

Performance Study of Dielectric Barrier Discharge Actuators in Flow Control by Image Processing

A. Kosari¹
M. Barzegaran²

Received: 2015.4.21

Accepted: 2015.5.19

Abstract

Arrays of dielectric barrier discharge are used for control of various aerodynamic phenomena such as control flow separation. In order to control this phenomenon by the generated momentum, it is needed to determine the maximum discharge voltage required to the momentum generation. By image processing, maximum momentum produced and consequently maximum discharge voltage can be determined with using plasma flame length and light intensity. The advantage of this method compared to other methods is simplicity and availability of a camera as the only required equipment. In this study, an array of 8DBD actuators arranged perpendicular to flow on NACA0012 is installed in a wind tunnel. Performance and maximum discharge voltage can be determined by processing the images captured from the arrays in different discharge voltages and dynamic pressures. Using image processing method for evaluating the efficiency of DBD actuators and accessing the maximum discharge voltage for flow separation control is unprecedented.

Keywords: Dielectric barrier discharge, Image processing, Dynamic pressure, Discharge voltage, Performance, Wind tunnel.

¹ Assistant Professor of Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, kosari_a@ut.ac.ir

² M. Sc. Student of Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran

بررسی کارایی محرک‌های تخلیه سدّ دی‌الکتریک در کنترل جریان به روش پردازش تصویر

امیرضا کوثری^۱
محمد رضا برزگران^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱

تاریخ تصویب: ۹۴/۲/۲۹

چکیده

از آرایه‌های تخلیه سدّ دی‌الکتریک برای کنترل پدیده‌های مختلف آئرو دینامیکی از جمله کنترل جداسازی جریان استفاده می‌شود. به منظور کنترل این پدیده‌ها توسط تکانه تولیدی محرک‌ها نیاز به تعیین ولتاژ بیشینه تخلیه لازم برای تولید تکانه است. در روش پردازش تصویر با استفاده از شعله‌های پلاسما و پارامترهایی از جمله طول و شدت نور آن می‌توان بیشینه تکانه تولیدی و به تبع آن ولتاژ بیشینه تخلیه را به دست آورد. مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها سادگی و در دسترس بودن تجهیزات آن، که تنها یک

^۱ استادیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران؛ kosari_a@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

دوربین است، می‌باشد. در این پژوهش آرایه‌ای اتنایی از محرک‌های تخلیه سدّ دی‌الکتريک با آرایش عمود بر جریان بر روی بالواره ناکا ۰۰۱۲ داخل تونل باد نصب شده است. با تصویربرداری از آرایه در ولتاژهای تخلیه و فشارهای دینامیکی مختلف کارایی آن‌ها و در نتیجه بیشینه ولتاژ تخلیه مناسب به روش پردازش تصویر محاسبه می‌شود. استفاده از روش پردازش تصویر در بررسی کارایی محرک‌های تخلیه سدّ دی‌الکتريک و استخراج حدّ بیشینه ولتاژ تخلیه در کنترل جداسازی جریان بی‌سابقه بوده است.

واژه‌های کلیدی: محرک تخلیه سدّ دی‌الکتريک، پردازش

تصویر، فشار دینامیکی، ولتاژ تخلیه، کارایی، تونل باد.

۱- مقدمه

طبق تعریف ارائه شده توسط گد^۱ کنترل جریان، توانایی تحت تأثیر قراردادن یک میدان سیال به شکل فعال^۲ و یا غیرفعال^۳ به منظور به دست آوردن تغییر مطلوب می‌باشد [۱]. در کتاب "تاریخچه کنترل لایه مرزی در آمریکا" کنترل جریان بدین شکل تفسیر شده است: "کنترل جریان دربرگیرنده هر مکانیزم یا فرآیندی است که باعث شود رفتار سیال نسبت به حالت طبیعی متفاوت باشد" [۲]. در کنترل جریان تلاش می‌شود با استفاده از هر نوع ابزار و محرکی چه به شکل فعال و چه به شکل غیرفعال تغییراتی در رفتار سیال ایجاد نمود که به نوعی سودمند باشد. این روند می‌تواند منجر به تسریع و یا تعویق تحقق فرآیندی در جریان باشد که در حالت خاص سودی به دنبال دارد. تسریع و یا تعویق پدیده‌های آئرو دینامیکی بر روی بالواره‌ها می‌تواند در نهایت سبب افزایش نیروی برآ^۴، کاهش نیروی

¹ Gad el hak

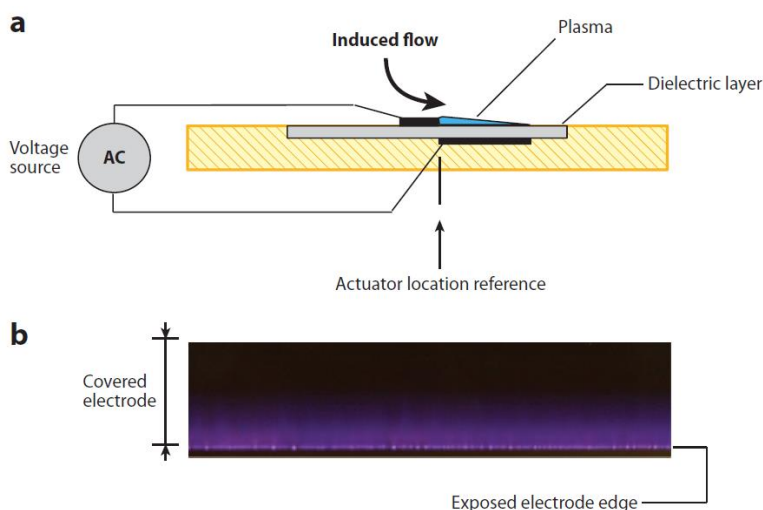
² Active

³ Passive

⁴ Lift Enhancement

پسا^۱، آمیزش جرم-تکانه-انرژی^۲ و کاهش نویز آکوستیک^۳ شود. محرک‌های تخلیه سد^۴ دی‌الکتریک^۴ به واسطه پتانسیل بالا جهت کاربرد در کنترل جریان از حدود سال ۲۰۰۰ میلادی مورد توجه محققان آیرودینامیک قرار گرفت و اولین گزارش در مورد باد یونی^۵ ایجاد شده توسط این محرک‌ها و قابلیت به کارگیری این اثر جهت کنترل جریان در همین سال توسط راث^۶ و همکارانش منتشر گردید [۳]. محرک‌های دی بی دی متناوب^۷ از جمله محرک‌های پلاسمایی هستند که در کنترل آیرودینامیکی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این محرک‌ها عموماً از یک الکتروود بالای^۸ و یک الکتروود زیرین^۹ که توسط لایه‌هایی از ماده دی‌الکتریک از یکدیگر جدا گشته‌اند تشکیل می‌گردند. ساختمان کلی ساده‌ترین نوع این محرک‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود. انتخاب ماده عایق با ضریب دی‌الکتریک و ثابت دی‌الکتریک مناسب و همچنین ضخامت ماده عایق از موارد تأثیر گذار در کارایی محرک‌های دی بی دی متناوب می‌باشد. از رایج‌ترین مواد مورد استفاده جهت ایجاد سد دی‌الکتریک می‌توان به نوعی پلی ایمید^{۱۱} با نام تجاری کاپتون^{۱۱} و تفلون^{۱۲} اشاره نمود.

-
- 1 Drag Reduction
 - 2 Mixing Augmentation
 - 3 Noise Suppression
 - 4 Dielectric Barrier Discharge (DBD)
 - 5 Ionic Wind
 - 6 Roth
 - 7 AC DBD
 - 8 exposed electrode
 - 9 buried electrode
 - 10 Polyimide
 - 11 Kapton
 - 12 Teflon

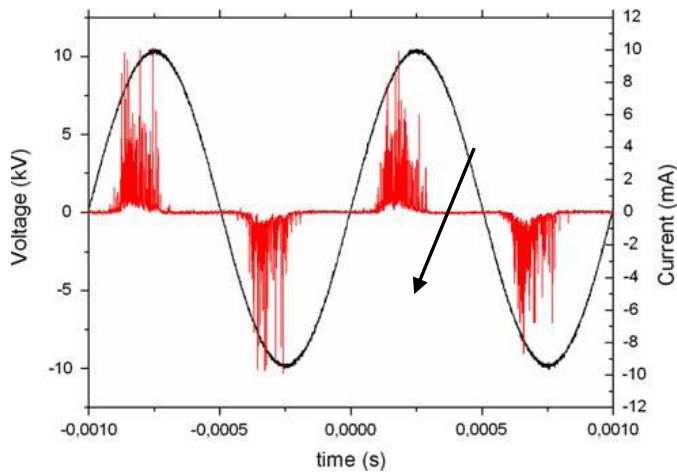


شکل ۱. الف) ساختمان کلی محرک نامتقارن تخلیه سدّ دی‌الکتریک
 ب) تشکیل پلاسما بالای ماده دی‌الکتریک در فشار ۱ اتمسفر [۴].

باد یونی القا شده توسط محرک دی بی دی به واسطه عدم تقارن هندسی الکترودهای محرک و خاصیت تخلیه الکتریکی در سیکل‌های سیگنال سینوسی به سمت پایین دست الکتروود بالایی ایجاد می‌گردد که این خاصیت توسط آنکول^۱ و همکاران بررسی و گزارش گردیده است [۵]. علاوه بر تولید باد یونی، در اثر برهم کنش بین عناصر باردار به خصوص یون‌های منفی با سیال اطراف محرک، به سطحی که محرک بر روی آن نصب شده نیرویی وارد می‌شود که میزان آن در نیم سیکل‌های سیگنال سینوسی به طرز محسوسی تغییر می‌نماید. بررسی‌ها نشان می‌دهد در دو ربع از سیکل سیگنال سینوسی جریان محسوسی از محرک‌ها عبور می‌کند. این دو ربع سیکل به ترتیب ربع اول (سیگنال سینوسی در قطبیت مثبت و شیب مثبت) و ربع سوم (سیگنال سینوسی در قطبیت منفی و شیب منفی) هستند. بررسی بیشتر نیروی ایجاد شده با به کارگیری محرک نشان می‌دهد که فاز غالب تولیدکننده نیروی بدنی، ربع سوم سیکل می‌باشد و تا ۹۷٪ نیروی بدنی ایجاد شده

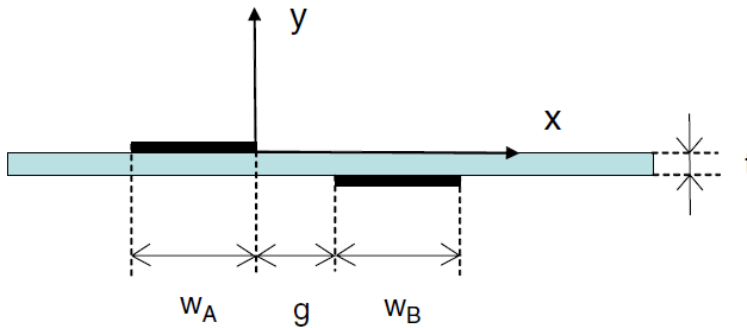
¹ Encole

توسط محرک در این فاز ایجاد می گردد. این فاز از سیگنال متناوب در شکل ۲ مشخص می باشد.



شکل ۲: توسعه ولتاژ و جریان سیگنال AC در محرک تخلیه DBD نسبت به زمان [۶].

باور عمومی محققان بر این است که نیروی رانش یا بدنی ایجاد شده توسط محرک های دی بی دی بستگی مستقیم به ولتاژ دارد، چرا که هم توان مصرف شده توسط محرک و هم نیروی رانش ایجاد شده توسط آن در حالتی که تخلیه گازی در رژیم کرونا باشد متناسب با $U_{p-p}^{7/2}$ می باشد. افزایش ولتاژ ورودی به محرک بیش از این مقدار باعث افزایش توان تلف شده می گردد و همچنین باعث می شود بیشترین میزان سرعت باد یونی القا شده در مقدار مشخصی - که تابع سیگنال AC ورودی به محرک و هندسه آن است - اشباع گردد [۷]. بهینه سازی عملکرد محرک های پلازما در غالب دو بخش کلی تعیین آرایش بهینه هندسه محرک و بهینه سازی سیگنال تغذیه شده به محرک صورت می گیرد. شکل ۳ برخی از مهم ترین پارامترهای هندسی در محرک های دی بی دی را نشان می دهد.



شکل ۳: برخی از پارامترهای هندسی تاثیرگذار در عملکرد محرک‌های پلاسما [۴].

در ساده‌ترین آرایش محرک‌های دی بی دی، تک دی بی دی، این پارامترها عبارتند از پهنای الکتروود بالایی W_u ، پهنای الکتروود پایینی W_l ، ضخامت الکتروود بالایی t_u ، ضخامت الکتروود پایینی t_l ، ضخامت ماده دی‌الکتريک t_d و نهایتاً شکاف بین الکتروودهای بالایی و پایینی g و یا برهم پوشانی بین الکتروودهای بالایی و پایینی l . پارامترهای سیگنال متناوب ورودی به محرک‌ها عبارتند از شکل سیگنال (سینوسی، مثلثی و یا مربعی)، فرکانس حامل f_c^1 ، فرکانس مدولاسیون f_m ، ولتاژ پیک تا پیک E_{p-p} و نهایتاً چرخه کار D^2 برحسب درصد.

فرکانس بهینه f_c محرک دی بی دی جهت ایجاد حداکثر نیروی رانش به گاز موجود در مجاورت محرک و ظرفیت خازنی عمده^۳ ماده دی‌الکتريک که با ϵ/t_d تعریف می‌گردد - ϵ ثابت دی‌الکتريک^۴ ماده دی‌الکتريک می‌باشد - بستگی دارد. اگر محرک دی بی دی با فرکانس بهینه f_c عمل نماید باز هم نیروی رانش ایجاد شده به ظرفیت خازنی عمدهٔ محرک وابسته است [۸]. آزمایش‌های تجربی بیانگر این امر هستند که به ازای یک ولتاژ ورودی مشخص محرک‌هایی که ظرفیت خازنی بیشتری دارند - اگر ولتاژ ورودی کمتر از میزان اشباع محرک و متناسب با $E_{p-p}^{7/2}$ باشد - به دلیل تقویت میدان الکتريکی ایجاد شده بین الکتروودها نیروی رانش بیشتری تولید می‌نمایند. از این مشاهدات می‌توان

¹ Carrier Frequency

² Duty Cycle

³ Bulk Capacitance

⁴ Dielectric Constant



نتیجه گرفت که دی الکتریک ایده آل باید دارای ثابت دی الکتریک بالا و ضخامت کم باشد تا ظرفیت خازنی عمده محرک تا حد امکان افزایش یابد. البته اگر از جنبه عملی به مسأله ضخامت دی الکتریک بنگریم ضخامت کم دی الکتریک باعث می شود که استحکام دی الکتریک^۱ ماده عایق کاهش یابد و در نتیجه احتمال شکست دی الکتریک در اثر اعمال اختلاف پتانسیل بالا جهت حداکثر کارآیی محرک زیاد شود. در نتیجه عملاً استفاده از دی الکتریک با ضخامت بالاتر - گرچه سبب افزایش استحکام دی الکتریک می شود - در ضمن باعث می شود آستانه ولتاژ لازم برای برقراری تخلیه گازی افزایش پیدا کند و توان مصرفی محرک های دی بی دی بیشتر گردد. در سال ۲۰۰۹ توماس^۲ و همکاران توانستند با استفاده از معلومات بالا و با به کارگیری عایقی با ضخامت بالا و ثابت دی الکتریک پایین و ولتاژ بالاتر سیگنال متناوب نیروی رانش ایجاد شده توسط یک محرک دی بی دی را تا ۱۰ برابر افزایش دهند [۹].

بررسی و مطالعه رفتار عملگرهای پلاسمایی، تاریخچه قدرتمندی ندارد. این موضوع نیز به این دلیل است که امکان نصب حسگرهای اندازه گیری در نزدیکی محرک ها نیست. بدین ترتیب نمی توان به صورت مستقیم اثرات پارامترهای داخلی و خارجی را بر روی عملکرد محرک های پلازما سنجید. در ۲۰۰۸ بنارد^۳ و همکارانش به بررسی تاثیرات فشار هوا بر روی عملکرد محرک های دی بی دی پرداختند [۱۰]. او در این پژوهش با بررسی دبی جریان در فشارهای مختلف میزان باد یونی تولید شده توسط تک محرک پلازما را اندازه گیری نموده و تحلیل های بر اساس این رفتار انجام داده است. پیش از او نیز اندرسون^۴ و روی^۵ در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر رطوبت بر عملکرد این خانواده از محرک ها پرداخته بودند. این بررسی ها با استفاده از اندازه گیری میزان دبی جرمی هوا صورت گرفته بود [۱۱]. البته بررسی هایی نیز با استفاده از مطالعه میزان نیروی تولیدی انجام گرفته است. اب^۶ و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی رفتار تک محرک پلازما در

¹ Dielectric Strength

² Thomas

³ Benard

⁴ Anderson

⁵ Roy

⁶ Abe



در فشارهای مختلف با استفاده از خروجی‌های نیرو پرداختند [۱۲]. این بررسی‌ها زمینه‌ساز بررسی‌های دقیق‌تر در حوزه کارایی محرک‌های سدّی الکتریک به خصوص در کنترل پدیده‌های آئرو دینامیکی شد، به نحوی که در مطالعات کُرک^۱ و همکاران کارایی محرک‌های پلاسمایی و میزان وابستگی این پارامترها به عاملی چون فشار استاتیکی بررسی شد. کُرک توانست در این پژوهش حداقل ولتاژ تخلیه مورد نیاز را با تغییرات فشار استاتیکی کاهش دهد. بدین ترتیب وی توانست با موازنه بین ولتاژ تخلیه و فشار استاتیکی، جریان تولیدی توسط تکانه را به حداکثر میزان در فشارهای استاتیکی مشخص برساند [۱۳]. در نهایت کریکسیز^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱ در کاری مشابه به بررسی ارتباط میزان انرژی مصرفی و شدت نور تولیدی محرک‌ها پرداختند. آن‌ها نیز با استفاده از پردازش تصویر و بررسی شدت و طول شعله‌های پلاسمایی و ارتباط آن با نیروی تولید شده، پروفیل توان مصرفی محرک‌ها را محاسبه نمودند. هدف آن‌ها بررسی پروفیل توانی تک محرک بوده و به بررسی تاثیر آرایش آرایه‌ای و کاربرد کنترل جریان توجهی نداشتند. اما ایده پردازش تصویر در بررسی کارایی محرک‌ها در اینجا ریشه گرفت [۱۴].

نکته قابل توجه در همه این پژوهش‌ها بررسی عملکرد با توجه به خروجی‌های تولیدی محرک‌ها است. ویژگی و رفتار خود محرک‌ها به هیچ وجه مورد بررسی قرار نگرفته است و دلیل این موضوع نیز تخلیه الکتریکی و میدان مغناطیسی قوی تولید شده توسط این محرک‌ها است. استفاده از پردازش تصویر علاوه بر این که این امکان را می‌دهد که از میدان مغناطیسی و الکتریکی تولید شده در امان بود می‌تواند مقایسه نسبی از فیزیک عملگرها را انجام دهد. در این پژوهش آرایه‌ای از محرک‌ها با فیزیک و آرایش ذکر شده بر روی بالواره ناکا^۳ ۲۰۱۲ نصب شده و در داخل تونل باد تحت فشارهای دینامیکی مختلف قرار می‌گیرند. در این فشارهای دینامیکی سطح سیگنال سینوسی آن‌ها نیز تغییر می‌کند. بدین ترتیب و با استفاده از دوربین‌های تعبیه شده در تونل باد و الگوریتم‌های پردازش تصویر، تغییرات فیزیکی محرک‌ها مشاهده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این

¹ Corke

² Kreigseis

³ NACA0012

فشارها و سطوح سیگنال‌های مختلف، فیزیک پلاسما از جمله، طول شعله تولید شده، شدت نور فرابنفش آن دچار تغییر می‌شود. با استفاده از پردازش تصویر این اطلاعات در کنار هم قرار گرفته و بررسی‌هایی بر روی آن صورت می‌گیرد.

۲- روش پردازش تصویر

روش پردازش تصویر به منظور آنالیز نسبی طول شعله پلاسمای تشکیل شده و شدت نور ساطع شده از محرک‌ها به کار گرفته شده است. بدین ترتیب می‌توان عملکرد پلاسما را در شرایط مختلف مقایسه نمود و شرایطی را که در آن پلاسمای تولیدی بالاترین کیفیت و بیشترین تکانه را دارد شناسایی نمود. از آن جا که کاربرد عملگرهای محرک تخلیه سد دی‌الکترونیک در کنترل جریان بسیار زیاد است لذا می‌بایست شرایط محیطی که در آن پلاسماها عملکرد مناسبی دارند شناخت. عملکرد پلاسما به میزان ولتاژ پیک تو پیک دریافتی از سیگنال متناوب تولید شده توسط منبع تغذیه بسیار وابسته است. پلاسما تولیدی توسط آرایه‌ای از محرک‌های دی‌الکترونیک تأمین می‌شود. این محرک‌ها به وسیله سیگنال سینوسی تولید شده توسط مجموعه سیگنال ژنراتور و منبع تغذیه ولتاژ بالا تحریک می‌شوند. از این رو می‌توان ولتاژ قله به قله تحریک را به عنوان پارامتری در تولید شعله پلاسما و نور ساطع شده در آن تحلیل کرد. به علاوه با توجه به استفاده از محرک‌های پلاسما بر روی بالواره و نصب آن در تونل باد می‌توان شرایطی چون سرعت تونل باد و به تبع آن فشار دینامیکی جریان هوا را به عنوان پارامترهای تحلیل مورد بررسی قرار داد. نکته قابل توجه در تحلیل با روش پردازش تصویر لزوم استفاده از مفاهیم ساده پردازش تصویر و ایجاد داده‌های دلخواه بر مبنای آن است. با استفاده از پردازش تصویر تحت نرم‌افزار متلب^۱ می‌توان تصاویر گرفته شده را بررسی نمود. با توجه به این که میزان پراش موجود در تولید پلاسما به دلیل دست‌ساز بودن یا نبودن الکترودها مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، لذا طول هر محرک بررسی شده و با توجه به تعداد تک محرک‌ها، میانگین طول محرک‌ها در یک آرایه ملاک عمل قرار می‌گیرد. بدین ترتیب میزان طول هر عملگر بی‌بعد شده و

^۱ MATLAB

در محاسبات بدون وزن تأثیر داده می‌شود و یک طول مقیاس برای هر تک محرک موجود است. در ابتدا از هر عکس، محرک‌ها جدا شده و به تعداد محرک‌ها تصاویر مجزا ایجاد می‌شود. لذا برای هر تک محرک آرایه یک تصویر در دسترس است. تصویر هر تک محرک در نرم افزار بارگذاری شده و توزیع طول شعلهٔ پلاسمای تولیدی به نسبت طول تک محرک واحد محاسبه می‌شود. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری طول به کمک پردازش تصویر وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از هیستوگرام تصویر و تغییر فضای رنگ آن است. بدین ترتیب با شماره پیکسل‌ها می‌توان طول یک جسم مشخص را بر حسب پیکسل محاسبه نمود. بنابراین با دانستن ضریب تبدیل پیکسل به واحد طول می‌توان طول هر جسمی را به دست آورد. در این پژوهش از همان واحد پیکسل برای بیان طول استفاده شده است. طول محرک‌های پلاسمایی نیز بر واحد پیکسل اندازه‌گیری شده است. در روش بررسی هیستوگرام^۱، رنگ یک تصویر به محدوده سیاه-سفید برده شده و بر اساس تابع توزیع احتمال رنگ تصویر، توزیع شدت نور استخراج می‌شود [۱۵]. یکی از مسائل بسیار مهم و تأثیرگذار در تبدیل محیط رنگ در پردازش تصویر، مشخص کردن میزان سطح تبدیل^۲ رنگ است. میزان سطح تبدیل عددی است که بر مبنای آن یک پیکسل رنگی به یک پیکسل سیاه یا سفید و یا به عبارت دیگر به یک بیت تبدیل می‌شود. بر این اساس می‌توان با بررسی سطوح مختلف سطح تبدیل و بررسی این سطوح تعریف تابع سطح انتروپی، سطح تبدیل مناسب استخراج کرد [۱۶]. بنابراین سطح خاکستری مناسب سطحی است که سطح انتروپی تصویر را با تبدیل رنگ فضای رنگ تا حد ممکن تغییر نداده و در عین حال بیشترین تفاوت را در فضای رنگ ایجاد نماید. برای بیان واضح تر لازم به ذکر است، به منظور تبدیل فضای رنگ به عددی از رنگ خاکستری نیازمند هستیم که کمتر از آن را سفید و بیشتر از آن را سیاه فرض کنیم. معیار مناسب برای انتخاب عدد این رنگ، این است که آنتروپی عکس با انتخاب آن عوض نشود یعنی عکسی که فضای رنگ آن تغییر یافته با عکس اصلی از نظر آنتروپی تغییری نکرده باشد و در عین حال بیشترین نقاط را پوشش دهد یعنی تغییرات سیاه و سفید در آن بیشینه باشد.

^۱ Histogram

^۲ Threshold

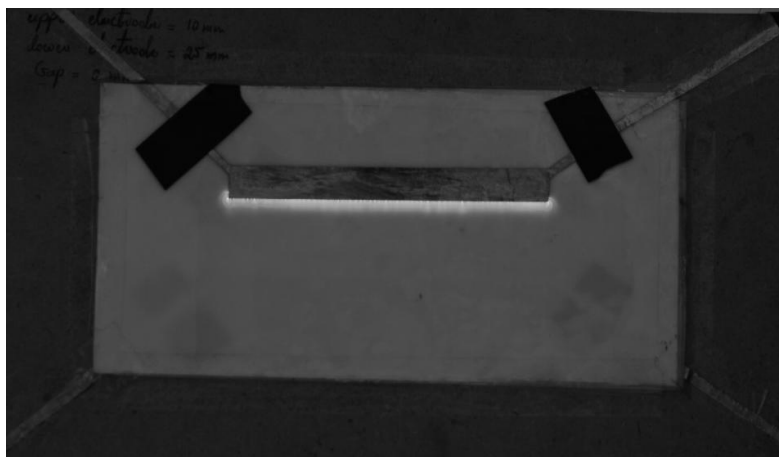
می توان تابع آنتروپی را به نوعی با تابع همبستگی سیگنال برابر دانست. تابع همبستگی سیگنال بیانگر میزان ارتباط سیگنال ها در واحد زمان و یکپارچگی سیگنال است. تابع آنتروپی تصویر نیز با توجه به توزیع فضای رنگ در واحد سطح میزان همبستگی رنگ ها را تشخیص داده و بدین وسیله می توان صحت تغییر فضای رنگ را به دست آورد. این امر معادل استفاده از تابع همبستگی سیگنال قبل و بعد از فیلتر کردن یک سیگنال است. برای به دست آوردن سیگنال قطع برای فیلتر کردن تابع همبستگی سیگنال قبل و بعد از فیلترینگ مقایسه شده و نباید تغییری در این همبستگی وجود داشته باشد. با تبدیل فضای رنگ سیستم به خاکستری و تبدیل تصویر به تصویر ۲۵۶ بیتی و شمارش مجموع بیت ها به معنای سطح نور روشن می توان شدت نور ساطع شده را تعیین نمود. حال با میانگین گیری از این سطح نور ساطع شده بر اساس محرک های مختلف در طول آرایه، مقدار روشنایی نور تعیین می شود. مفاهیم هستوگرام بر مبنای یک رابطه تبدیل بر مبنای تبدیل واحد اعداد از ترکیب رنگ های قرمز-سبز-آبی به فضای ۲۵۶ بیتی و سپس فضای تک بیتی است. لذا این تبدیل به راحتی در محیط متلب قابل انجام است. آنچه که گلوگاه بررسی هستوگرام است، محاسبه میزان سطح تبدیل در تبدیل عکس ۲۵۶ بیتی به عکس تک بیتی است. این تبدیل بر اساس روش پیشنهادی با استفاده از تابع آنتروپی صورت پذیرفته است. همانگونه که بیان شد. در صورتی که محیط بر اساس تصویر تک بیتی پردازش شود، می توان توزیع طول شعله در واحد طول را نیز محاسبه نمود. لذا بر این اساس میانگین مقادیر تصویر ۲۵۶ بیتی بیانگر میزان روشنایی در مقیاس ۲۵۶ بیت و بر اساس توزیع طولی و مجموع تصویر تک بیتی می تواند طول شعله را نمایش دهد. برای تحلیل عملکرد، آزمایش هایی برای پردازش آرایه ها می باید تعریف شود.

۳- سناریوی آزمایش ها

برای تولید محرک های پلاسما (محرک تخلیه سد دی الکتریک) نیاز به استفاده از ماده ای رسانا به عنوان الکترود و ماده ای به عنوان دی الکتریک است. در ساخت دستی و

۶۲ / بررسی کارایی محرک‌های تخلیه سدّی الکتریک در کنترل جریان به روش پردازش تصویر

غیرصنعتی این محرک‌ها از ورق مس به ضخامت ۰,۳ میلی‌متر به عنوان الکترود و ورق تفلون به ضخامت ۱,۵ میلی‌متر به عنوان دی‌الکتریک استفاده شده است. در نمونه اول محرک‌های ساخته شده برای بررسی در هوای ساکن، محرک‌ها دارای طول ۱۰ سانتی‌متر بودند. پهنای الکترود بالایی ۱۰ میلی‌متر و پهنای الکترود پایینی ۲۵ میلی‌متر بود. الکترود بالایی و الکترود پایینی دارای هم‌پوشانی صفر بوده‌اند. در شکل ۴ نمونه این محرک‌ها قابل مشاهده است.

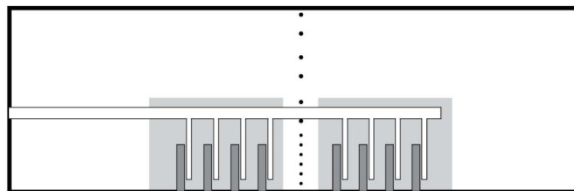


شکل ۴. محرک تخلیه سدّی الکتریک.

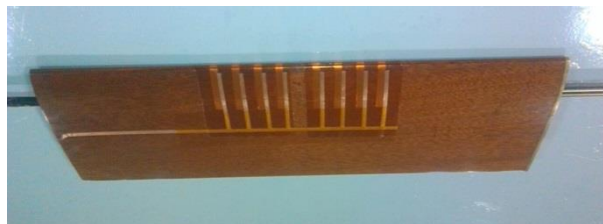
در نهایت آرایه‌ای از محرک‌ها برای نصب بر روی مدل بالواره ساخته شد که مشخصات آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. این آرایه‌ها از آرایش هم‌چرخش بوده و از سه لایه کاپتون به عنوان دی‌الکتریک استفاده شده است. شکل ۵ تصویر طرحواره آرایه‌ها و شکل ۶ محرک‌های نصب شده بر روی بالواره قابل را نشان می‌دهند.

جدول ۱. پارامترهای طراحی آرایه‌های تخلیه سد دی‌الکتریک
(واحد طول: میلی‌متر).

پهنای الکتروود بالایی (W_u)	۳
پهنای الکتروود پایینی (W_l)	۶
هم‌پوشانی (l)	۰
فاصله عرض چینش (λ)	۱۸
فاصله از خط سوراخ فشار	۱۵
ضخامت الکتروود بالایی (t_u)	۰٫۰۲
ضخامت الکتروود پایینی (t_l)	۰٫۰۴
ضخامت دی‌الکتریک (t_d)	۰٫۱۵
طول موثر تشکیل پلاسما ($\square x$)	۴۰
تعداد کل محرک‌های آرایه (n)	۸
طول دهانه بال پوشش داده شده	۱۴۰

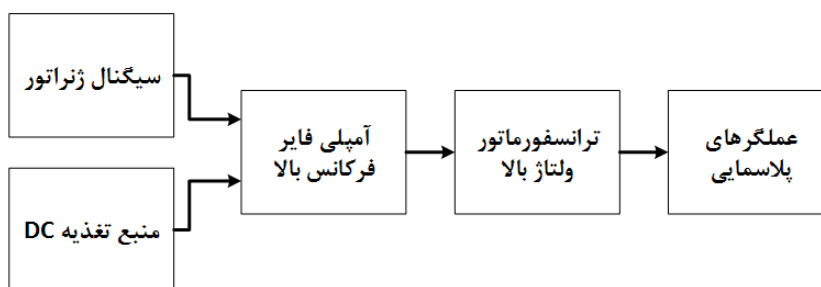


شکل ۵. شماتیک آرایه محرک‌های نصب شده بر روی بالواره.



شکل ۶. آرایه محرک‌های نصب شده بر روی بالواره NACA0012

به منظور تولید پلاسمای سرد تعادلی نیاز به وجود مداری جهت تخلیه متناوب جریان با ولتاژ بالا در دو سر الکترودها است. برای ایجاد یک جریان متناوب نیاز به وجود یک سیستم نوسان‌ساز ریتمیک^۱ و سیستم افزایش توان موج ایجاد شده است. بدین منظور از یک سیگنال ژنراتور برای ایجاد شکل موج متناوب دلخواه با فرکانس و دامنه موردنظر استفاده شده است. سیگنال ژنراتور استفاده شده یک نوسان‌ساز ریتمیک و از نوع فانکشن ژنراتور مدل **HMF2525** می‌باشد. موج تولیدی توسط این سیستم از طریق یک افزایشنده توان^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم افزایشنده توان، موج متناوب تولیدی را دریافت و از طریق یک مدار میانگیر^۳، شکل موج را عیناً بر روی یک سیگنال مستقیم حامل^۴ منتقل می‌کند. سیگنال مستقیم حامل از طریق یک سیستم یکسوساز از برق شهر تأمین می‌گردد. شکل موج میانگیر شده بر روی سیگنال مستقیم حامل از طریق یک ترانس ولتاژ بالا به حدود ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ برابر، بسته به فرکانس موج متناوب، افزایش می‌یابد. در نهایت خروجی سیستم، موجی متناوب با فرکانس و دامنه قابل تنظیم و افزایش یافته تا حدود ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ برابر است. حداکثر توان خروجی این سیستم ۱۰۰ وات است. در شکل ۷ می‌توانید شماتیک مدار تخلیه متناوب پلاسمای سرد تعادلی مشاهده می‌شود.



شکل ۷. طرحواره مدار تخلیه متناوب پلاسمای سرد تعادلی.

¹ Arbitrary Waveform Generator

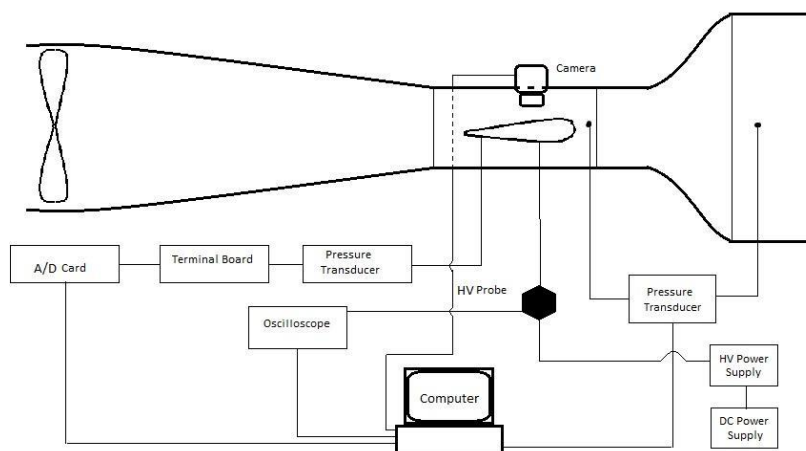
² Power Amplifier

³ Buffer

⁴ Direct Carrier Signal

سیستم فوق، سیگنال ورودی با دامنه حداکثر ۸ ولت را دریافت و سطح خروجی آن را به صورت اسمی در فرکانس ۱۵ مگاهرتز تا ۸۰۰ برابر افزایش می‌دهد. این میزان افزایش ارتباط مستقیمی با فرکانس سیگنال ورودی دارد. سیگنال ورودی نیز می‌تواند تا در محدوده ۱۰ تا ۱۸ مگاهرتز فرکانس داشته باشد. موج دریافت شده بوسیله یک مدار آمپلی‌فایر صوتی دریافت شده و به سطح سیگنال ۳۰ ولت افزایش می‌دهد. این آمپلی‌فایر برای افزایش سطح سیگنال مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. هدف اصلی استفاده از این آمپلی‌فایر افزایش توان سیگنال است. سیگنال خروجی سیگنال ژنراتور دارای توان حداکثر ۱۰ وات است. این سیگنال با ورود به مدار آمپلی‌فایر به ۱۲۰ وات افزایش می‌یابد. بدین ترتیب مقدمات برای عبور از ترانس آماده می‌شود. سیگنال پرتوان خروجی از آمپلی‌فایر به داخل ترانس هدایت می‌شود. این سیگنال با تغییر سطح ولتاژ تا محدوده کیلوولت افزایش می‌یابد. به منظور بررسی عملکرد پلاسما می‌بایست محرک‌های پلاسما و انتقال تکانه آن‌ها در داخل تونل باد بررسی گردد. تونل باد مورد استفاده از نوع مکشی مدار باز و با مقطع آزمونی به ابعاد $180 \times 100 \times 100$ سانتیمتر می‌باشد. موتور بادبزن مورد استفاده دارای توان ۱۳۲ کیلو وات بوده و به بادبزی با ۸ پره متحرک و ۹ پره ثابت با قطر ۱ متر و ۶۰ سانتی متر متصل شده است. این موتور می‌تواند حداکثر به ۱۷۰۰ دور در دقیقه برسد. در این حالت دبی حجمی آن در حدود ۵۴ متر مکعب بر ثانیه است. پخش کننده اول دارای نسبت واگرایی ۱,۲۵ درجه و زاویه واگرایی ۳,۵ درجه و طول ۳,۵ متر است. پخش کننده دوم نیز دارای زاویه واگرایی ۲۰ درجه می‌باشد. سطح اغتشاشات تونل نیز در سرعت‌های ۱۵ و ۳۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۰,۲۷ و ۰,۲۴ درصد است.

اتاق آزمون تونل دارای زاویه واگرایی ۰,۵ درجه جهت جلوگیری از رشد لایه مرزی است. کف و سقف مقطع آزمون تونل نیز دارای صفحه ای از جنس پلکسی گلس به ابعاد 97×34 سانتیمتر بوده که این صفحات با باز شدن امکان دسترسی به مدل را فراهم می‌آورد. با استفاده از یک دوربین عکاسی از نوع Canon 550D تصاویر عمودی از بالای تونل تهیه شده و برای پردازش تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شماتیک نحوه قراگیری قطعات در مجموعه تونل باد و ارتباط آن‌ها با یکدیگر در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۸. شماتیک چینش تجهیزات آزمایش.

به منظور بررسی عملکرد عملگرهای پلاسمایی باید آزمون‌هایی مطرح شوند. در این آزمون‌ها آرایه‌های محرک دی‌الکتريک بر روی بالواره نصب شده و در شرایط زیر امتحان شده‌اند. در هر آزمایش، از روی بالواره‌ها با استفاده از دوربین دیجیتال عکس تهیه شده است. بنابراین به تعداد شرایط پیش‌بینی شده در آزمایش عکس‌هایی تهیه می‌شود. سپس در هر عکس هر محرک از عکس جدا شده، و عکس جداگانه‌ای از هر محرک گرفته می‌شود. تمامی این تصاویر در شرایط تاریک عکس‌برداری شده‌اند؛ لذا تنها نور موجود در تصاویر، نور شعله پلاسما است. برای اطلاع از کیفیت پلاسمای تولیدی می‌توان با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، میزان شدت نور ساطع شده از پلاسما را اندازه‌گیری نمود. میزان شدت نور ساطع شده بر حسب ولتاژ موج متناوب اعمالی و سرعت جریان هوا در تونل اطلاعات قابل توجهی از نحوه عملکرد سیستم پلاسما را در اختیار می‌گذارد. به علاوه با مطالعه طول شعله پلاسما در راستای الکترودهای عملگر و میزان یکنواختی شعله تولید شده، میزان انرژی تولید شده توسط عملگر در ولتاژها و فرکانس‌های مختلف را می‌توان به صورت نسبی مقایسه کرد. آزمایش‌های مربوط به روند پردازش تصویر بر اساس سناریوی ذکر شده در جدول ۲ انجام گرفته‌اند.

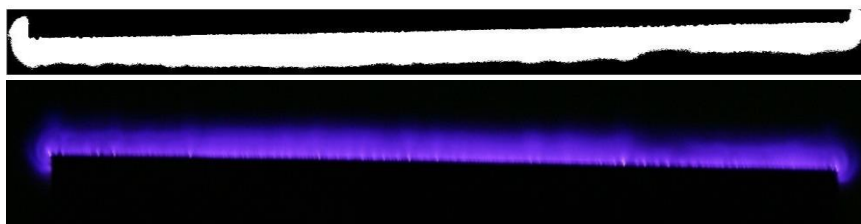
جدول ۲. سناریوی آزمایش پردازش تصویر.

ولتاژ اعمالی دوسر عملگر (VP-P)	سرعت تونل (m/s)
۸	۱۵
۱۰	
۱۲	
۲۰	
۲۵	
۳۰	
۸	۳۵
۱۰	
۱۲	
۲۰	
۲۵	
۳۰	

۴- تحلیل نتایج

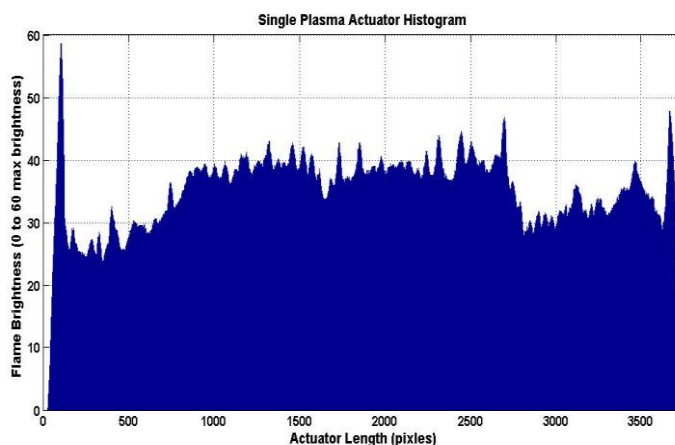
برای بررسی عملگرها بر اساس پردازش تصویر مطابق با سناریوی مطرح شده آزمایش هایی انجام شده است. آزمایش های پردازش تصویر به منظور بررسی میزان گسترش پلاسما در روی سطح دی الکتریک (Δx) و تعیین میزان شدت نور ساطع شده از محرک ها در مقیاس فضای رنگ خاکستری طراحی و اجرا شده اند. در ابتدا تصاویر ثبت شده از محرک ها در سرعت ها و ولتاژهای گوناگون جدا شده و سپس بررسی جداگانه هر محرک توسط نرم افزار هیستوگرام، توزیع شدت نور و توزیع طول پلاسما در طول محرک را به دست می دهد. سپس با متوسط گیری تمامی هیستوگرام های برای محرک در نقاط داده^۱ مورد نظر نتایج به دست آمده و برای مقایسه بهتر بی بعد شده و بر حسب درصد افزایش یا کاهش بر مبنای حالت پایه (کمترین ولتاژ و یا کمترین سرعت) رسم شده اند تا افزایش ها و یا کاهش ها معین گردند. در شکل ۹ نمونه ای از تخلیه گازی در لبه یک محرک تک و سپس تصویر ایجاد شده از آن توسط نرم افزار برای پردازش مشاهده می گردد.

¹ data point

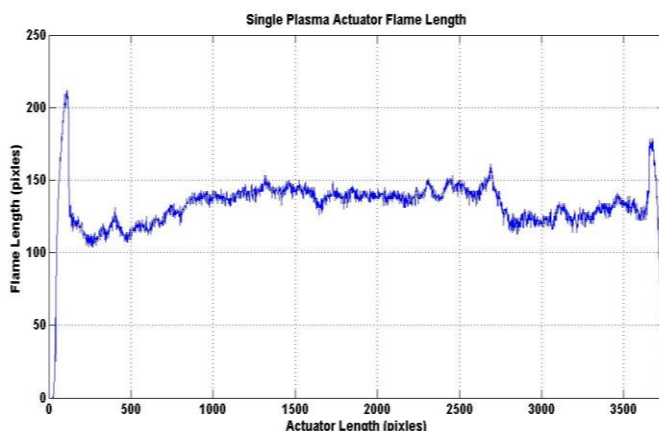


شکل ۹. تصویر شعله پلاسما و تصویر ایجاد شده توسط نرم‌افزار.

نمونه‌ای از هیستوگرام‌های توزیع گستردگی و شدت نور در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ دیده می‌شود. نکته قابل توجه این است که ابعاد تصویر در محور پایین بر حسب پیکسل بیان شده است. با توجه به سناریوی آزمون و وجود ۸ محرک در آرایه ۹۶ بار پردازش تصویر انجام شده است و برای هر پردازش تصویر دو نمودار به دست آمده است. یکی از نمودارها که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نمودار توزیع شدت نور در طول پلاسما است. بدین ترتیب می‌توان یکنواختی شعله و شدت نور بنفش را به دست آورد. نمودار دوم در شکل ۱۱ بیانگر توزیع طول شعله است. به عبارت دیگر با توجه به تصاویر محرک‌های پلاسما بیانگر کشیدگی نور بنفش آن است.



شکل ۱۰. هیستوگرام توزیع شدت نور در طول محرک پلاسما.



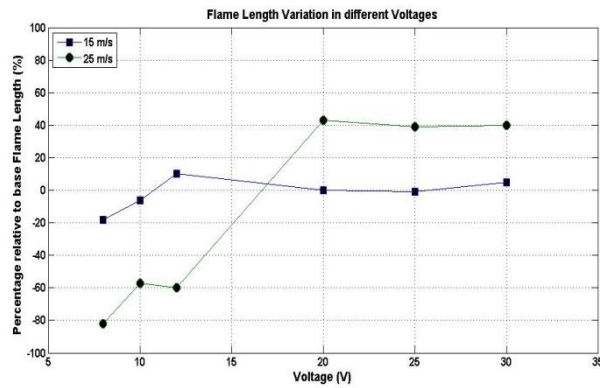
شکل ۱۱. توزیع طول گسترش پلاسما بر روی دی الکتریک در طول محرک پلاسما.

با مقایسه توزیع شدت نور و طول شعله می توان دریافت که هر جا که طول کاهش یافته شدت نور نیز کم می شود. این تفسیر تنها در حالتی صحیح است که شعله ایجاد شده یکنواخت باشد. یکنواختی شعله بدین مفهوم است که توزیع شعله در طول عملگر به طور یکنواخت صورت گیرد. در این همان همانگونه که تفسیر شد، با افزایش طول شعله، افزایش شدت نور و بالعکس اتفاق می افتد. اما در حالتی که توزیع شعله در طول عملگر یکنواخت نیست، رابطه بین طول شعله و شدت نور نیز لزوماً منطقی و صریح نیست. ممکن است رابطه طول و شدت نور مستقیم (با افزایش طول شعله، افزایش شدت نور اتفاق بیافتد) و یا معکوس (با کاهش طول شعله، افزایش شدت نور اتفاق بیافتد) و یا اتفاقی باشد. در این حالت پلاسمای ایجاد شده به حالت درخشش^۱ بوده و از نظر کیفیت پلاسما مناسب نیست و به جای استفاده انرژی برای تولید باد یونی در حالت تولید نور فرابنفش است. لذا می توان کیفیت و یکنواختی پلاسمای تولیدی را بدین ترتیب بررسی نمود. نمودارهای مربوط به مقایسه تأثیر دو پارامتر سرعت جریان آزاد و ولتاژ تحریک بر شدت نور پلاسما و گسترش طولی آن در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ قابل مشاهده می باشند. در این نمودارها اعداد محور عمودی نسبت به حالت پایه بی بعد شده اند.

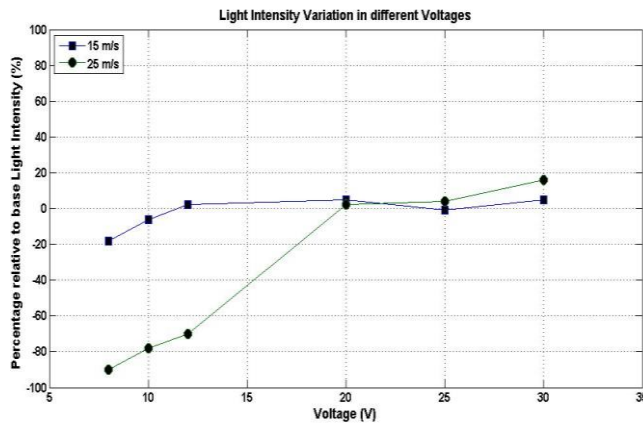
^۱ Glow



۷۰ / بررسی کارایی محرک‌های تخلیه سدّی الکتریک در کنترل جریان به روش پردازش تصویر



شکل ۱۲. تغییر طول گسترش پلاسما در ولتاژهای گوناگون در دو سرعت ۱۵ و ۳۵ متر بر ثانیه (اثر ولتاژ).



شکل ۱۳. تغییر شدت نور پلاسما در ولتاژهای گوناگون در دو سرعت ۱۵ و ۳۵ متر بر ثانیه (اثر ولتاژ).

همان‌طور که از نمودارها مشخص است ولتاژهای بالاتر در سرعت بالاتر (به دلیل کاهش فشار دینامیک) باعث افزایش شدت نور پلاسما و گسترش آن شده‌اند. البته همان‌طور که از داده‌های توزیع فشار متوجه شدیم این امر لزوماً به معنای افزایش عملکرد محرک پلاسما نیست بدین معنا که شدت درخشش پلاسما (نه گسترش طولی پلاسما روی دی الکتریک) رابطه مستقیمی با کارایی محرک پلاسما در افزایش ضریب فشار هنگام

جداسازی ندارد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه در ک صحیحی از ایجاد باد یونی یا درخشش پلاسمایی نداریم نمی توانیم به طور حتم افزایش شدت نور بنفش را به عملکرد پلاسمای ربط دهیم. اما با این حال و با فرض عدم تشکیل درخشش پلاسمای افزایش ولتاژ سبب افزایش عملکرد پلاسمای و افزایش طول شعله می شود. در ولتاژهای پایین پلاسمای به این دلیل که شعله ها منقطع ایجاد می شود نمودار طول بر حسب ولتاژ شیب منفی دارد. در ولتاژهای بالا نیز افزایش ولتاژ بیش از ۲۵ کیلوولت تاثیری نداشته و شدت نور تولیدی بیش از این افزایش نخواهد یافت. طول شعله ها نیز به همین ترتیب عمل خواهد کرد. به طور خلاصه عملگرها تا ولتاژی در حدود ۱۵ کیلوولت با افزایش ولتاژ نه تنها بهتر عمل می کنند بلکه با افزایش ولتاژ عملگر پلاسمای بدتر می شود. از ولتاژ ۱۵ تا ۲۵ ولت با افزایش ولتاژ طول شعله و شدت نور و به طور کلی کیفیت پلاسمای افزایش می یابد. ولتاژهای بیش از ۲۵ کیلوولت نیز تأثیر چندانی روی عملکرد پلاسمای ندارند. به علاوه محرک های پلاسمای در سرعت های پایین تر عملکرد بهتری دارند.

با توجه به تحلیل های ارائه شده قابل درک است که با افزایش سرعت و به عبارت دیگر افزایش فشار دینامیکی، در محدوده آزمایش شده، کارایی محرک های تخلیه سد دی الکتریک کاهش می یابد. این بدین معنا است که محرک ها با افزایش سرعت، تکانه مناسبی در آرایش ذکر شده ایجاد نمی کنند و نیاز به تغییر آرایش آرایه است. به علاوه با توجه به نمودارها، ولتاژ تخلیه ۲۰ کیلوولت، بیشینه ولتاژ تخلیه مناسب توصیف می شود. با افزایش ولتاژ تخلیه بیش از ۲۰ کیلوولت عملاً در هیچ فشار دینامیکی، افزایش کارایی نداریم. لذا می توان ۲۰ کیلوولت را ولتاژ طراحی آمپلی فایر و بیشینه ولتاژ تخلیه محرک ها توصیف نمود. از طرفی با توجه به نمودارهای فشار دینامیکی (سرعت) قابل بیان است که با تغییر فشار دینامیکی بر روی بیشینه ولتاژ تخلیه تغییری صورت نگرفته و این بیشینه ولتاژ تابعی از فشار دینامیکی نیست. امکان این پدیده نیز وجود دارد که در محدوده دیگری از فشارهای دینامیکی این نتیجه گیری نقض شود. با توجه به تحلیل ها و نمودارها ولتاژ تخلیه ۲۰ کیلوولت جدای از سرعت جریان (فشار دینامیکی) سطح ولتاژ بیشینه تخلیه محرک های تخلیه سد دی الکتریک است.

۵- نتیجه‌گیری

طراحی آمپلی‌فایر مناسب برای تأمین ولتاژ تخلیه موردنیاز محرک‌ها، یکی از گلوگاه‌های استفاده از محرک‌های تخلیه سد دی‌الکتریک در کنترل پدیده‌های آئرو‌دینامیکی در صنعت هوافضا است. زیرا ولتاژ خروجی آمپلی‌فایرها محدود بوده و امکان طراحی آمپلی‌فایر با ولتاژ خروجی زیاد به نحوی که پاسخگوی بازه زیادی در محرک‌ها باشد، سبب افزایش حجم و جرم آمپلی‌فایرها می‌شود. با توجه به این که جرم و حجم پارامترهای بسیار مهم در هوافضا می‌باشند، می‌بایست آمپلی‌فایرها در حداقل جرم و حجم و تنها در بازه مناسب محرک باشند. تعیین حداکثر ولتاژ تخلیه محرک‌ها به عواملی چون آرایش آرایه‌ها، تعداد، طول و جنس الکتروود و دی‌الکتریک و عوامل بسیار زیادی وابسته است. با افزایش ولتاژ تخلیه در رو سر الکتروودهای پلاسمایی، تکانه تولیدی آن‌ها و در نتیجه قدرت کنترلی آن‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش تا بیشینه ولتاژ خاصی صحیح بوده و بیش از آن، تکانه بیشتری تولید نمی‌شود. لذا با توجه به عدم افزایش کارایی محرک‌ها در ولتاژهای بالاتر از حدی خاص و افزایش حجم و جرم آمپلی‌فایرها با افزایش ولتاژ خروجی، محاسبه حد بیشینه ولتاژ تخلیه و طراحی آمپلی‌فایر بر این مبنا بسیار مهم و ضروری است. با توجه به این که شعله‌های پلاسما از نظر طول و شدت نور به نوعی بیانگر تکانه تولیدی مورد نیاز برای کنترل جریان است، می‌توان از پردازش تصویر و بررسی شعله‌ها در تعیین کارایی محرک‌های تخلیه سد دی‌الکتریک و ولتاژ تخلیه بیشینه آن‌ها استفاده نمود.

در این پژوهش و با توجه به مشخصات آرایه، حداکثر ولتاژ تخلیه ۲۰ کیلوولتی در فرکانس ۱۶ مگاهرتز برای تولید تکانه توسط روش پردازش تصویر محاسبه شد. به علاوه تأثیر فشار دینامیکی بر روی بیشینه ولتاژ تخلیه نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است با تغییر مشخصات آرایه‌ها و پارامترهایی مانند فرکانس سیگنال متناوب، رطوبت، فشار استاتیکی، دما و غیره بیشینه ولتاژ تخلیه تغییر می‌کند. لذا بررسی این پارامترها در محاسبه بیشینه ولتاژ تخلیه محرک‌ها می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که، پردازش تصویر صورت گرفته بر روی شعله‌های پلاسما در محدوده نور مرئی بوده است. در حالی که یکی از تولیدات محرک‌های پلاسمای پایه، اشعه فرابنفش

است. نور بنفش پلاسما نیز در محدوده مرئی بوده است، در حالی که بررسی محدود نامرئی صورت نپذیرفته است. این موضوع می تواند اشکال عمده روش ارائه شده باشد، به نوعی که ممکن است با نتایج بررسی ها نیز مغایرت داشته باشد. به علاوه در صورتی که نتایج در بررسی نامرئی با بررسی ها حوزه مرئی مغایرت داشته باشد و لزوم بررسی در حوزه نامرئی اثبات شود، با توجه به تجهیزات پیشرفته تر در حوزه بررسی نامرئی می تواند اصل روش را که بر مبنای سادگی تجهیزات بوده با چالش مواجه سازد. لذا بررسی در حوزه نامرئی ضروری به نظر می رسد و ممکن است نتایج را به کلی تغییر دهد.

۶- تشکر و قدردانی

از آقای دکتر محمود مانی به علت در اختیار گذاشتن آزمایشگاه آئرو دینامیک دانا دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر و کمک های علمی ایشان سپاسگزار هستیم. به علاوه از آقای مهندس عطا قاسمی برای طرح تست های آئرو دینامیکی نیز تشکر می شود.

۷- منابع

- [1] M. Gad El Hak; “*Flow Control: Passive, Active and Reactive Flow Management*”; 1st Edition, Cambridge University Press (1999).
- [2] J. Flatt; “*The History of Boundary Layer Control Research in the United States of America, in Boundary Layer and Flow Control*”; ed. G. V. Lachmann, Vol. 1, Pergamon Press, New York (1961) ۱۴۳-۱۲۲ .
- [3] J.R. Roth, D.M. Sherman, and S.P. Wilkinson; “Electrohydrodynamic Flow Control with a Glow-Discharge Surface Plasma”; *AIAA Journal*, **38**, No.7 (2000) 1166-1172.
- [4] T.C. Corke, C.L. Enloe, and S.P. Wilkinson; “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control”; *Annual Reviews of Fluid Mechanics* **42** (2010) 505-529.
- [5] C. Enloe, T. McLaughlin, R. VanDyken, K. Kachner, E. Jumper, and T. Corke; “Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology”; *AIAA Journal* **42**, No. 3 (2004) 589-594.

- [6] U. Kogelschatz; "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications"; *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **23**, No.1 (2003) 1-46.
- [7] M. Forte, J. Joilibois, J. Pons, E. Moreau, G. Touchard, and M. Cazalens; "Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity: Application to Airflow Control"; *Experiments in Fluids* **43**, No. 6 (2007) 917-928.
- [8] T. Corke, M. Post, and D. Orlov; "Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications"; *Experiments in Fluids* **46**, No. 1 (2009) 1-26.
- [9] W. Kim, H. Do, G. Mungal, and M. Cappelli; "On the Role of Oxygen in Dielectric Barrier Discharge Actuation of Aerodynamic Flows"; *Applied Physics Letters* **91**, No. 18 (2007) 181501.
- [10] N. Benard, N. Balcon, and E. Moreau; "Electric wind produced by a surface dielectric barrier discharge operating in air at different pressures: aeronautical control insights"; *Journal of Physics D: Applied Physics* **41**, No. 1 (2008) 042002.
- [11] R. Anderson and S. Roy; "Preliminary experiments of barrier discharge plasma actuators using dry and humid air"; *AIAA* (2006) paper.0369.
- [12] T. Abe, Y. Takizawa, and S. Sato; "A parametric experimental study for momentum transfer by plasma actuator," *AIAA* (2007) paper.187.
- [13] J.A. Valerioti and T.C. Corke; "Pressure Dependence of Dielectric Barrier Discharge Plasma Flow Actuators", *AIAA Journal* **50**, No. 7 (2012) 1490-1502.
- [14] J. Kriegseis, S. Grundmann and C. Tropea; "Power Consumption, discharge capacitance and light emission as measures for thrust production of dielectric barrier discharge plasma actuators"; *J. Appl. Phys.* **110**, No. 1 (2011) 013305.
- [15] T. Chen and L. Xia; "*Digital image processing*"; Beijing: Posts & Telecommunications Press (1994).
- [16] Y. Zhu and C. Huang; "An Adaptive Histogram Equalization Algorithm on the Image Gray Level Mapping"; *International Conference on Solid State Devices and Materials Science, Physics Procedia* (2012) 25.