌های تحریک ناهماهنگ با فرکانس ریزش گردابه‌ها، حتی زمانی که افزایش مومنتوم بالاترین میزان را داشته باشد می‌تواند وجود داشته باشد. این مسئله با توجه به مقادیر شدت جریان الکتریکی ارائه‌شده در شرایط مختلف و عدم وجود کارایی بالاتر در بهبود توزیع فشار تحت شدت جریان‌های بالاتر قابل استنباط است. در کارهای آتی سعی داریم تا این تاثیر را تحقیق نماییم.

به منظور اختلاف نظر بین مراجع [۱۱]، [۱۲] و [۳] برای ارائه عدد اشتروهمال ۱ به‌عنوان مقدار فرکانس تحریک بهینه، فرکانس‌های تحریک مختلف در سیکل‌های کاری متفاوت بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهند که عدد اشتروهمال بهینه وابسته به مقدار سیکل کاری و عدد رینولدز است و نتایج ارائه‌شده به وسیله مراجع [۱۱] و [۱۲] مبنی بر بهینه‌بودن عدد اشتروهمال ۱ نمی‌تواند در همه سیکل‌های کاری صادق باشد. این در حالی است که عدد اشتروهمال بهینه با افزایش مقدار سیکل کاری افزایش می‌یابد.

- [۱۳] دوست محمودی علیرضا، میرزایی مسعود، ناظمیان علایی محسن، "مطالعه تجربی الگوی جریان و ضرایب آیرودینامیکی بر روی ایرفویل NLF0414 یخزده"، هجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹، ISME2010-3046.
- [14] Shadaram A., Mirzaei M., Shams Taleghani A., "Experimental Study of Active Flow Control using Plasma Actuator over an Airfoil", *13th Annual & 2nd International Fluid Dynamics Conference*, Fd2010-26-28 Oct., 2010, Shiraz University, Iran.
- Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, 2004, pp, 589-594.
- [11] Corke T. C., He C., Patel M. P., "Plasma Flaps and Slats: an Application of Weakly-Ionized Plasma Actuators", *AIAA Paper*, 2004, pp. 2004-2127.
- [12] Goksel B., Greenblatt D., Rechenberg I., Kastantin Y., Nayeri C. N., Paschereit C. O., "Pulsed Plasma Actuators for Active Flow Control at MAV Reynolds Numbers", *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*; Vol. 95, 2007, pp. 42-55.