



مطالعه تجربی تأثیر پارامترهای هندسی و الکتریکی در مشخصه‌های جریان یونی القایی توسط عملگرهای پلاسمایی

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

۱- استادیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه هوافضا، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۸۳۴-۱۴۶۶۵، Arash.taleghani@gmail.com

چکیده- این مقاله به اندازه‌گیری تجربی سرعت لحظه‌ای باد یونی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی تخلیه سد دی‌الکتریکی (DBD) در محیط هوای ساکن با فشار اتمسفریک می‌پردازد. یک مطالعه پارامتریک برای افزایش سرعت باد یونی القایی توسط عملگر DBD انجام شده است. مشخصات الکتریکی و مکانیکی این عملگر در شرایط مختلف مطالعه شده است. هدف اصلی این کار کمک به بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و الکتریکی برای فراهم کردن باد یونی مؤثرتر در کنترل جریان می‌باشد. پروفیل‌های سرعت متوسط باد یونی القایی نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس تحریک موقعیت سرعت ماکزیمم به سطح نزدیکتر می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق بیان می‌کنند که عملگرهای پلاسمایی DBD گردابه‌هایی در همان فرکانس تحریک و لذا اعمال شده تولید می‌کنند. با افزایش درصد سیکل کاری، قدرت گردابه‌های شسته شده از عملگرها نیز افزایش می‌یابد. بر خلاف کارهای مشابه در این زمینه، این مطالعه رفتار غیردائمی موج ورودی به عملگر پلاسمایی را بررسی می‌کند. **کلیدواژگان:** عملگر پلاسمایی، کنترل فعال، DBD، سیکل کاری، فرکانس تحریک.

Experimental investigation of geometric and electrical characteristics by measurements of the induced flow velocity

A. Shams Taleghani^{1*}, A. Shadaram², M. Mirzaei³

1- Assist. Prof., Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

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

3- Assoc. Prof., Aerospace Eng., K.N. Toosi Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 14665-834, Tehran, Iran. Arash.taleghani@gmail.com

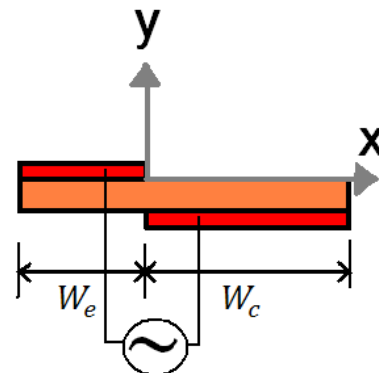
Abstract- This paper deals with experimental measurements of the instantaneous ionic wind velocity induced by Dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuator in quiescent air at atmospheric pressure. A parametric study has been performed in order to increase the velocity of the ionic wind induced by the DBD actuators. The electrical and mechanical characteristics of the plasma actuator have been studied under different conditions. The main objective of this work was to help to optimize the geometrical and electrical parameters to obtain more effective ionic wind for flow control. The time averaged velocity profiles of the ionic wind show that the position of the maximum velocity come near the surface by increasing the excitation frequency. Our results indicate that the DBD plasma actuators generate vortices at the same frequency of the excitation frequency of the applied high voltage. The power, of the vortices that are shed from the actuators, increases by increasing duty cycle percentage. Unlike other similar works in this field, this study has examined the behavior of unsteady plasma actuator.

Keywords: Plasma Actuator, Active Control, DBD, Duty Cycle, Excitation Frequency.

۱- مقدمه

از سال ۱۹۹۸ که اولین مقالات کنترل جریان در خصوص DBD [۱،۲] چاپ شد، تا کنون مقالات زیادی ارائه شده است که در آنها از عملگر پلاسمایی DBD برای کنترل جریان استفاده کرده‌اند. توانایی‌های این نوع عملگرهای پلاسمایی در به تعویق انداختن جدایش و در نتیجه افزایش لیفت ایرفویل [۳،۴]، کاهش درگ بدنه‌های غیر خط جریانی [۵،۶]، کاهش نویز [۷]، حذف امواج تولیمن-شلیختینگ [۸] و داشتن برخی مزیت‌ها نسبت به سایر ابزارهای کنترل جریان مانند سبک بودن، فعال بودن، داشتن حجم کم، نداشتن نویز در سیستم و غیره باعث جلب توجه زیاد محققان به این ابزار شده است. مرورهای جامعی از تاریخچه توسعه و کاربردهای این ابزار در کنترل جریان توسط موراً [۹] و کورک و همکارانش [۱۰] ارائه شده است.

تصویر شماتیک عملگر استفاده شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. عکسهای منتشر شده توسط ارلو و همکارانش [۱۱] که به وسیله دوربین‌های سرعت بالا گرفته شده است، نشان می‌دهد که ساختار پلازما در بخش منفی رو و مثبت رو ولتاژ در یک موج سینوسی با هم تفاوت دارد. ساختار این عکس‌ها دو مد استریم و گلو را نشان می‌دهد. این تفاوت در ساختار پلازما بین نیم سیکل مثبت و نیم سیکل منفی ولتاژ نیز توسط انلو و همکارانش [۱۲] پیش از این مطرح شده است. این تغییر در ساختار پلازما باعث ایجاد سرعت نوسانی در میکرو جت تولید شده می‌شود که یکی از جنبه‌های مورد اهمیت کار حاضر، اندازه‌گیری این نوسانات می‌باشد.



شکل ۱ شماتیک از عملگر پلاسمایی به همراه دستگاه مختصات

اندازه‌گیری نیروهای لحظه‌ای و جهت آنها که توسط پورت و همکارانش [۱۳] با استفاده از یک پاندول اندازه‌گیری نیرو و شتاب‌سنج انجام شده بود، نشان داد که نیروی حجمی تولید شده توسط عملگر شامل یک نیروی بزرگ و یک نیروی کوچک است. همچنین آنها نشان دادند که نیروی حجمی روی فاصله ۴mm اول بالای سطح اعمال می‌شود.

نیروی الکتروهایدرودینامیکی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\vec{f}_B = \rho_c \vec{E} \quad (1)$$

که در آن $\vec{f}_B$ نیروی حجمی بر واحد حجم، ρ_c چگالی بار خالص و $\vec{E}$ میدان الکتریکی است. این نیروی حجمی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی، به عنوان ترم چشمه در معادله ناویه-استوکس اثر می‌گذارد.

گراندمن و تروپا [۱۴] به مطالعه اثرات دمپ کردن نوسانات لایه مرزی توسط عملگر پلاسمایی پرداختند. آنها با استفاده از ابزار سرعت سنج لیزری و سیم داغ ایجاد یک مکش شبیه چاه را در پایین دست عملگرها با ارتفاع حدود ۱۰mm گزارش نمودند که افزایش آشفتگی مولفه عمودی سرعت را به همراه داشت. مکانیزم دمپ کردن لایه مرزی به دو شکل ایجاد پروفیل لایه مرزی پایدارتر با رینولدز بحرانی بیشتر و نازک شدن لایه مرزی به همراه رینولدز موضعی پایینتر عمل می‌کند. آنها موفق شدند نقطه گذر آرام به آشفتگی را ۲۰۰mm به تعویق بیاورند. پیشتر از این نیز روث و همکارانش [۱۵] با ایجاد سرعت توسط عملگرهای پلاسمایی در نزدیک سطح، توانایی این وسیله در کنترل لایه مرزی را نشان داده بودند.

کارایی این نوع عملگر پلاسمایی در کنترل بهینه جریان به پارامترهای زیادی مانند مشخصات هندسی و جنس الکترودها و دی‌الکتریک، ولتاژ اعمالی، شکل موج ولتاژ، فرکانس‌های امواج انتقالی و تحریک، سیکل کاری و غیره بستگی دارد. با توجه به پارامترهای متعدد تأثیرگذار در عملکرد یک عملگر پلاسمایی، بهینه‌سازی آن کار نسبتاً مشکلی است. یک مطالعه خیلی خوب از بهینه‌سازی عملگر پلاسمایی DBD برای افزایش سرعت جریان القایی در مقاله فورته و همکارانش [۱۶] دیده می‌شود. در آن مطالعه اثرات هندسی شامل ضخامت دی‌الکتریک، پهنای الکترودها و مقدار ولتاژ و فرکانس موج اعمالی روی سرعت ماکزیمم القایی بررسی شده است. در آن تحقیق

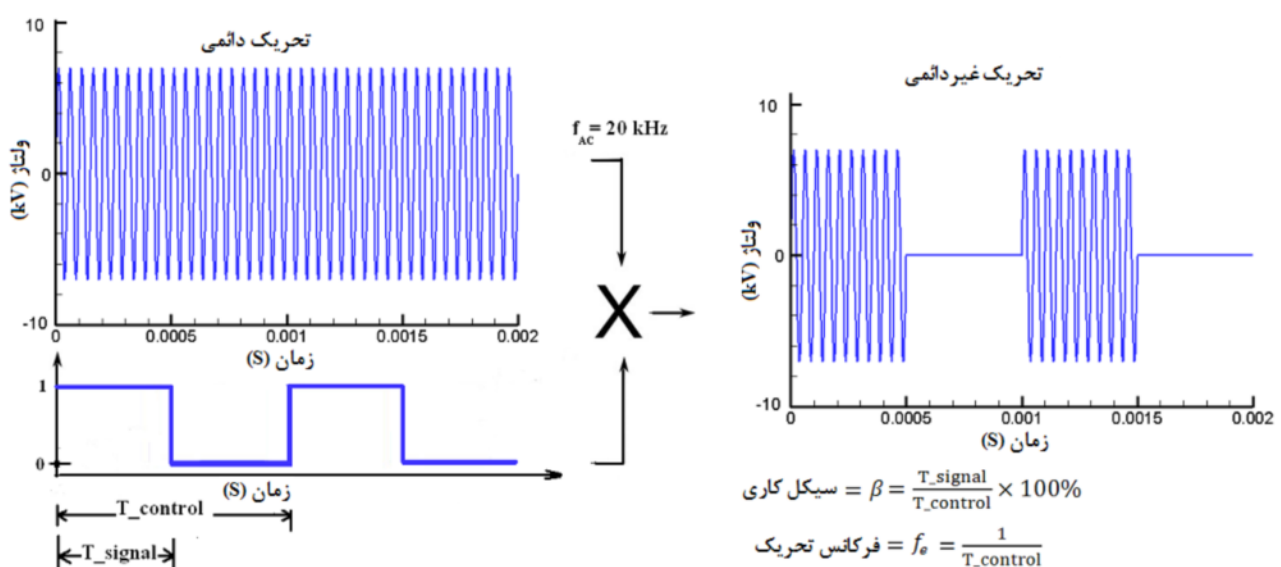
خروجی منبع تغذیه با توان 250 W طوری طراحی شده است تا فرکانس بین 1 تا 30 kHz ، ولتاژ قابل تنظیم از 1 تا $20\text{ kV}_{\text{p-p}}$ فرکانس تحریک از 10 تا 2000 Hz و سیکل کاری متغیر از 2 تا 97% را تأمین نماید. تمامی متغیرهای نامبرده شده بدون وابستگی به طور جداگانه قابل تغییر هستند. تغییر در پارامترها به شکل دستی یا از طریق اتصال به کامپیوتر امکان پذیر است. وقتی عملگر روشن شود، پلاسما در لبه مشترک دو الکتروود تشکیل می شود و با پیشروی به طرف الکتروود پوشانده شده شدت آن کاهش می یابد. شکل ۲ نحوه تحریک غیردائمی در ولتاژ $14\text{ kV}_{\text{p-p}}$ سیکل کاری 50% و نحوه مدولاسیون آن را برای یک موج سینوسی به طور شماتیک نشان می دهد. مفهوم سیکل کاری و فرکانس تحریک در این شکل نیز مشخص شده است.

برای اندازه گیری سرعت لحظه ای باد یونی القایی توسط عملگر پلاسمایی از سرعت سنجی توسط سیم داغ استفاده شد. سرعت های متوسط و لحظه ای در جهت غالب توسط پراب یک بعدی نوع 55P11 شرکت دانتک اندازه گیری شد. پراب در برابر کالیبراتور در سرعت های 0.5 تا 12 متر بر ثانیه کالیبره شد و ماکزیمم خطای کالیبراسیون حدود 2% بود. برای جابجایی پراب از یک تراورس با دقت 0.1 mm استفاده شد. داده برداریها در فرکانس های 1 kHz و 2 kHz و در مقطعی به فاصله $x=11\text{ mm}$ از لبه مشترک بین دو الکتروود انجام شد.

فرکانس موج حامل در بازه 100 Hz تا 2 kHz و تنها برای شرایط تحریک دائمی موج ولتاژ اعمالی انجام شده است. با توجه به عدم بررسی اثرات فرکانس تحریک و درصد سیکل کاری بر روی سرعت القایی در محیط ساکن توسط دیگران، این مطالعه اثر این پارامترهای الکتریکی را بررسی می کند. همچنین اثرات سرعت القایی لحظه ای توسط پلاسما در محیط ساکن در فرکانس های بالاتر موج (تا 30 kHz) در کار حاضر تحقیق می شود. در این تحقیق مشخصه های سرعت غیردائمی تولید شده توسط عملگرهای پلاسمایی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. نتایج خروجی این مقاله می تواند به مدل سازی بهتر عملگر پلاسمایی در شرایط تحریک غیر دائمی کمک کند که در کارهای آینده نتایج این مدل سازی عددی نیز ارئه خواهد شد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات مربوط به تخلیه الکتریکی شامل دو الکتروود به شکل فویل های مسی صاف به طول 30 cm در راستای منظر و ضخامت $50\text{ }\mu\text{m}$ می باشد. عملگرها برای انجام آزمایش روی یک صفحه مسطح از جنس پلکسی گلاس با ضخامت 15 mm نصب شده است. الکتروودهای در معرض هوا به یک منبع ولتاژ Ac با شکل ولتاژ سینوسی و الکتروودهای پوشیده شده با دی الکتریک به زمین وصل می شوند. در کار حاضر از ماده دی الکتریک کاپتون به شکل نوارچسب استفاده شده است.



شکل ۲ شماتیکی از تحریک دائمی و غیر دائمی و نحوه مدولاسیون برای یک موج سینوسی

این نمودارها برای عملگر پلاسمایی با نسبت $W/W_e = 3$ ضخامت $W_e = 3$ لایه نوار کاپتون و طول الکترودهای 30 cm رسم شده‌اند. فرکانس موج ولتاژ در همه این نمودارها 28 kHz می‌باشد. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار سیکل کاری تا حوالی 80% ، 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 نسبتاً مشابهی دارند. در کمترین مقدار سیکل کاری (14%) مقدار شدت جریان برای فرکانس 1000 Hz کمترین مقدار را نسبت به فرکانس‌های تحریک دیگر دارد. در این سیکل کاری با کاهش فرکانس تحریک مقدار شدت جریان افزایش می‌یابد تا این که در فرکانس 50 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 80% کاهش می‌یابد. علت این کاهش مقدار شدت جریان در سیکل‌های کاری بالا با توجه به کافی بودن منبع تغذیه بر اساس مقالات منتشر شده [۱۷] ناشی از تغییر در مدهای پلاسمایی و تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی می‌باشد. اگر توان منبع تغذیه ناکافی بود، حداقل در فرکانس‌های تحریک 50 Hz و 100 Hz که اختلاف زیادی با مقادیر ماکزیم شدت جریان در نمودارهای دیگر وجود دارد، نباید این کاهش شدت جریان مشاهده می‌شد. تنها عامل این کاهش تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی می‌باشد.

نمودار تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با درصد سیکل کاری بر اساس فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل ۵ رسم شده است. این نمودارها با توجه به مقادیر نمودار شکل ۴ آورده شده است. در این نمودار، افزایش مصرف انرژی بر حسب سیکل کاری تا حوالی 90% ، رابطه‌ای خطی دارد. همچنین افزایش فرکانس تحریک تا حوالی 200 Hz باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود و برای مقادیر بالاتر از این فرکانس تحریک، مصرف انرژی تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به کمتر بودن مصرفی ماکزیم از توان منبع تغذیه و کاهش کم در مقادیر توان مصرفی در بالای سیکل کاری 90% ، می‌توان این محدوده را شروع رشته‌های قوس الکتریکی دانست.

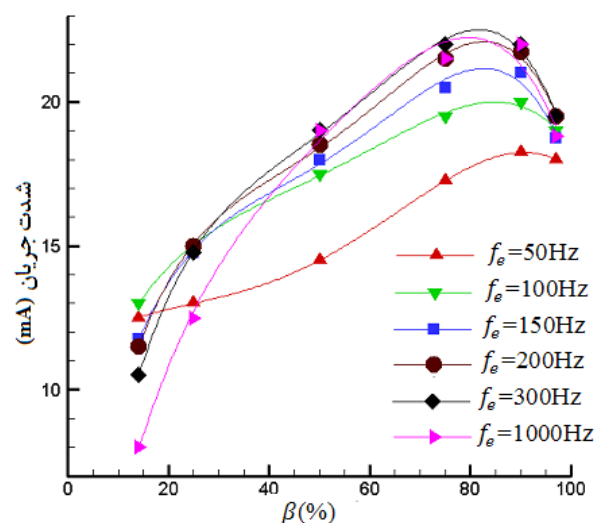
شکل ۳ تصویری از اندازه‌گیری سرعت القایی در محیط ساکن و نحوه قرارگیری پراب سیم داغ را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی متوسط از مولتی متر عقربه‌ای ساخت شرکت کیوریتسو مدل ۱۱۰۹ استفاده شد. یک مقاومت 1000 اهمی در سر راه جریان قرار دارد که با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر این مقاومت، مقدار جریان قابل محاسبه است. خطای اندازه‌گیری در مقادیر شدت جریان اندازه‌گیری شده $\pm 3\%$ است.

۳- مشخصات الکتریکی عملگرهای پلاسمایی

قبل از شروع اندازه‌گیری سرعت باد یونی، شناسایی مشخصات الکتریکی عملگر پلاسمایی ساخته شده ضروری است. در ابتدا برای شناخت رفتار الکتریکی عملگرهای پلاسمایی، منحنی میزان متوسط شدت جریان الکتریکی بر حسب تغییرات سیکل کاری در فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل ۴ رسم شده است.

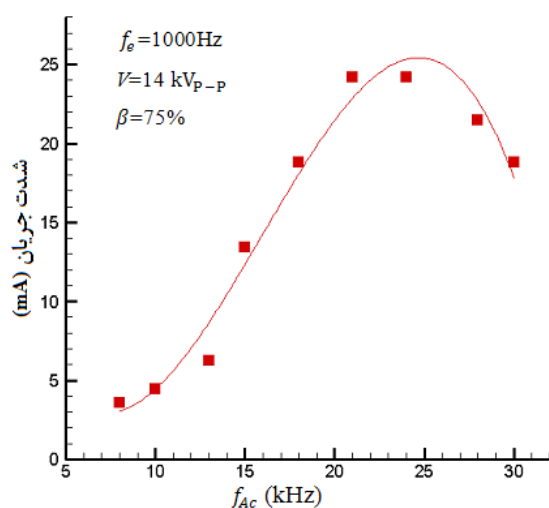


شکل ۳ اندازه‌گیری باد یونی القایی توسط پلازما در محیط ساکن

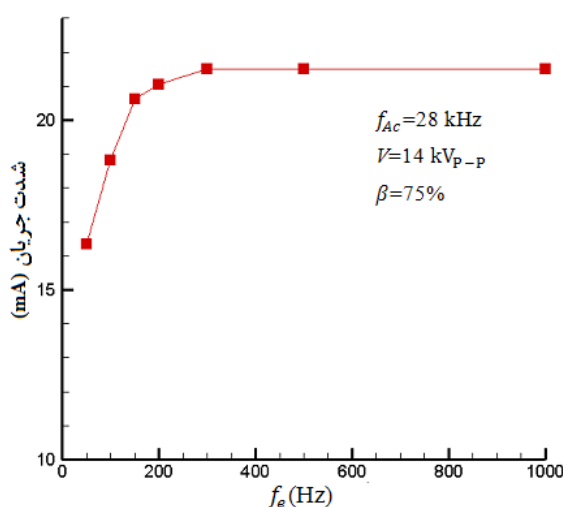


شکل ۴ تأثیر میزان سیکل کاری بر شدت جریان الکتریکی در فرکانس‌های تحریک مختلف

در فرکانس‌های تحریک بالاتر از 300 Hz ، شدت 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 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 به حدی می‌رسد که دیگر تأثیری بر مقاومت الکتریکی محیط پلاسما ندارد و جریان متوسط ثابت خواهد ماند.



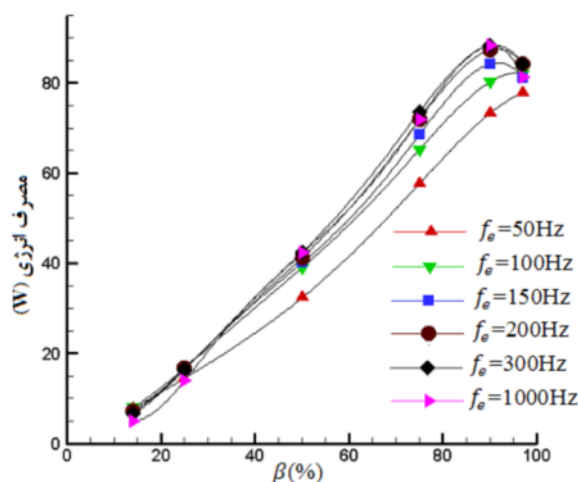
شکل ۷ اثر فرکانس موج بر شدت جریان متوسط



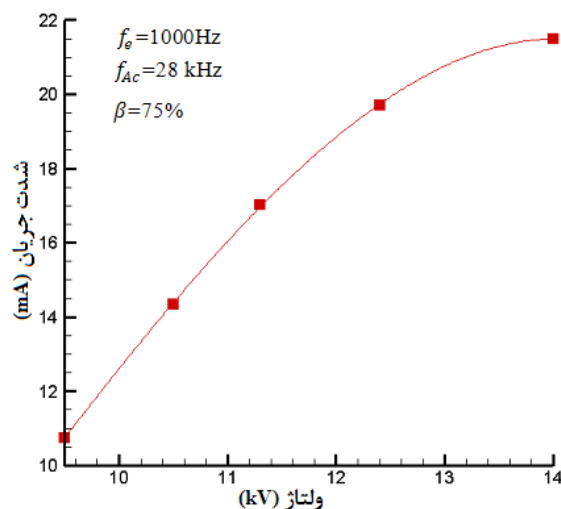
شکل ۸ اثر فرکانس تحریک بر شدت جریان متوسط

شکل ۶ تغییرات ولتاژ بر حسب متوسط شدت جریان را نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ مقدار جریان افزایش یافته و رفته رفته شیب افزایش جریان کاهش می‌یابد. با افزایش ولتاژ مقدار یونیزاسیون بیشتر شده و شدت نور ساطع شده از پلاسما افزایش می‌یابد که باعث افزایش جریان خواهد شد.

در شکل‌های ۷ و ۸ 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.



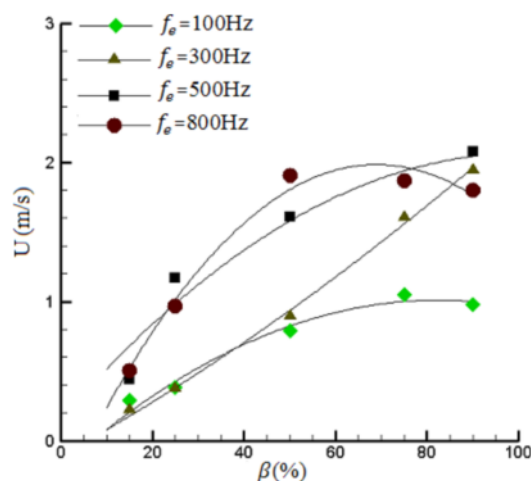
شکل ۹ تأثیر میزان سیکل کاری بر مصرف انرژی الکتریکی در فرکانس‌های تحریک مختلف



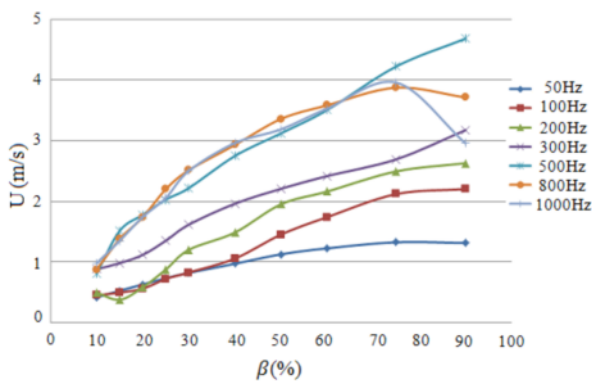
شکل ۱۰ تغییرات ولتاژ بر حسب جریان در عملگر پلاسمایی

$\gamma=0$ بر اساس شکل ۱ برای نسبت $W/W_e=1$ رسم شده است. این مقادیر در فرکانس داده برداری ۱kHz برای مدت زمانی ۱۶ ثانیه جمع‌آوری شده است. با توجه به نمودارهای شکل ۹ برای فرکانس‌های تحریک تا ۵۰۰Hz، سرعت متوسط ماکزیمم رابطه‌ای تقریباً خطی با مقدار سیکل کاری دارد. همچنین افزایش فرکانس تحریک تا ۵۰۰Hz تقریباً در بیشتر محدوده سیکل کاری باعث افزایش ماکزیمم سرعت متوسط باد یونی تولید شده می‌شود.

در شکل ۱۰ روند تأثیر تغییر سیکل کاری بر روی سرعت متوسط تولید شده در عملگر پلاسمایی با نسبت $W/W_e=2$ برای فرکانس‌های تحریک مختلف ارائه شده است. در این شکل، پهنای الکتروود پوشیده شده در مقایسه با شکل ۹ ثابت نگاه داشته شده و تنها پهنای الکتروود در معرض جریان به نصف کاهش یافته است.



شکل ۹ سرعت متوسط ایجاد شده با $W/W_e=1$ و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a



شکل ۱۰ سرعت متوسط ایجاد شده با $W/W_e=2$ و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a

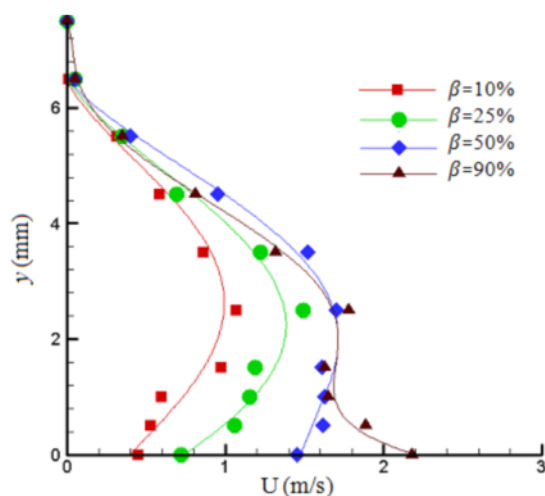
با افزایش فرکانس موج، میزان شدت جریان افزایش می‌یابد که این افزایش شدت جریان نیز به صورت افزایش شدت نور ساطع شده قابل مشاهده است. اما این افزایش جریان تا حوالی فرکانس ۲۴kHz ادامه می‌یابد و بعد از آن شاهد کاهش هستیم. این نقطه که ماکزیمم جریان را نیز در آن شاهد هستیم به نوعی توسط مطالعه کانهارت [۱۸] قابل توجیه است. نتایج کانهارت نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس موج، مقدار ولتاژ نسبی آغاز تشکیل پلازما کمتر می‌شود و بعد افزایش می‌یابد و در یک فرکانس موج خاص نیاز به کمترین مقدار ولتاژ برای تشکیل پلازما 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 پلازما بر حسب فرکانس موج دانست. همچنین نتایج پورتر [۱۳] نشان می‌دهد که برای یک ولتاژ ثابت و در فرکانس‌های ۵ تا ۲۰kHz توان مصرفی رابطه‌ای تقریباً خطی با فرکانس موج دارد. از آنجا که در ولتاژ ثابت میزان مصرف انرژی رابطه‌ای خطی با جریان دارد، لذا رفتار تقریباً خطی فرکانس موج با مقدار شدت جریان در محدوده فرکانس‌های ۵ تا ۲۰kHz به خوبی در این نمودار تأیید می‌شود.

۴- اندازه‌گیری سرعت متوسط باد یونی تولید شده در محیط هوای ساکن

برای آگاهی از میزان مومنتوم اضافه شده از عملگر پلاسمایی به جریان در شرایط مختلف سیکل کاری و فرکانس تحریک و همچنین عملگرهای پلاسمایی با شرایط هندسی مختلف (با پهنای الکتروودهای مختلف و ضخامت‌های دی‌الکتریک متفاوت) مقادیر سرعت باد یونی تولید شده در محیط هوای ساکن و بدون حضور جریان خارجی اندازه‌گیری شد. با توجه به شکل ۱ ابتدا اثر پهنای الکتروود پایینی عملگرهای پلاسمایی با نسبت‌های $W/W_e=1$ ، $W/W_e=2$ و $W/W_e=3$ بررسی شد. در هر یک از این ۳ عملگر مقادیر پهنای الکتروود پایینی در هر حالت ۱۰mm و ضخامت دی‌الکتریک با ۴ لایه از جنس کاپتون به ضخامت هر لایه $50\mu m$ ثابت نگاه داشته شد. در شکل ۹ مقادیر سرعت متوسط در موقعیت a با مختصات $x=11mm$ و

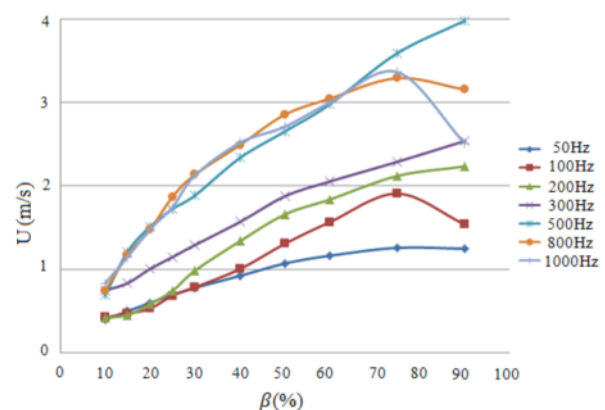
این پروفیل‌های سرعت برای فرکانس‌های تحریک ۳۰۰ Hz و ۵۰۰ Hz و نیز در همان مقطع به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. روند مشابهی در تغییر شکل پروفیل سرعت برای فرکانس‌های تحریک ۳۰۰ Hz و ۵۰۰ Hz نسبت به فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz دیده می‌شود. افزایش فرکانس تحریک و سیکل کاری باعث تغییر یافتن مکان سرعت ماکزیمم به موقعیت با γ کمتر می‌شود. از مقایسه بین این پروفیل‌های سرعت در فرکانس‌های تحریک مختلف، دیده می‌شود که عرض محدوده باد یونی تولید شده توسط پلاسما با افزایش فرکانس تحریک کاهش می‌یابد ولی سرعت ماکزیمم آن افزایش می‌یابد. ارتفاع پروفیل‌های سرعت شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ بین ۵ mm تا ۶/۴ mm متغیر است که به مقادیر ارائه شده توسط فورته و همکارانش [۱۶] و لی و همکارانش [۱۹] نزدیک است.

نزدیک شدن محل سرعت ماکزیمم به نزدیک سطح و افزایش آن در اثر افزایش فرکانس تحریک یا مقدار سیکل کاری می‌تواند خطر افزایش تنش برشی و میزان درگ اصطکاکی را به همراه داشته باشد. لذا تنها زیاده‌تر بودن سرعت متوسط نمی‌تواند دلیل بر بالاتر بودن کارایی عملگر باشد. این افزایش اصطکاک تحت تأثیر حضور عملگر پلاسمایی، در نتایج ضریب اصطکاک ارائه شده روی یک سطح که توسط گراندمن و همکارانش [۲۰] ارائه شده است، دیده می‌شود. برای مقایسه بین نحوه تغییر سرعت ماکزیمم در فرکانس‌های تحریک مختلف، در شکل ۱۵ نمودارهای سرعت ماکزیمم تولید شده توسط پلاسما بر حسب تغییرات سیکل کاری در فرکانس‌های تحریک ۱۰۰ Hz، ۳۰۰ Hz و ۵۰۰ Hz نشان داده شده است.

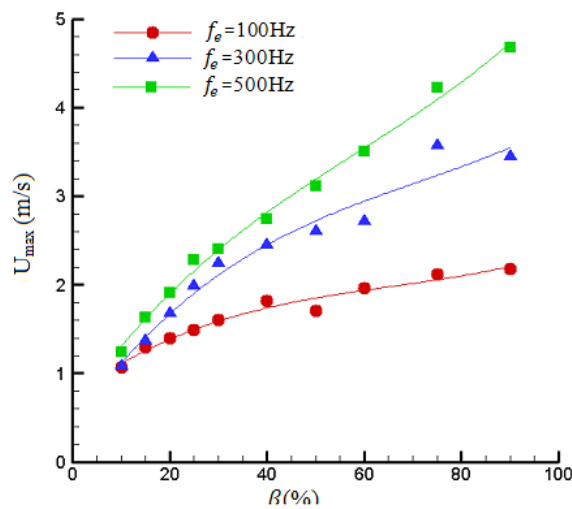


شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با $W_e/W_e = 2$ و ۴ لایه کاپتون در مقطع $x=11$ mm با فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz

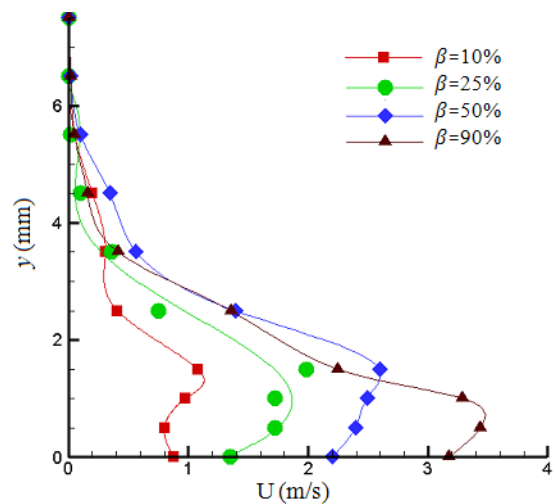
نتایج شکل ۱۰ در موقعیت a رسم شده است. مشابه با شکل ۹ افزایش فرکانس تحریک تا یک حد آستانه (۵۰۰ Hz) سبب افزایش سرعت تولیدی می‌شود. همچنین روند تقریباً خطی افزایش سرعت با افزایش سیکل کاری تا آن فرکانس تحریک، به خوبی مشهود است. برای مقادیر بیشتر از فرکانس تحریک ۵۰۰ Hz، افزایش سیکل کاری بیشتر از مقدار ۷۵٪ سبب کاهش سرعت تولیدی می‌شود. طبق شکل ۱۱ با پهن‌تر شدن نسبت الکترودها به ۳ و ثابت نگاه داشتن پهنای الکترودها پایینی، روند مشابهی در تغییرات سرعت متوسط مشاهده می‌شود. از مقایسه نمودارهای داده شده در شکل‌های ۹ تا ۱۱ دیده می‌شود که سرعت متوسط در موقعیت a با دوبرابر شدن نسبت پهنای الکترودها خیلی زیاد می‌شود ولی با بیشتر شدن این نسبت به ۳، سرعت متوسط در همه مدهای ذکر شده کمی کاهش می‌یابد. این نحوه تأثیر پهنتر شدن الکترودها پایینی بر مقدار سرعت ماکزیمم باد یونی تولید شده، مشابه با نتایج دیده شده توسط فورته و همکارانش [۱۶] می‌باشد. این در حالی است که نتایج فورته و همکارانش [۱۶] تنها به اثر پهنای الکترودها پایینی در حالت پلاسما با شرایط پلاسمای دائمی می‌پردازد. شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده توسط عملگر پلاسمایی با نسبت $W_e/W_e = 2$ و فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz را در سیکل‌های کاری مختلف نشان می‌دهد. در این شکل که در مقطع $x=11$ mm ارائه شده است، با افزایش مقدار سیکل کاری، پروفیل سرعت تغییر نموده و سرعت ماکزیمم آن افزایش می‌یابد. این افزایش برای مقادیر سیکل کاری بالاتر از ۵۰٪ تغییر ناچیزی دارد.



شکل ۱۱ سرعت متوسط ایجاد شده با نسبت $W_e/W_e = 3$ و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a

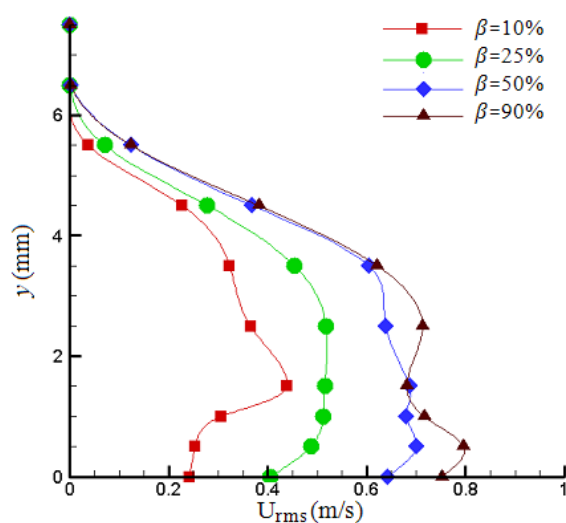


شکل ۱۵ تغییرات سرعت متوسط ماکزیمم بر حسب سیکل کاری در مقطع $x=11\text{mm}$

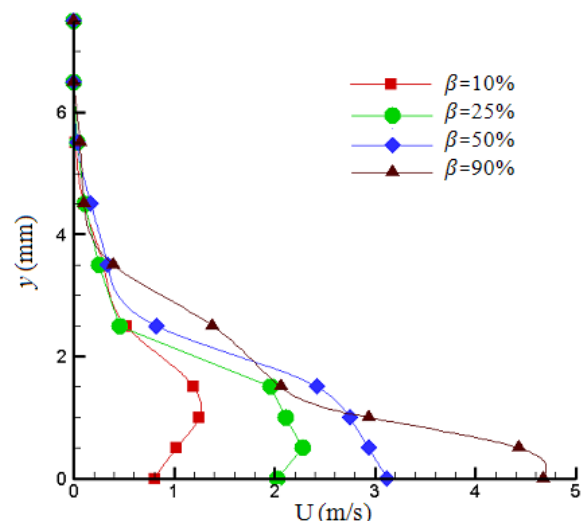


شکل ۱۳ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با $W_e/W_e = 2$ و ۴ لایه کاپتون در مقطع $x=11\text{mm}$ با فرکانس تحریک 300Hz

یکی از شاخصه‌های مهم جریان میزان آشفتگی آن است. با این فرض که جریان دوبعدی است و مقدار نوسانات و مولفه سرعت در جهت y ناچیز است [۱۴]، تنها پارامتر مهم ریشه مجذور متوسط سرعت در جهت غالب جریان است. زیاد بودن این مقدار در جاهایی که اختلاط بیشتر جریان و پایداری بیشتر جریان مدنظر باشد می‌تواند مفید باشد و در بعضی جاها کاهش آن می‌تواند سبب کاهش تنش برشی و ضریب اصطکاک شود، لذا بهینه‌سازی آن به کاربرد این وسیله بستگی پیدا خواهد کرد. پروفیل‌های ریشه مجذور متوسط سرعت در فرکانس‌های تحریک 100Hz ، 300Hz و 500Hz به ترتیب در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ برای سیکل‌های کاری مختلف دیده می‌شود.



شکل ۱۶ ریشه مجذور متوسط سرعت در 100Hz



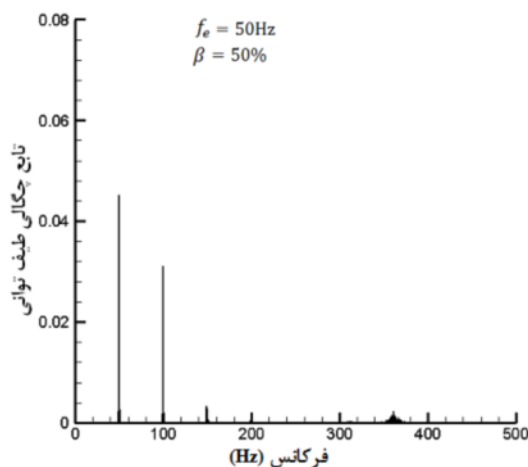
شکل ۱۴ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با $W_e/W_e = 2$ و ۴ لایه کاپتون در مقطع $x=11\text{mm}$ با فرکانس تحریک 500Hz

روند تقریباً خطی افزایش سرعت با افزایش سیکل کاری در هر سه فرکانس تحریک به خوبی دیده می‌شود. همچنین افزایش فرکانس تحریک با افزایش مقدار سرعت ماکزیمم نیز همراه است. این افزایش در سیکل‌های کاری بالاتر خیلی بیشتر از سیکل‌های کاری پایین است، به طوری که به طور نمونه در سیکل‌های کاری ۱۰٪ و ۱۵٪ اختلاف چندانی بین مقادیر سرعت در فرکانس‌های تحریک مختلف دیده نمی‌شود ولی در سیکل‌های کاری ۷۵٪ و ۹۰٪ این اختلاف خیلی زیادتر است.

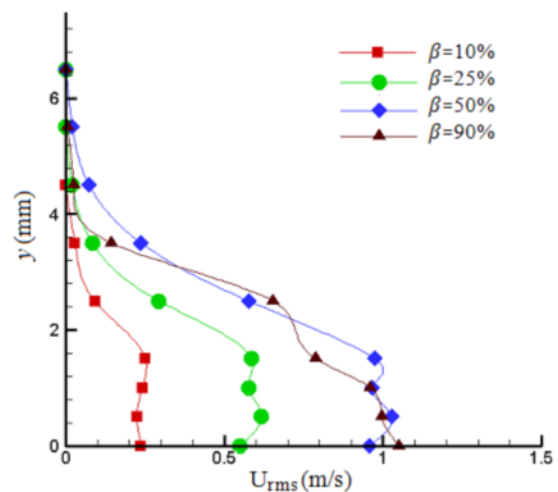
۵- تحلیل فرکانسی ورتکسهای ایجاد شده توسط عملگر پلاسمایی

با توجه به نتایج ارائه شده توسط کورک و همکارانش [۱۰] که به اندازه‌گیری میدان سرعت در فواصل زمانی مختلف به وسیله *PIV* پرداخته‌اند، مشاهده می‌شود که عملگر پلاسمایی باعث ایجاد یک ورتکس می‌شود. با توجه به این مسئله مقادیر سرعت‌های لحظه‌ای جمع آوری شده در همه نقاط در حوزه فرکانسی برده شدند تا اثر این ورتکس در آنجا دیده شود. با توجه به زیاد بودن داده‌ها، تنها اثر فرکانس تحریک و سیکل کاری برای یک عملگر و در یک نقطه ارائه شده است و در تمامی نقاط دیگر اثری مشابه دیده می‌شود.

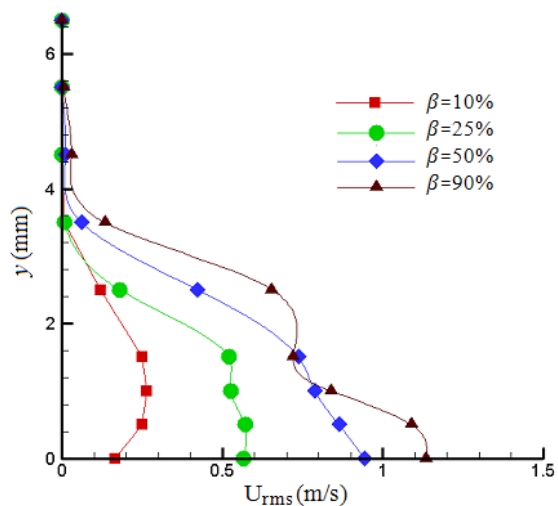
در شکل‌های ۱۹ تا ۲۳ مؤلفه سرعت در حوزه فرکانس در مقطع $x=11\text{mm}$ و موقعیت $y=0$ برای شرایط $\beta=50\%$ و فرکانس‌های تحریک ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ Hz نشان داده شده است. در همه این نمودارها، فرکانس غالب گردابه با مقادیر فرکانس تحریک منبع تغذیه برابری دارد. از طرفی دیگر با افزایش فرکانس تحریک، قدرت گردابه‌های غالب افزایش می‌یابد. این روند افزایش قدرت گردابه‌ها تا فرکانس ۲۰۰ Hz ادامه دارد و در فرکانس‌های بالاتر کاهش می‌یابد. این روند افزایش قدرت گردابه‌ها تا فرکانس ۲۰۰ Hz مشابه با افزایش مصرف انرژی الکتریکی در نمودارهای شکل ۵ می‌باشد. در آن نمودار نیز با افزایش فرکانس تحریک تا ۲۰۰ Hz روند افزایش مصرف انرژی الکتریکی دیده می‌شود.



شکل ۱۹ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = 50\text{Hz}$)



شکل ۱۷ ریشه مجذور متوسط سرعت در ۳۰۰ Hz



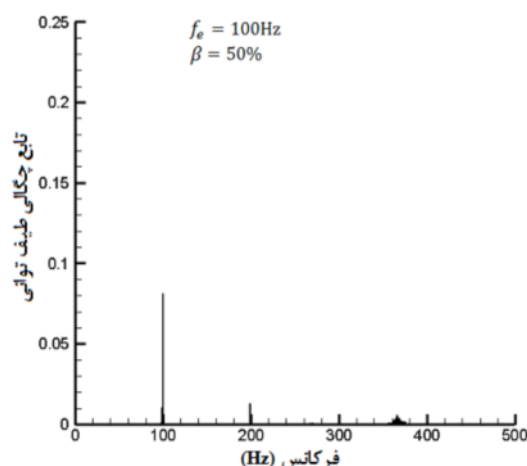
شکل ۱۸ ریشه مجذور متوسط سرعت در ۵۰۰ Hz

مقدار ماکزیمم ریشه مجذور متوسط سرعت در این نمودارها با افزایش سیکل کاری افزایش می‌یابد ولی افزایش فرکانس تحریک تأثیر زیادی بر مقادیر ریشه مجذور متوسط سرعت ندارد. ریشه مجذور متوسط سرعت از رابطه ۲ با استفاده از سرعت‌های لحظه‌ای محاسبه می‌شود. در این رابطه U_i سرعت لحظه‌ای، U_{mean} سرعت متوسط داده‌ها و N تعداد داده‌ها در هر نقطه می‌باشد که در اینجا $N=16000$ است. موقعیت مکانی ماکزیمم ریشه مجذور متوسط سرعت در هر مقطع با افزایش مقدار سیکل کاری به سطح نزدیکتر می‌شود.

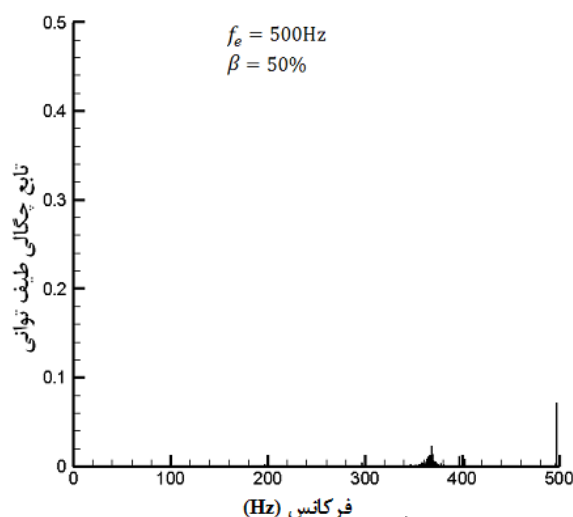
$$u_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{mean})^2 \right)^{0.5} \quad (2)$$

اثر تغییر سیکل کاری نیز بر روی فرکانس گردابه‌ها در فرکانس تحریک 100Hz در نمودارهای ۲۴ تا ۲۷ تحقیق شده است. فرکانس ریزش گردابه‌ها در همه این نمودارها برابر با فرکانس تحریک ولتاژ اعمالی ($f_e = 100\text{Hz}$) است. با افزایش مقدار درصد سیکل کاری قدرت گردابه‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش قدرت گردابه با توجه به نمودارهای شکل‌های ۵ و ۱۰ همراه با افزایش مصرف انرژی و افزایش سرعت باد یونی تولید شده می‌باشد.

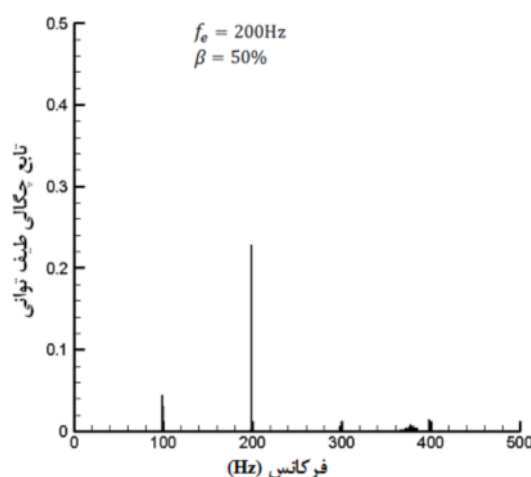
در شکل ۲۸ نمونه ای از سری زمانی سرعت اندازه‌گیری شده در موقعیت a و با شرایط $f_e = 100\text{Hz}$ و $\beta = 75\%$ آورده شده است.



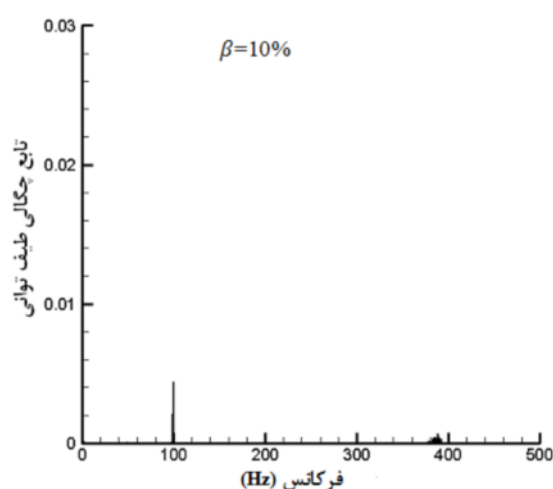
شکل ۲۰ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = 100\text{Hz}$)



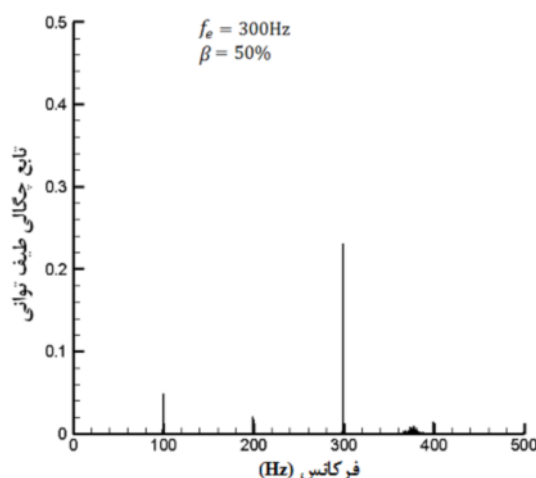
شکل ۲۳ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = 500\text{Hz}$)



شکل ۲۱ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = 200\text{Hz}$)



شکل ۲۴ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta = 10\%$)



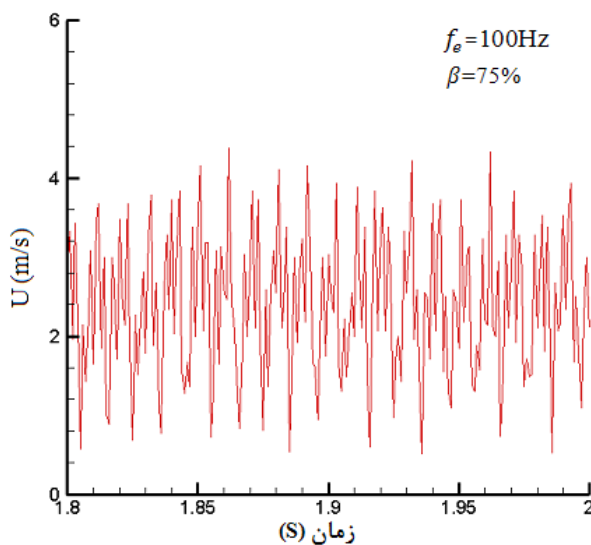
شکل ۲۲ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = 300\text{Hz}$)

نوسان سرعت به طور لحظه‌ای، که یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در کارایی بهتر عملکرد در کنترل جریان روی سطوح آیرودینامیکی می‌باشد، به خوبی در شکل ۲۸ دیده می‌شود.

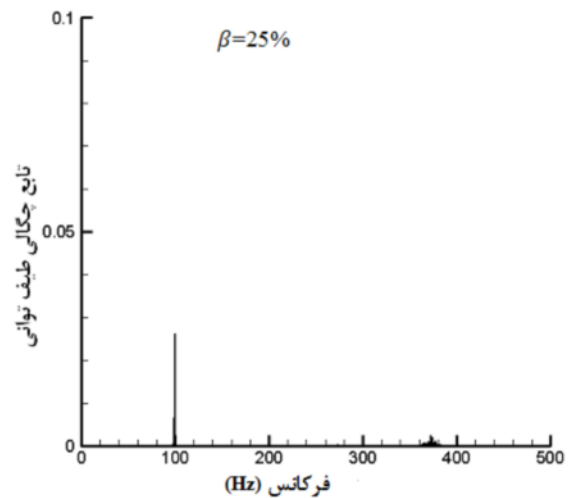
۶- تأثیر فرکانس‌های تحریک و موج و ضخامت دی‌الکتریک بر روی سرعت باد یونی

در شکل ۲۹ اثر فرکانس موج بر روی سرعت تولید شده توسط عملکرد پلاسمایی با نسبت $W_e/W_e=2$ در موقعیت $a = 75\%$ و $\beta = 25\%$ و ۶ لایه دی‌الکتریک کاپتون در دو فرکانس تحریک ۵۰۰ Hz و ۱۰۰۰ Hz نشان داده شده است. با توجه به این شکل یک نقطه ماکزیمم سرعت در فرکانس موج $f_{AC} = 28 \text{ kHz}$ در هر دو نمودار وجود دارد که با توجه به رنگ پلاسمای تشکیل شده در این حالت نور پلاسما شدیدتر است. این نقطه ماکزیمم سرعت دارای همان شرایط بیشترین میزان یونیزاسیون است که قبلاً در شکل ۷ با توجه به نتایج کانهارت [۱۸] توافق داشت.

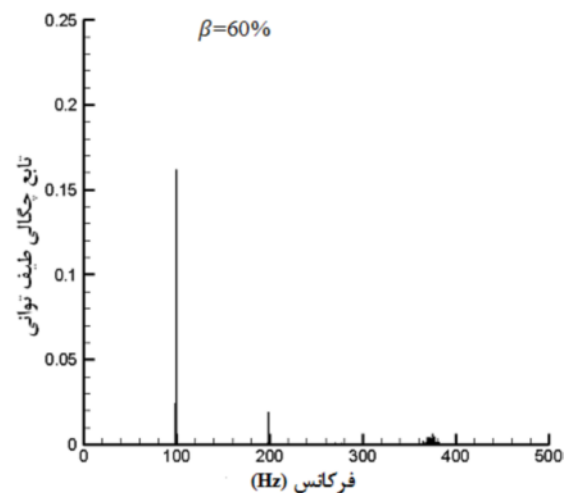
حال باید دید که آیا این نقطه ماکزیمم سرعت تنها در این عملکرد و این شرایط وجود دارد و یا در شرایط دیگر هم دیده می‌شود. لذا در شکل ۳۰ برای عملکرد پلاسمایی با نسبت $W_e/W_e=2$ در موقعیت $a = 75\%$ و ۳ لایه دی‌الکتریک کاپتون، $f_e = 100 \text{ Hz}$ در سه حالت $\beta = 25\%$ ، $\beta = 75\%$ و $\beta = 90\%$ صحت این قضیه بررسی شده است.



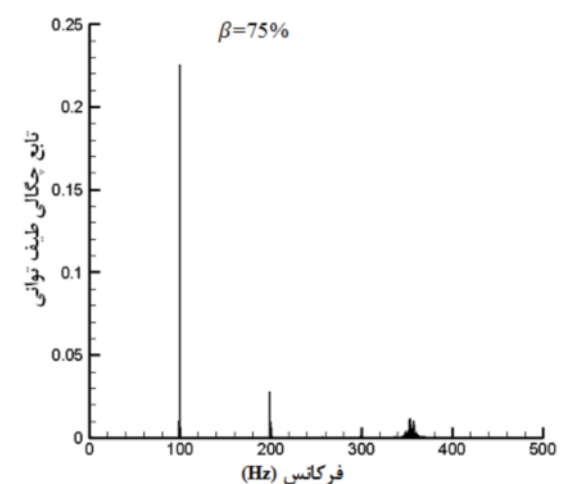
شکل ۲۸ تغییرات لحظه‌ای سرعت زمانی در نقطه a با فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz و $\beta = 75\%$



شکل ۲۵ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta = 25\%$)



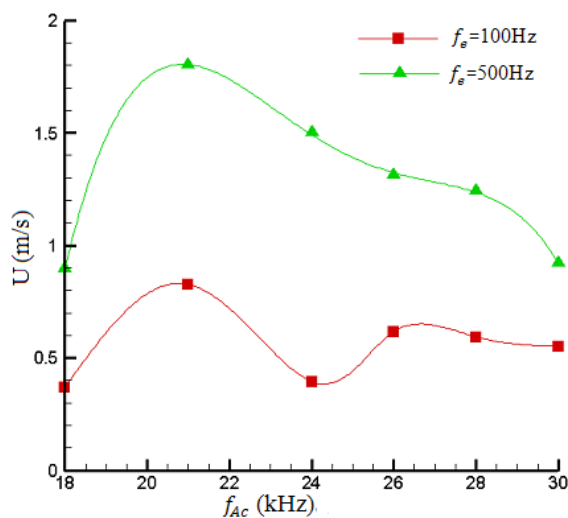
شکل ۲۶ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta = 60\%$)



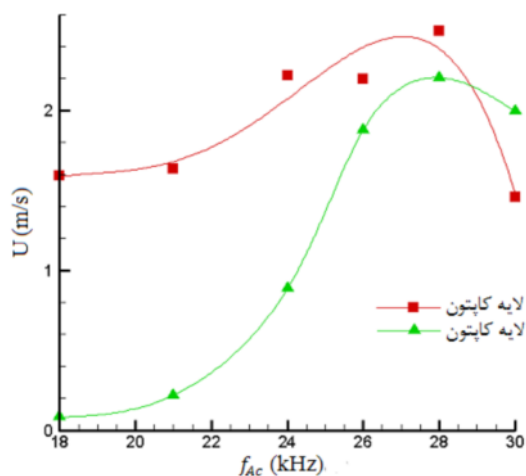
شکل ۲۷ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta = 75\%$)

برای سیکل کاری $\beta = 25\%$ در شکل ۳۱ بررسی شده است. با توجه به شکل ۳۱ همان مقدار فرکانس موج حامل در سرعت ماکزیمم در فرکانس تحریک $f_e = 100\text{Hz}$ برای حالت $f_e = 500\text{Hz}$ دیده می‌شود.

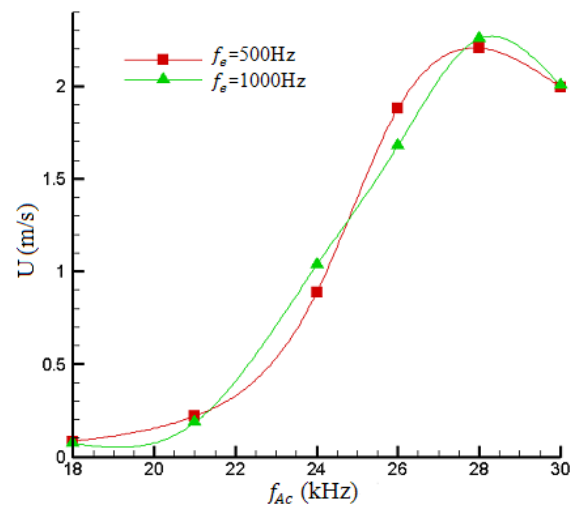
در شکل ۳۲ برای عملگرهای پلاسمایی با نسبت $W_o/W_e = 2$ و در شرایط $f_e = 500\text{Hz}$ و $\beta = 75\%$ اثر فرکانس موج حامل بر روی سرعت تولید شده به همراه ضخامت دی الکتریک در دو حالت ۳ لایه کاپتون و ۶ لایه کاپتون نیز نشان داده شده است.



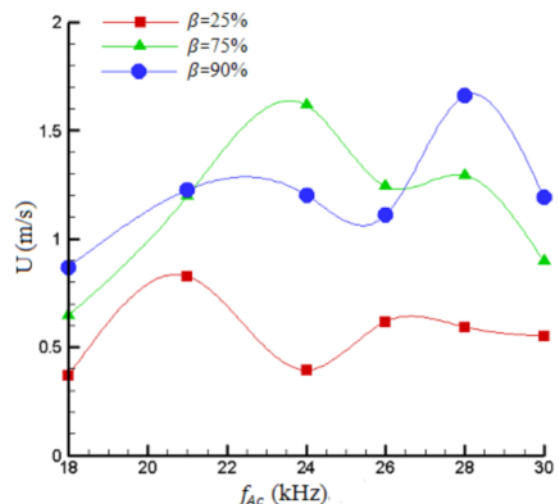
شکل ۳۱ اثر فرکانس موج روی سرعت تولید شده در موقعیت a با $\beta = 25\%$ و ۳ لایه کاپتون و $W_o/W_e = 2$



شکل ۳۲ اثر فرکانس موج سینوسی حامل بر روی سرعت تولید شده توسط عملگر در موقعیت a



شکل ۲۹ اثر فرکانس روی سرعت تولید شده در موقعیت a با $V = 14\text{KV}_{p-p}$, $\beta = 75\%$, $W_o/W_e = 2$ و ۶ لایه کاپتون



شکل ۳۰ اثر فرکانس موج روی سرعت تولید شده در موقعیت a با $f_e = 100\text{Hz}$ و ۳ لایه کاپتون و $W_o/W_e = 2$

با توجه به این شکل در هر سه سیکل کاری یک نقطه ماکزیمم سرعت در یک فرکانس موج حامل خاص دیده می‌شود. با افزایش مقدار سیکل کاری، مقدار فرکانس موج حاملی که سرعت در آن ماکزیمم است، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که برای سیکل‌های کاری $\beta = 25\%$ ، $\beta = 75\%$ و $\beta = 90\%$ نقطه ماکزیمم سرعت تولیدی به ترتیب در فرکانس‌های موج حامل 21kHz ، 24kHz و 28kHz دیده می‌شود.

این مساله همچنین برای همین عملگر با ۳ لایه کاپتون در دو فرکانس تحریک متفاوت $f_e = 100\text{Hz}$ و $f_e = 500\text{Hz}$

و در سیکل‌های کاری بالاتر به علت تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین بررسی پروفیل‌های سرعت در سیکل‌های کاری مختلف و فرکانس‌های تحریک مختلف نشان می‌دهد که عملگر پلاسمایی تا فاصله ماکزیمم ۶/۴mm می‌تواند روی محیط اطراف تأثیرگذار باشد.

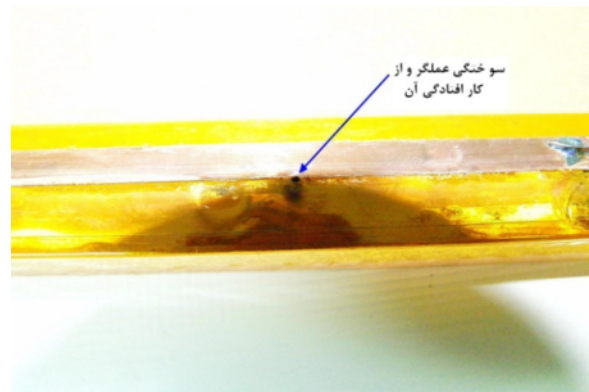
تحلیل فرکانسی داده‌های لحظه‌ای سرعت ایجاد شده توسط عملگر پلاسمایی نشان داد که این عملگر ورتکسی با فرکانس غالب برابر فرکانس تحریک منبع تغذیه ایجاد می‌نماید. افزایش سیکل کاری نیز سبب افزایش قدرت سیکل کاری می‌شود. تأثیر افزایش سیکل کاری بر افزایش ریشه مجذور متوسط سرعت نیز در آزمایشات دیده شد. علاوه بر این می‌توان گفت که موقعیت نقاط ماکزیمم سرعت و ماکزیمم مجذور متوسط سرعت نیز با افزایش سیکل کاری به سطح عملگر نزدیکتر می‌شود که این می‌تواند عامل افزایش ضریب اصطکاک شود. در بررسی‌های انجام شده بر روی سرعت متوسط تولید شده توسط عملگر پلاسمایی در سیکل‌های کاری مختلف و ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک یک فرکانس موج بهینه مشاهده شد که در آن فرکانس، سرعت ماکزیمم است. مقدار این فرکانس موج بهینه در سیکل‌های کاری ۲۵٪ تا ۹۰٪ از مقادیر ۲۱kHz تا ۲۸kHz زیاد می‌شود. فرکانس تحریک و ضخامت تعداد لایه‌های دی‌الکتریک کاپتون تأثیری بر این فرکانس بهینه نداشته ولی روی پایداری پلاسما و سرعت ماکزیمم تولید شده تأثیرگذار است. به طوری که در عملگر پلاسمایی با ضخامت ۳ لایه کاپتون سرعت بیشتری نسبت به ۶ لایه کاپتون تولید می‌شود ولی پلاسما در حالت ۶ لایه پایداری بیشتری دارد و احتمال سوختن عملگر و تشکیل قوس کمتر خواهد شد.

۸- 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 نمایند.

۹- مراجع

- [1] Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P., "Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", *AIAA Meeting (Reno, USA, January 1998)*, paper #98-0328.



شکل ۳۳ نمونه ای از سوختگی و آسیب دیدگی یک عملگر پلاسمایی

با توجه به این شکل با کاهش ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک میزان حساسیت به فرکانس موج حامل در عملگر کم می‌شود و همچنین سرعت ماکزیمم در حالت ۳ لایه کمی بیشتر شده است. ضمن اینکه مقدار فرکانس موج حامل که در آن سرعت ماکزیمم است در هر دو عملگر دارای مقدار ثابتی است. در فرکانس‌های کمتر از شرایط سرعت ماکزیمم، عملگر با ضخامت دی‌الکتریک کمتر سرعت بیشتری تولید می‌کند. در مقایسه با نمودارهای شکل ۱۰ عملگر با ۴ لایه بیشترین سرعت تولیدی را دارد. کم شدن لایه‌ها می‌تواند سبب آسیب و سوختگی عملگر پلاسمایی شود که یک نمونه از آن در شکل ۳۳ نشان داده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

عملکرد عملگر پلاسمایی *DBD* برای افزایش سرعت باد یونی و همچنین شناخت مشخصه‌های دیگر جریان تولید شده مانند آشفته‌گی و فرکانس گردابه‌های ریزش شده، تحت شرایط هندسی و الکتریکی مختلف در شرایط آزمایشگاهی تحقیق شد. این آزمایش‌ها در شرایط محیط ساکن و فشار اتمسفریک و با اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای توسط سیم داغ انجام شد. برای عملگرهای آزمایش شده با نسبت‌های $W_e/W_e=1$ ، $W_e/W_e=2$ و $W_e/W_e=3$ بیشترین سرعت تولیدی توسط عملگر با شرایط $W_e/W_e=2$ حاصل شد. در تمامی این عملگرها رفتار تقریباً خطی افزایش سرعت ماکزیمم با افزایش مقدار سیکل کاری مشاهده شد. افزایش فرکانس تحریک نیز تا فرکانس ۵۰۰Hz سبب افزایش سرعت متوسط می‌شود. برای مقادیر بیشتر از این فرکانس تحریک، سرعت در سیکل‌های کاری پایین تقریباً ثابت

- [12] 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 Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 3, 2004, pp. 589–594.
- [13] Porter C.O., Baughn J.W., McLaughlin T.E., Enloe C.L., Font G.I., "Plasma actuator force measurements", *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 7, 2007, pp. 1562–1570.
- [14] Grundmann S., Tropea C., "Experimental damping of boundary-layer oscillations using DBD plasma actuators", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, Issue 3, June 2009, pp. 394–402.
- [15] Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P., "Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma", *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, 2000, pp. 1166–1172.
- [16] 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, No. 6, 2007, pp. 917–928.
- [17] Post M.L., Corke T.C., "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators", *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 11, 2004, pp. 2177–2184.
- [18] Kunhardt E.E., "Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 28, No. 1, Feb. 2000, pp. 189–200.
- [19] Li Y., Zhang X., Huang X., "The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control", *Exp. Fluids*, Vol. 49, No. 2, 2010, pp. 367–77.
- [20] Grundmann S., Klumpp S., Tropea C., "Experimental and Numerical Investigations of Boundary-Layer Influence Using Plasma Actuators", *Active Flow Control*, edited by King R., Springer-Verlag, Berlin, 2007, pp. 56–68.
- [2] Roth J.R., "Electrohydrodynamically induced airflow in a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma", *25th IEEE Int. Conf. Plasma Science (Raleigh, USA)*, 1998.
- [3] Benard N., Jolibois J., Moreau E., "Lift and drag performances of an axisymmetric airfoil controlled by plasma actuator", *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, Issues 2-3, 2009, pp. 133–139.
- [4] Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M., "SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization and applications", *J. Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 43, Issues 7-8, 2007, pp. 193–217.
- [5] Sung Y., Kim W., Mungal M.G., Cappelli M.A., "Aerodynamic modification of flow over bluff objects by plasma actuation", *Experiments in Fluids*, Vol. 41, No. 3, 2006, pp. 479–486.
- [6] Thomas F.O., Kozlov A., Corke T.C., "Plasma Actuators for Bluff Body Flow Control", *AIAA Paper*, 2006-2845, 2006.
- [7] Li Y., Zhang X., Huang X., "The use of plasma actuators for bluff body broadband noise control", *Exp. Fluids*, Vol. 49, No. 2, 2010, pp. 367–377.
- [8] Grundmann S., Tropea C., "Active cancellation of artificially introduced Tollmien-Schlichting waves using plasma actuators", *Exp. Fluids*, Vol. 44, No. 5, 2008, pp. 795–806.
- [9] Moreau E., "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 3, 2007, pp. 605–636.
- [10] Corke T.C., Post M.L., Orlov D.M., "Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications", *Exp. Fluids*, Vol. 46, No. 1, 2009, pp. 1–26.
- [11] Orlov D.M., Font G.I., Edelstein D., "Characterization of Discharge Modes of Plasma Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 12, December 2008.