http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۵ دی ۱۳۹۱ ص ص ۱۳۲-۱۴۵

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۹/۲۷
پذیرش ۹۱/۵/۲
ارائه در سایت ۹۱/۸/۳۰

مطالعهٔ 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 ولتاژ 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. Shadaram[2], M. Mirzaei[3]

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

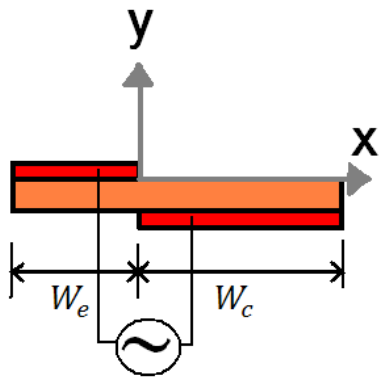
Abstract- This paper deals with experimental measurements of the instantaneous ionic wind velocity induced by Dielectric barrier discharge (*DBD*) plasma actuator in quiescent air at atmospheric pressure. A parametric study has been performed in order to increase the velocity of the ionic wind induced 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 [۴،۳]، کاهش درگ بدنه‌های غیر خط جریانی [۶،۵]، 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 مورآ [۹] و کورک وهمکارانش [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 پلاسما در بخش منفی رو و مثبت رو ولتاژ در یک موج سینوسی با هم تفاوت دارد. ساختار این عکس‌ها دو مد استریمر و گلو را نشان می‌دهد. این تفاوت در ساختار پلاسما 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 پلاسما باعث ایجاد سرعت نوسانی در میکرو جت تولیده شده می‌شود که یکی از جنبه‌های مورد اهمیت کار حاضر، اندازه‌گیری این نوسانات می‌باشد.



شکل ۱ شماتیکی از عملگر پلاسمایی به همراه دستگاه مختصات

اندازه‌گیری نیروهای لحظه‌ای و جهت آنها که توسط پورتر 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 الکتروهیدرودینامیکی تولید شده توسط عملگر پلاسمایی به صورت رابطهٔ (۱) بیان می‌شود.

$$\vec{f_B} = \rho_c \vec{E} \qquad (۱)$$

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 پایین‌دست 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 آشفته را ۲۰۰mm به تعویق بیاندازند. 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.

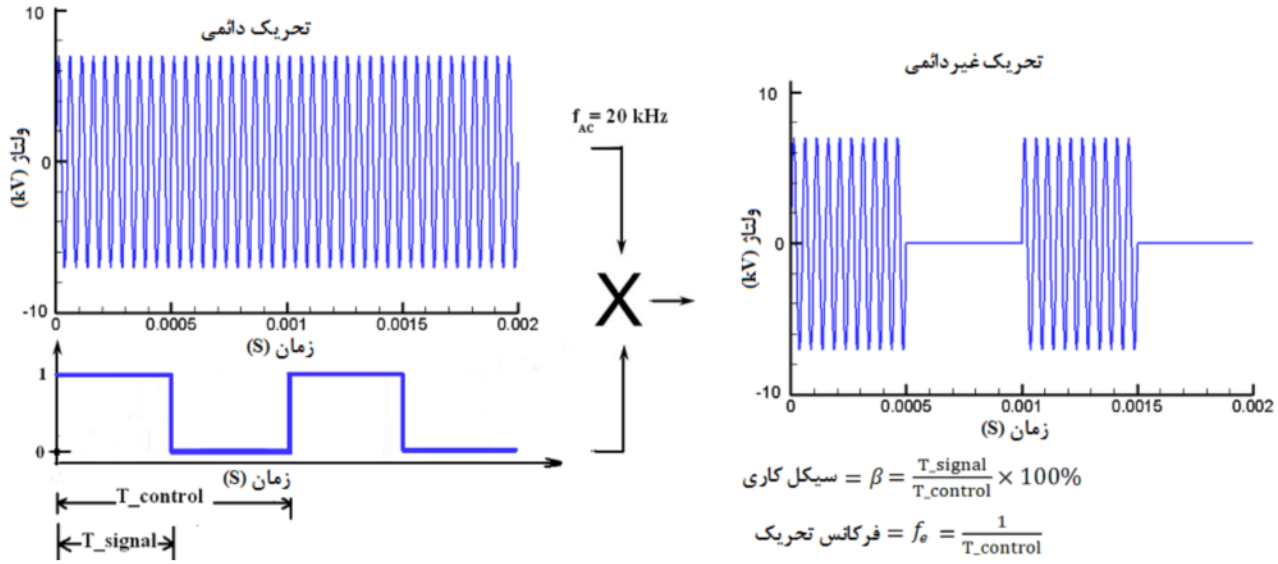
کارایی این نوع عملگر پلاسمایی در کنترل بهینه جریان به پارامترهای زیادی مانند مشخصات هندسی و جنس الکترودها و دی‌الکتریک، ولتاژ اعمالی، شکل موج ولتاژ، فرکانس‌های امواج انتقالی و تحریک، سیکل کاری و غیره بستگی دارد. با توجه به پارامترهای متعدد تأثیرگذار در عملکرد یک عملگر پلاسمایی، بهینه‌سازی آن کار نسبتاً 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

فرکانس موج حامل در بازهٔ ۱۰۰Hz تا ۲kHz 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 می‌کند. همچنین اثرات سرعت القایی لحظه‌ای توسط پلاسما در محیط ساکن در فرکانس‌های بالاتر موج (تا ۳۰kHz) در کار حاضر تحقیق می‌شود. در این تحقیق مشخصه‌های سرعت غیردائمی تولید شده توسط عملگرهای پلاسمایی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. نتایج خروجی این مقاله می‌تواند به مدل‌سازی بهتر عملگر پلاسمایی در شرایط تحریک غیر دائمی کمک کند که در کارهای آینده نتایج این مدل‌سازی عددی نیز ارئه خواهد شد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات مربوط به تخلیه الکتریکی شامل دو الکترود به شکل فویلهای مسی صاف به طول ۳۰cm در راستای منظر و ضخامت ۵۰μm می‌باشد. عملگرها برای انجام آزمایش روی یک صفحه مسطح از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۱۵mm نصب شده است. الکترودهای در معرض هوا به یک منبع ولتاژ *Ac* با شکل ولتاژ سینوسی و الکترودهای پوشیده شده با دی‌الکتریک به زمین وصل می‌شوند. در کار حاضر از ماده دی‌الکتریک کاپتون به شکل نوارچسب استفاده شده است. خروجی منبع تغذیه با توان ۲۵۰W طوری طراحی شده است تا فرکانس بین ۱ تا ۳۰kHz ، ولتاژ قابل تنظیم از ۱ تا ۲۰kV_{p-p} فرکانس تحریک از ۱۰ تا ۲۰۰۰Hz و سیکل کاری متغیر از ۲ تا ۹۷٪ 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 امکان‌پذیر است. وقتی عملگر روشن شود، پلاسما در لبه مشترک دو الکترود تشکیل می‌شود و با پیشروی به طرف الکترود پوشانده شده شدت آن کاهش می‌یابد. شکل۲ نحوه تحریک غیردائمی در ولتاژ ۱۴kV_{p-p} سیکل کاری ۵۰٪ و نحوه مدولاسیون آن را برای یک موج سینوسی به طور شماتیک نشان می‌دهد. مفهوم سیکل کاری و فرکانس تحریک در این شکل نیز مشخص شده است.

برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای باد یونی القایی توسط عملگر پلاسمایی از سرعت سنجی توسط سیم داغ استفاده شد. سرعت‌های متوسط و لحظه‌ای در جهت غالب توسط پراب یک بعدی نوع 55*P*11 شرکت دانتک اندازه‌گیری شد. پراب در برابر کالیبراتور در سرعت‌های ۰/۵ تا ۱۲ متر بر ثانیه کالیبره شد و ماکزیمم خطای کالیبراسیون حدود ۲٪ بود. برای جابجایی پراب از یک تراورس با دقت ۰/۰۱mm استفاده شد. داده‌برداریها در فرکانس‌های ۱kHz و ۲kHz و در مقطعی به فاصله x=۱۱mm از لبه مشترک بین دو الکترود انجام شد.

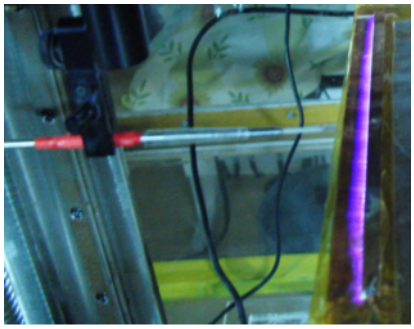


شکل ۲ شماتیکی از تحریک دائمی و غیر دائمی و نحوه مدولاسیون برای یک موج سینوسی

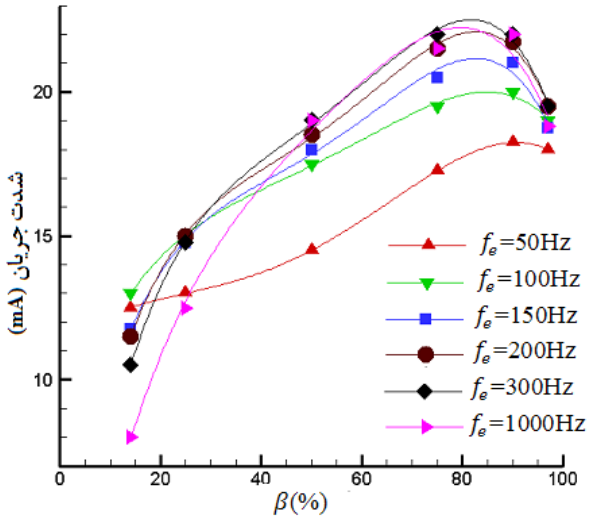
شکل ۳ تصویری از اندازه‌گیری سرعت القایی در محیط ساکن و نحوه قرارگیری پراب سیم داغ را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی متوسط از مولتی متر عقربه‌ای ساخت شرکت کیوریتسو مدل ۱۱۰۹ استفاده شد. یک مقاومت ۱۰۰۰ اهمی در سر راه جریان قرار دارد که با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر این مقاومت، مقدار جریان قابل محاسبه است. خطای اندازه‌گیری در مقادیر شدت جریان اندازه‌گیری شده ۳٪± 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 پلاسما در محیط ساکن



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

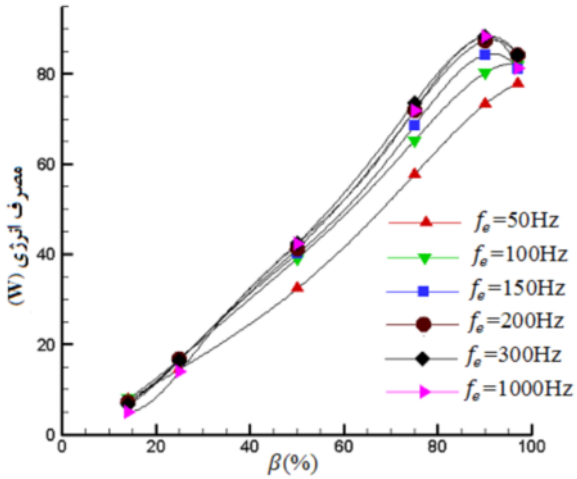
این نمودارها برای عملگر پلاسمایی با نسبت W_c/W_e= ۳ $\frac{W_c}{W_e}=$ ۳ ضخامت ۴ لایه نوار کاپتون و طول الکترودهای ۳۰cm رسم شده‌اند. فرکانس موج ولتاژ در همه این نمودارها ۲۸kHz می‌باشد. با توجه به این شکل، با افزایش مقدار سیکل کاری تا حوالی ۸۰٪ الی ۹۰٪ ، شدت جریان الکتریکی افزایش یافته و بعد از آن به 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 (۱۴٪) مقدار شدت جریان برای فرکانس ۱۰۰۰Hz 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 ۵۰Hz 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 مجددا در سیکل‌های کاری بالاتر از ۸۰٪ کاهش می‌یابد. علت این کاهش مقدار شدت جریان در سیکل‌های کاری بالا با توجه به کافی بودن توان 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 ۵۰Hz و ۱۰۰Hz که اختلاف زیادی با مقادیر ماکزیمم شدت جریان در نمودارهای دیگر وجود دارد، نباید این کاهش شدت جریان مشاهده می‌شد. تنها عامل این کاهش تشکیل رشته‌های قوس الکتریکی می‌باشد.

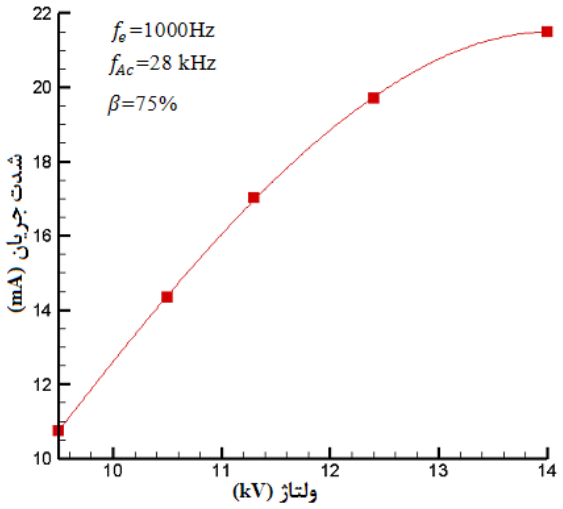
نمودار تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با درصد سیکل کاری بر اساس فرکانس‌های تحریک مختلف در شکل ۵ رسم شده است. این نمودارها با توجه به مقادیر نمودار شکل۴ آورده شده است. در این نمودار، افزایش مصرف انرژی بر حسب سیکل کاری تا حوالی ۹۰٪، رابطه‌ای خطی دارد. همچنین افزایش فرکانس تحریک تا حوالی ۲۰۰Hz باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود و برای مقادیر بالاتر از این فرکانس تحریک، مصرف انرژی تقریباً ثابت می‌ماند. با توجه به کمتر بودن توان مصرفی ماکزیمم از توان منبع تغذیه و کاهش کم در مقادیر توان مصرفی در بالای سیکل کاری ۹۰٪ ، می‌توان این محدوده را شروع رشته‌های قوس الکتریکی دانست.

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.

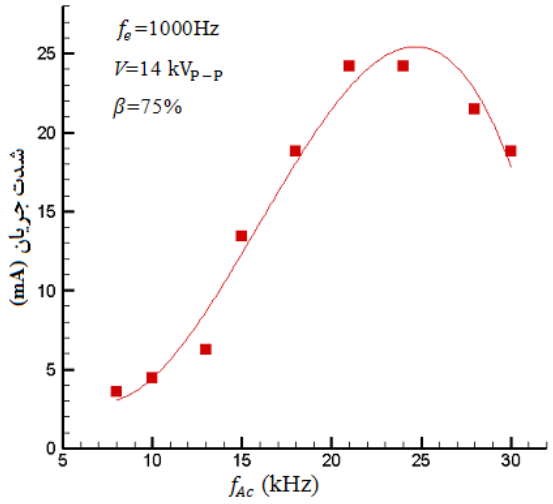


شکل ۵ تأثیر میزان سیکل کاری بر مصرف انرژی الکتریکی در فرکانس‌های تحریک مختلف

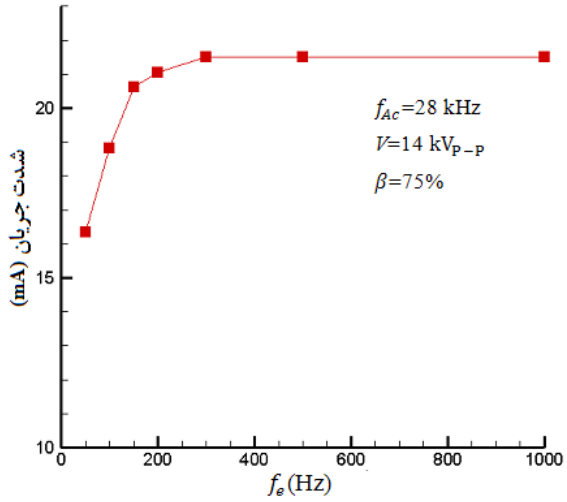


شکل ۶ تغییرات ولتاژ بر حسب جریان در عملگر پلاسمایی

در فرکانس‌های تحریک بالاتر از ۳۰۰Hz ، شدت جریان به مقدار ثابتی می‌رسد و در فرکانس‌های پایین تر 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



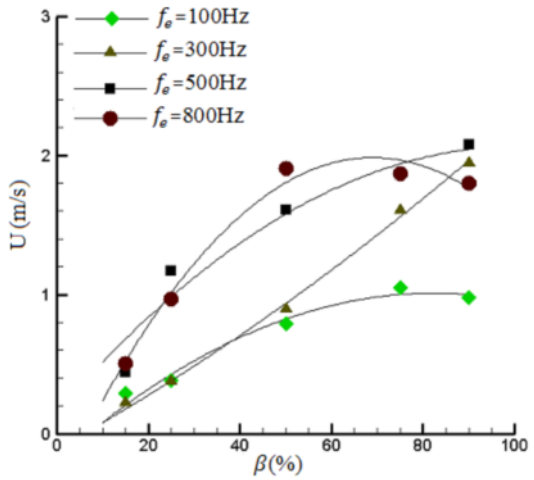
شکل ۸ اثر فرکانس تحریک بر شدت جریان متوسط

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 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 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.

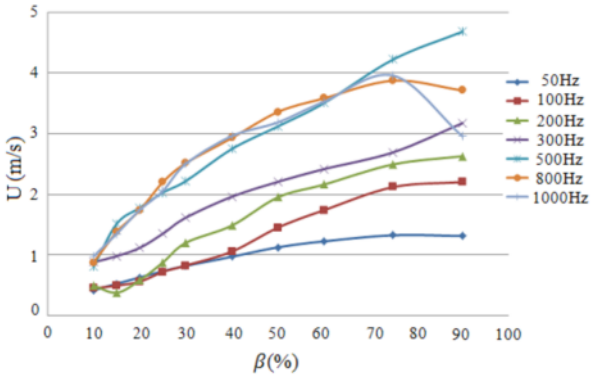
۴- اندازه‌گیری سرعت متوسط باد یونی تولید شده در محیط هوای ساکن

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 الکترودهای 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 الکترود پایینی عملگرهای پلاسمایی با نسبتهای W_d/W_e= ۱، W_d/W_e= ۲، و W_d/W_e= ۳ بررسی شد. در هر یک از این ۳ عملگر مقادیر پهنای الکترود پایینی در هر حالت ۱۰mm و ضخامت دی‌الکتریک با ۴ لایه از جنس کاپتون به ضخامت هر لایه ۵۰μm ثابت نگاه داشته شد. در شکل ۹ مقادیر سرعت متوسط در موقعیت a با مختصات x=۱۱mm و y=۰ بر اساس شکل ۱ برای نسبت W_d/W_e= ۱ 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_d/W_e= ۲ برای فرکانس‌های تحریک مختلف ارائه شده است. در این شکل، پهنای الکترود پوشیده شده در مقایسه با شکل ۹ ثابت نگاه داشته شده و تنها پهنای الکترود در معرض جریان به نصف کاهش یافته است.



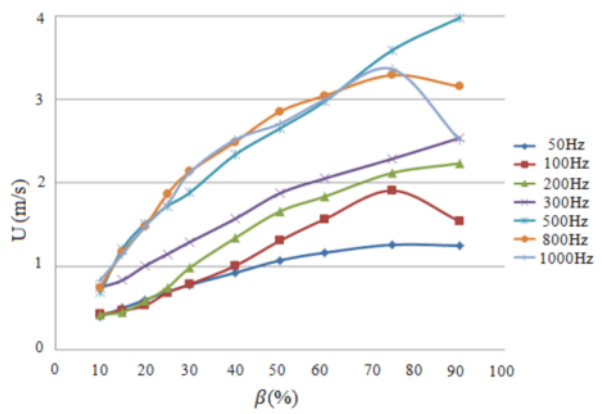
شکل ۹ سرعت متوسط ایجاد شده با W_d/W_e= ۱ و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a



شکل ۱۰ سرعت متوسط ایجاد شده با W_d/W_e= ۲ و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a

نتایج شکل ۱۰ در موقعیت a رسم شده است. مشابه با شکل ۹ افزایش فرکانس تحریک تا یک حد آستانه (۵۰۰Hz) 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 ۵۰۰Hz، 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 الکترود 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 الکترود 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 الکترود پایینی در حالت پلاسما با شرایط پلاسمای دائمی می‌پردازد. شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده توسط عملگر پلاسمایی با نسبت ۲ =W_c/W_e و فرکانس تحریک ۱۰۰Hz را در سیکل‌های کاری مختلف نشان می‌دهد.

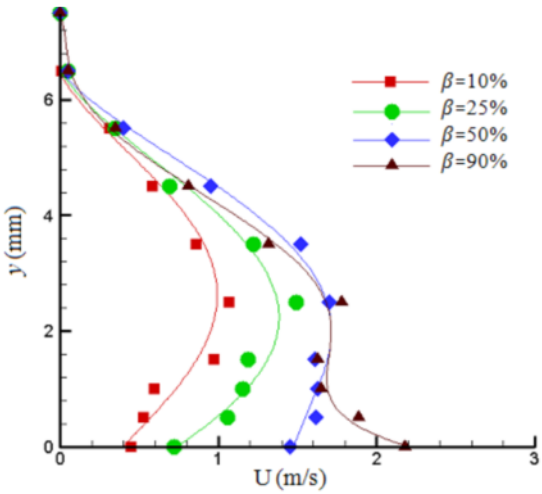
در این شکل که در مقطع x=۱۱mm ارائه شده است، با افزایش مقدار سیکل کاری، پروفیل سرعت تغییر نموده و سرعت ماکزیمم آن افزایش می‌یابد. این افزایش برای مقادیر سیکل کاری بالاتر از ۵۰٪ تغییر ناچیزی دارد.



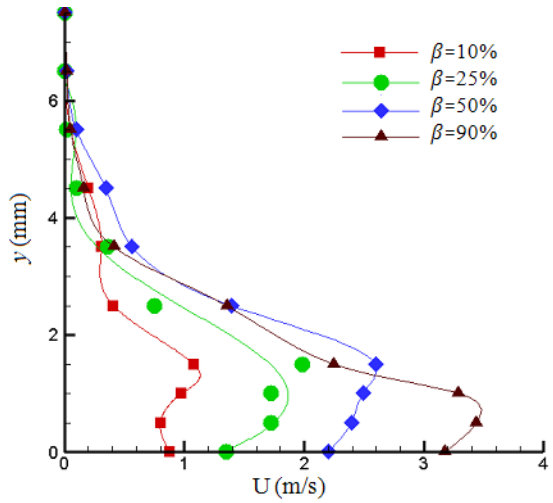
شکل ۱۱ سرعت متوسط ایجاد شده با نسبت ۳ =W_c/W_e و ۴ لایه کاپتون در موقعیت a

این پروفیل‌های سرعت برای فرکانس‌های تحریک ۳۰۰Hz و ۵۰۰Hz 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 ۳۰۰Hz و ۵۰۰Hz نسبت به فرکانس تحریک ۱۰۰ Hz دیده می‌شود. افزایش فرکانس تحریک و سیکل کاری باعث تغییر یافتن مکان سرعت ماکزیمم به موقعیت با y کمتر می‌شود. از مقایسهٔ 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 ۵mm تا ۶/۴mm متغیر است که به مقادیر ارائه شده توسط فورته و همکارانش [۱۶] و لی و همکارانش [۱۹] نزدیک است.

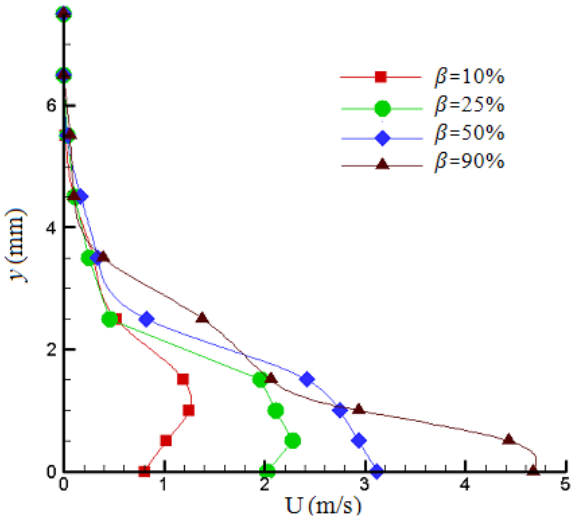
نزدیک شدن محل سرعت ماکزیمم به نزدیک سطح و افزایش آن در اثر افزایش فرکانس تحریک یا مقدار سیکل کاری می‌تواند خطر افزایش تنش برشی و میزان درگ اصطکاکی را به همراه داشته باشد. لذا تنها زیادتر بودن سرعت متوسط نمی‌تواند دلیل بر بالاتر بودن کارایی عملگر باشد. این افزایش اصطکاک تحت تأثیر حضور عملگر پلاسمایی، 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، ۳۰۰Hz و ۵۰۰Hz نشان داده شده است.



شکل ۱۲ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با ۲ =W_c/W_e و ۴ لایه کاپتون در مقطع x=۱۱mm با فرکانس تحریک ۱۰۰Hz

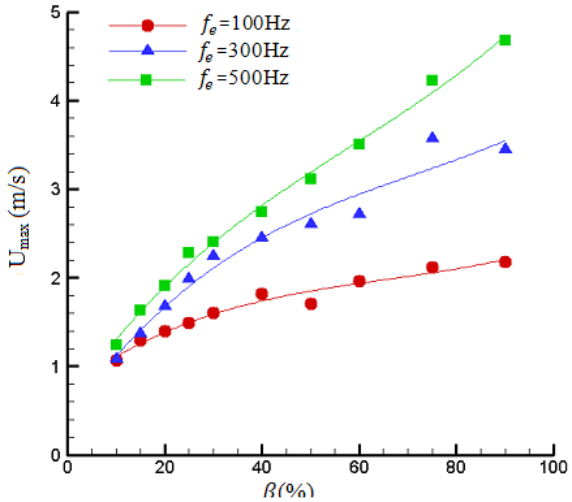


شکل ۱۳ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با W_c/W_e= ۲ و ۴ لایه کاپتون در مقطع x=۱۱mm با فرکانس تحریک ۳۰۰Hz



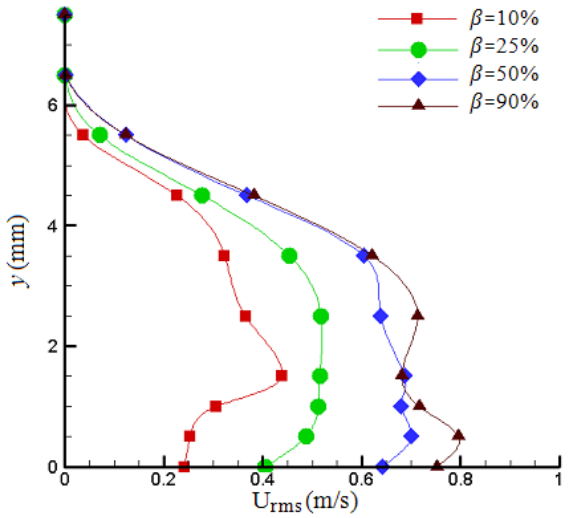
شکل ۱۴ پروفیل‌های سرعت متوسط تولید شده با W_c/W_e= ۲ و ۴ لایه کاپتون در مقطع x=۱۱mm با فرکانس تحریک ۵۰۰Hz

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.

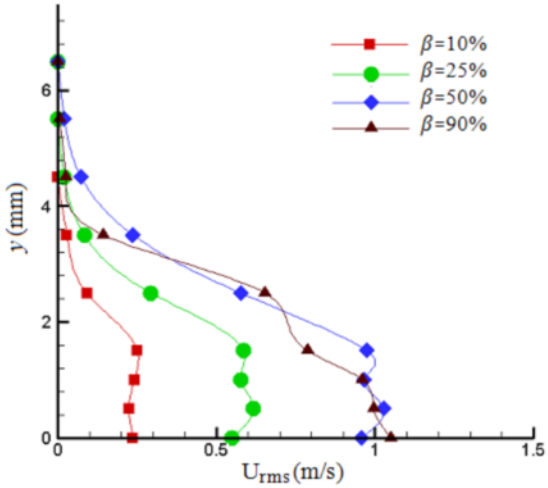


شکل ۱۵ تغییرات سرعت متوسط ماکزیمم بر حسب سیکل کاری در مقطع x=۱۱mm

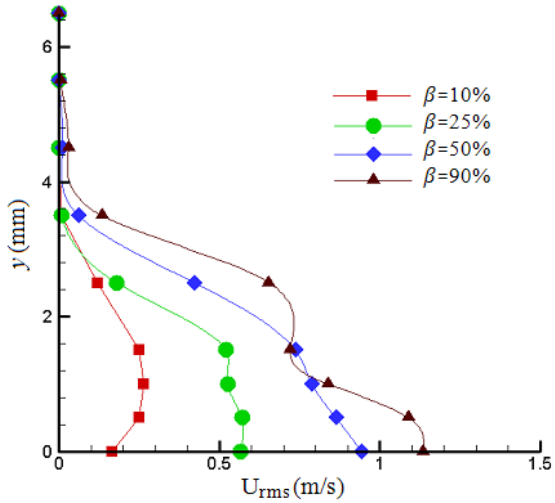
یکی از شاخصه‌های مهم جریان میزان آشفتگی آن است. با این فرض که جریان دوبعدی است و مقدار نوسانات و مولفه سرعت در جهت y ناچیز است[۱۴]، تنها پارامتر مهم ریشه مجذور متوسط سرعت در جهت غالب جریان است. زیاد بودن این مقدار در جاهایی که اختلاط بیشتر جریان و پایداری بیشتر جریان مدنظر باشد می‌تواند مفید باشد و در 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 ۱۰۰Hz، ۳۰۰Hz و ۵۰۰Hz به ترتیب در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ برای سیکل‌های کاری مختلف دیده می‌شود.



شکل ۱۶ ریشه مجذور متوسط سرعت در ۱۰۰Hz



شکل ۱۷ ریشه مجذور متوسط سرعت در ۳۰۰Hz



شکل ۱۸ ریشه مجذور متوسط سرعت در ۵۰۰Hz

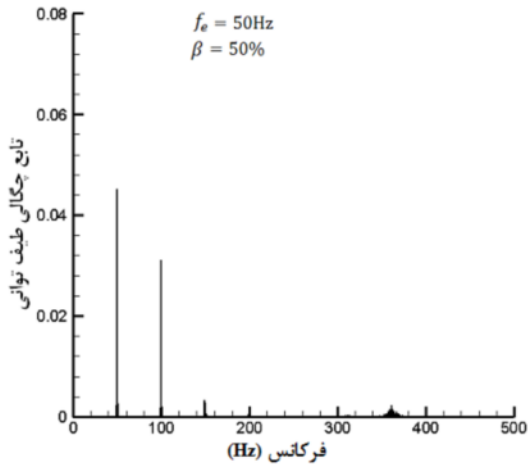
مقدار ماکزیمم ریشه مجذور متوسط سرعت در این نمودارها با افزایش سیکل کاری افزایش می‌یابد ولی افزایش فرکانس تحریک تأثیر زیادی بر مقادیر ریشه مجذور متوسط سرعت ندارد. ریشه مجذور متوسط سرعت از رابطه ۲ با استفاده از سرعت‌های لحظه‌ای محاسبه می‌شود. در این رابطه U_i سرعت لحظه‌ای ، U_{mean} سرعت متوسط داده‌ها و N تعداد داده‌ها در هر نقطه می‌باشد که در اینجا N=۱۶۰۰۰ است. موقعیت مکانی ماکزیمم ریشه مجذور متوسط سرعت در هر مقطع با افزایش مقدار سیکل کاری به سطح نزدیکتر می‌شود.

$$u_{\mathrm{rms}} = \left(\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(U_i - U_{mean})^2\right)^{0.5} \qquad (۲)$$

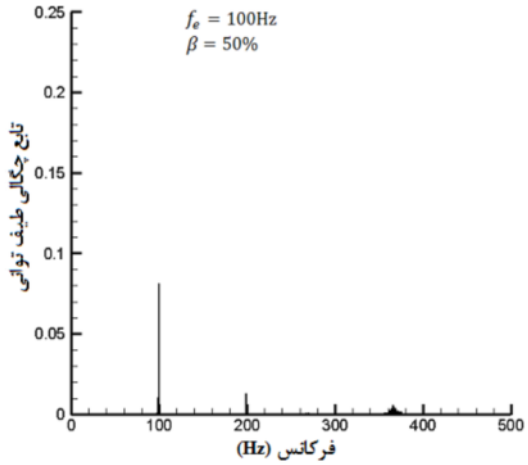
۵- تحلیل فرکانسی ورتکسهای ایجاد شده توسط عملگر پلاسمایی

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.

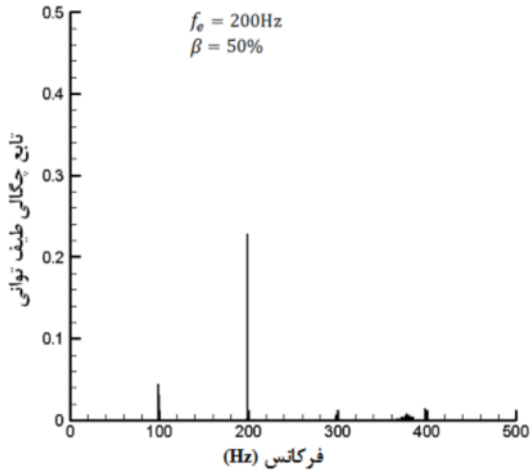
در شکل‌های ۱۹ تا ۲۳ مؤلفهٔ سرعت در حوزه فرکانس در مقطع x=۱۱mm و موقعیت $y = ۰$ برای شرایط $\beta = ٪۵۰$ و فرکانس‌های تحریک ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰Hz نشان داده شده است. در همه این نمودارها، فرکانس غالب گردابه با مقادیر فرکانس تحریک منبع تغذیه برابری دارد. از طرفی دیگر با افزایش فرکانس تحریک، قدرت گردابه‌های غالب افزایش می‌یابد. این روند افزایش قدرت گردابه‌ها تا فرکانس ۲۰۰Hz ادامه دارد و در فرکانس‌های بالاتر کاهش می‌یابد. این روند افزایش قدرت گردابه‌ها تا فرکانس ۲۰۰Hz مشابه با افزایش مصرف انرژی الکتریکی در نمودارهای شکل ۵ می‌باشد. در آن نمودار نیز با افزایش فرکانس تحریک تا ۲۰۰Hz روند افزایش مصرف انرژی الکتریکی دیده می‌شود.



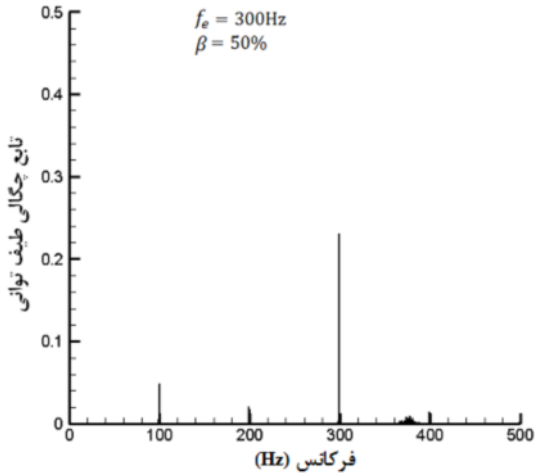
شکل ۱۹ سرعت در حوزه فرکانس (f_e = ۵۰Hz)



شکل ۲۰ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = ۱۰۰\text{Hz}$)



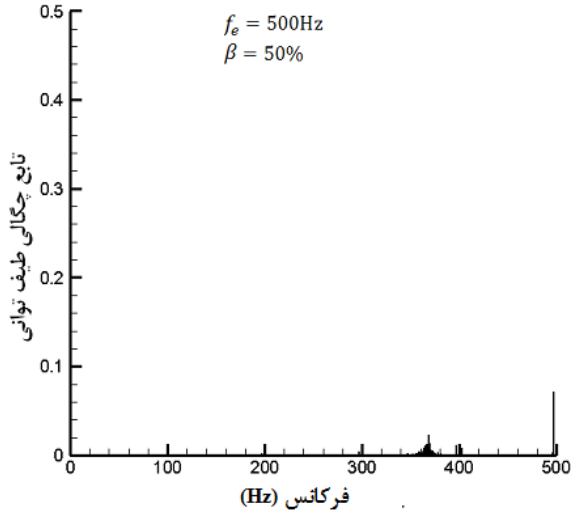
شکل ۲۱ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = ۲۰۰\text{Hz}$)



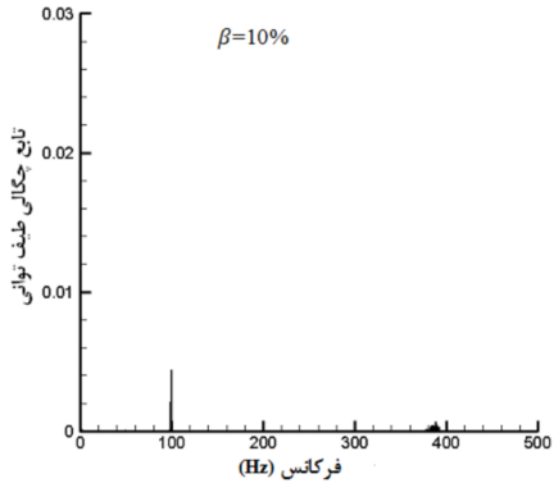
شکل ۲۲ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = ۳۰۰\text{Hz}$)

اثر تغییر سیکل کاری نیز بر روی فرکانس گردابه‌ها در فرکانس تحریک ۱۰۰Hz در نمودارهای ۲۴ تا ۲۷ تحقیق شده است. فرکانس ریزش گردابه‌ها در همه این نمودارها برابر با فرکانس تحریک ولتاژ اعمالی ($f_e = ۱۰۰\text{Hz}$) 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.

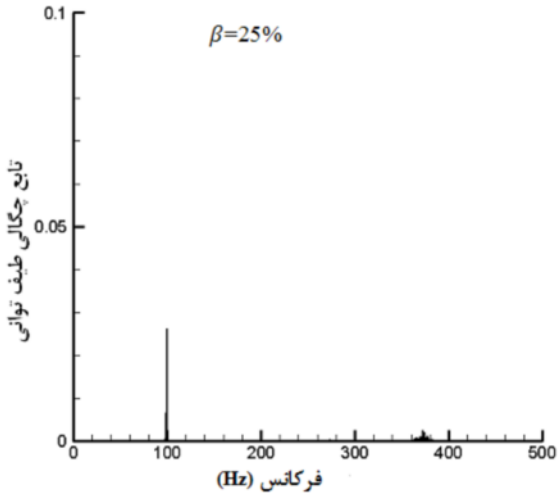
در شکل ۲۸ نمونه ای از سری زمانی سرعت اندازه‌گیری شده در موقعیت a و با شرایط $f_e = ۱۰۰\text{Hz}$ و $\beta = ٪۷۵$ آورده شده است.



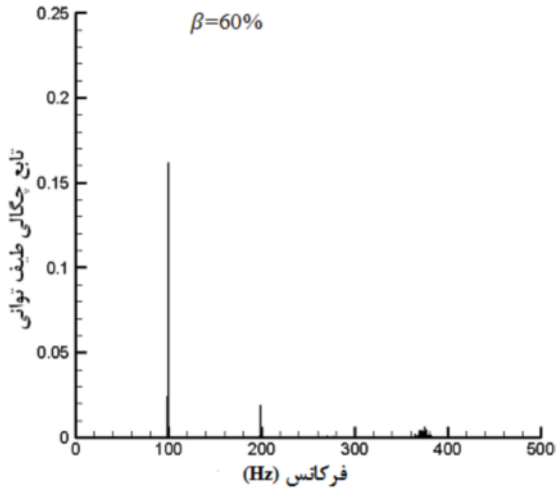
شکل ۲۳ سرعت در حوزه فرکانس ($f_e = ۵۰۰\text{Hz}$)



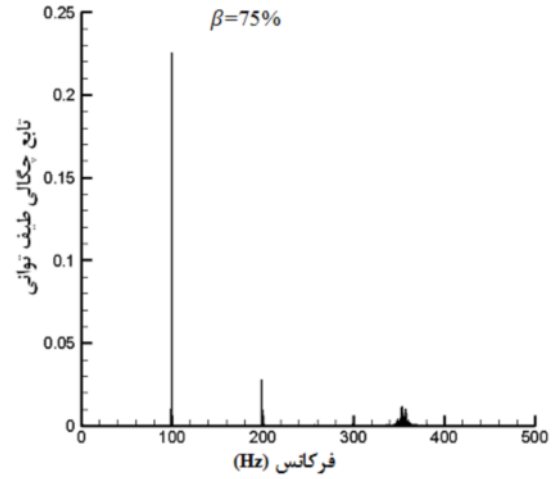
شکل ۲۴ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta = ٪۱۰$)



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



شکل ۲۶ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta =$ ٪۶۰)



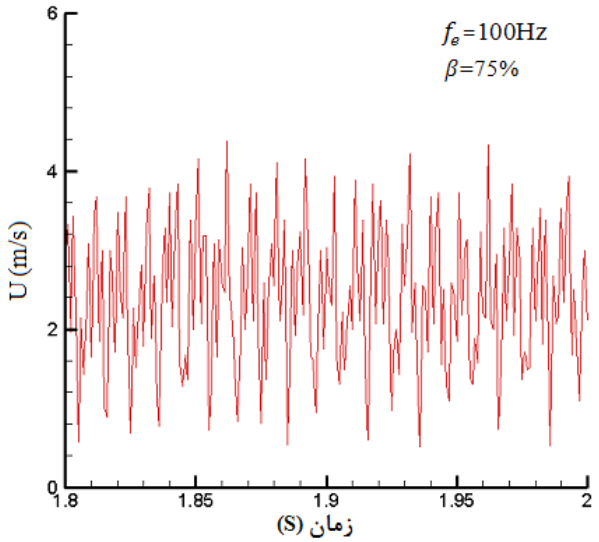
شکل ۲۷ سرعت در حوزه فرکانس ($\beta =$ ٪۷۵)

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

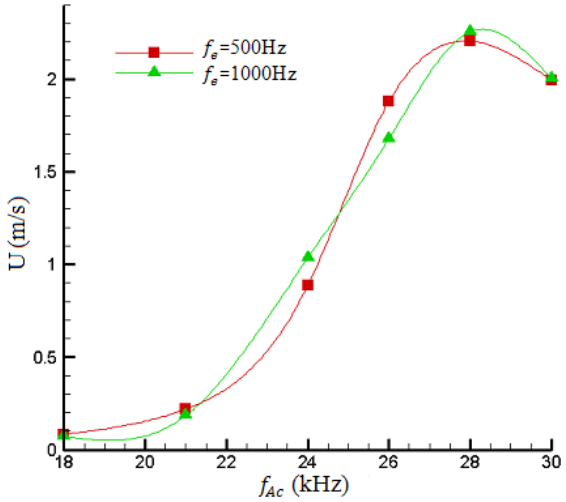
۶- تأثیر فرکانس‌های تحریک و موج و ضخامت دی‌الکتریک بر روی سرعت باد یونی

در شکل ۲۹ اثر فرکانس موج بر روی سرعت تولید شده توسط عملگر پلاسمایی با نسبت W_c/W_e=۲ در موقعیت a، $\beta =$ ٪۷۵ و ۶ لایه دی‌الکتریک کاپتون در دو فرکانس تحریک ۵۰۰Hz و ۱۰۰۰Hz نشان داده شده است. با توجه به این شکل یک نقطه ماکزیمم سرعت در فرکانس موج $f_{Ac} =$ ۲۸kHz 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 قبلا در شکل ۷ با توجه به نتایج کانهارت [۱۸] توافق داشت.

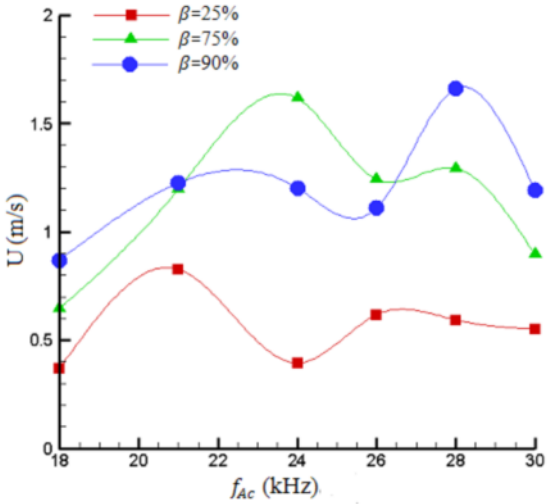
حال باید دید که آیا این نقطه ماکزیمم سرعت تنها در این عملگر و این شرایط وجود دارد و یا در شرایط دیگر هم دیده می‌شود. لذا در شکل ۳۰ برای عملگر پلاسمایی با نسبت W_c/W_e=۲ در موقعیت a، ۳ لایه دی‌الکتریک کاپتون، $f_e =$ ۱۰۰Hz در سه حالت $\beta =$ ٪۲۵، $\beta =$ ٪۷۵ و $\beta =$ ٪۹۰ صحت این قضیه بررسی شده است.



شکل ۲۸ تغییرات لحظه‌ای سرعت زمانی در نقطه a با فرکانس تحریک ۱۰۰Hz و $\beta =$ ٪۷۵



شکل ۲۹ اثر فرکانس روی سرعت تولید شده در موقعیت a با W_c/W_e=۲، $\beta = ٪۷۵$، $V = ۱۴\mathrm{KV_{P-P}}$ و ۶ لایه کاپتون

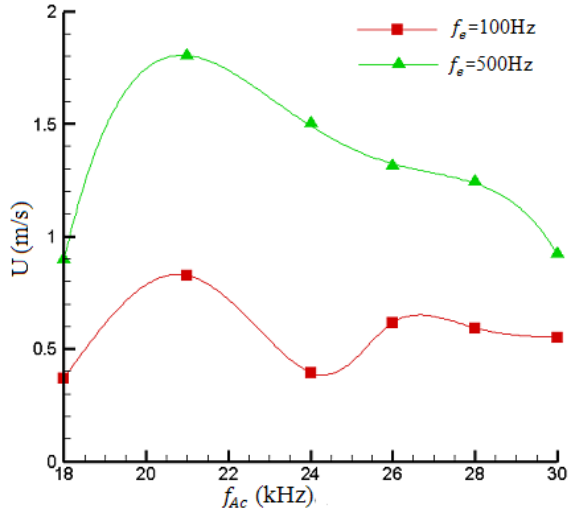


شکل ۳۰ اثر فرکانس موج روی سرعت تولید شده در موقعیت a با W_c/W_e=۲، ۳ لایه کاپتون و $f_e = ۱۰۰\mathrm{Hz}$

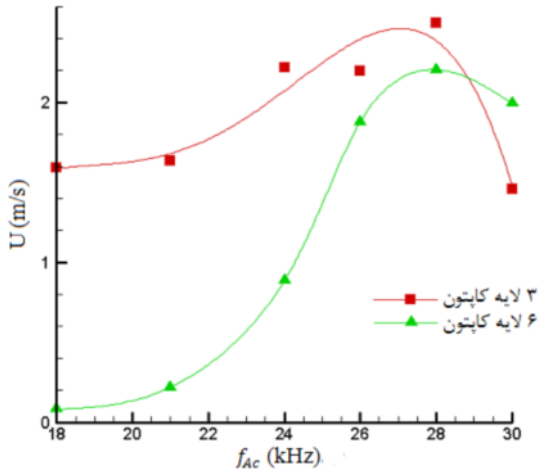
با توجه به این شکل در هر سه سیکل کاری یک نقطه ماکزیمم سرعت در یک فرکانس موج حامل خاص دیده می‌شود. با افزایش مقدار سیکل کاری، مقدار فرکانس موج حاملی که سرعت در آن ماکزیمم است، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که برای سیکل‌های کاری $\beta = ٪۲۵$ ، $\beta = ٪۷۵$ و $\beta = ٪۹۰$ نقطه ماکزیمم سرعت تولیدی به ترتیب در فرکانس‌های موج حامل ۲۱kHz ، ۲۴kHz و ۲۸kHz دیده می‌شود.

این مساله همچنین برای همین عملگر با ۳ لایه کاپتون در دو فرکانس تحریک متفاوت $f_e = ۱۰۰\mathrm{Hz}$ و $f_e = ۵۰۰\mathrm{Hz}$ برای سیکل کاری $\beta = ٪۲۵$ در شکل ۳۱ بررسی شده است. با توجه به شکل ۳۱ همان مقدار فرکانس موج حامل در سرعت ماکزیمم در فرکانس تحریک $f_e = ۱۰۰\mathrm{Hz}$ برای حالت $f_e = ۵۰۰\mathrm{Hz}$ دیده می‌شود.

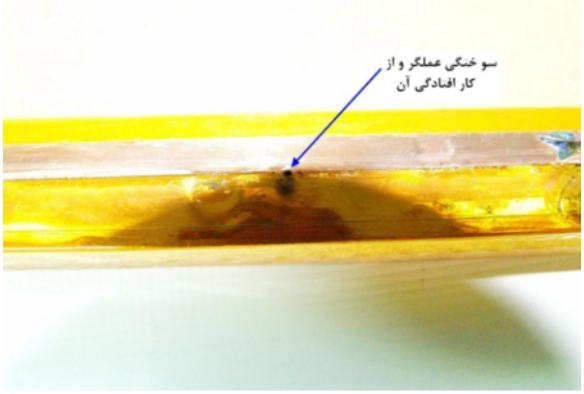
در شکل ۳۲ برای عملگرهای پلاسمایی با نسبت W_c/W_e=۲ و در شرایط $f_e = ۵۰۰\mathrm{Hz}$ و $\beta = ٪۷۵$ اثر فرکانس موج حامل بر روی سرعت تولید شده به همراه ضخامت دی‌الکتریک در دو حالت ۳ لایه کاپتون و ۶ لایه کاپتون نیز نشان داده شده است.



شکل ۳۱ اثر فرکانس موج روی سرعت تولید شده در موقعیت a با W_c/W_e=۲، ۳ لایه کاپتون و $\beta = ٪۲۵$



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



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 آشفتگی 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_d/W_e=۱، W_d/W_e=۲ و W_d/W_e=۳ بیشترین سرعت تولیدی توسط عملگر با شرایط W_d/W_e=۲ 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 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 پایدارتر بوده 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.

[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.

[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.