بررسی تجربی اثر متغیرهای هندسی و الکتریکی بر عملکرد محرکهای پلاسمایی DBD در رژیم یکنواخت و رژیم رگهای تخلیهی پلاسما

محمدصادق دالوند دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران مسعود ابراهیمی^{*} استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران غلامحسین پوریوسفی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیدہ

یکی از روشهای کارآمد کنترل فعال جریان که در دهدی گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است، استقاده از محرکهای پلاسمایی المحایی المحرودها، (DBD) discharge (محر) است. در این مقاله برای یافتن وضعیت بهینه عملکرد محرکهای پلاسمایی، اثر تغییر متغیرهای هندسی (فاصلهی بین الکترودها، ضخامت دیالکتریک و پهنای الکترود پوشیده) و متغیرهای الکتریکی (ولتاژ و فرکانس) بر سرعت جریان القایی و توان مصرفی به طور جامع بررسی تجربی شده است. مقاله حاضر نخستین پژوهشی است که در آن به منظور شناسایی اثر متقابل بین متغیرها از اصول طراحی آزمایشها استفاده شده است. طبق نتایج، مشاهده شد هر کدام از متغیرهای بالا اثر متفاوتی روی شروع تخلیهی یکنواخت پلاسما، سرعت جریان القایی، توان مصرفی و شروع رگهای شدن تخلیهی مشاهده شد هر کدام از متغیرهای بالا اثر متفاوتی روی شروع تخلیهی یکنواخت پلاسما، سرعت جریان القایی، توان مصرفی و شروع رگهای شدن تخلیهی پلاسما دارند و در رژیم رگهای برخلاف رژیم یکنواخت، با افزایش توان مصرفی، سرعت جریان القایی کاهش می یابد. نتایج این پژوهش می تواند در انتخاب محرک بهینه که در آن نسبت سرعت جریان القایی به توان مصرفی بیشینه است و همچنین جلوگیری از ورود به رژیم رگهای به کار رود.

Experimental Investigation of the Effect of Geometrical and Electrical Variables on the Performance of the DBD Plasma Actuators in Uniform and Filamentary Regimes

M. S. Dalvand	Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
M. Ebrahimi	Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
G. Pouryoussefi	Aerospace. Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

DBD plasma actuators are one of the effective devices for active flow control, which has received substantial attention during the last decade. In this paper, to find the optimum performance of plasma actuators, the effect of geometrical variables (including the gap between electrodes, dielectric thickness, and covered electrode width) and electrical variables (including voltage and frequency) on induced flow velocity and power consumption, is experimentally investigated. This is the first investigation in which design of experiment (DOE) approach is used to find the interaction among variables. The results show that each of the mentioned variables has a different effect on the start of uniform plasma discharge, induced flow velocity, power consumption, and the start of the filamentary plasma discharge regime. Furthermore, the results show that unlike the uniform discharge regime, in filamentary discharge regime increasing power consumption results in decreased induced flow velocity. The results of this investigation can be used to select the optimum actuator in which the ratio of induced flow velocity to power consumption is maximum, and to prevent from entering the filamentary discharge regime.

Keywords: DBD Plasma actuator, Induced velocity, Power consumption, Design of experiments.

۱– مقدمه

روشهای فعال، مانند استفاده از جتهای مصنوعی و یا مکش سطحی، اگر چه انرژی مصرف میکنند اما قابل کنترل هستند و میتوان به طور دلخواه آنها را خاموش و یا روشن کرد. این ویژگی سبب انعطاف بیشتر روشهای فعال و توجه روزافزون پژوهشگران به این روشها شده است [1].

یکی از روشهای جدید و رو به گسترش کنترل فعال جریان، استفاده از محرکهای پلاسمایی DBD است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این محرکها از دو الکترود مستطیلی نازک تشکیل شدهاند که یکی از این دو الکترود در معرض هوا قرار می گیرد و دیگری توسط یک مانع دی الکتریک پوشیده می شود. با اعمال یک ولتاژ متناوب مناسب به الکترودها، یک میدان الکتریکی قوی تشکیل می شود، که این میدان ابتدا هوای بالای الکترود پوشیده شده را یونیزه توانایی کنترل میدان جریان، به منظور ایجاد یک تغییر دلخواه، اهمیت بالایی در مکانیک سیالات دارد. هر فرایندی که باعث شود لایهی مرزی یک جریان سیال رفتاری متفاوت از خود نشان دهد، کنترل جریان نامیده میشود. هدف از کنترل جریان میتواند جلوگیری یا تشدید جدایش جریان، تاخیر یا جلو انداختن گذار جریان آرام به آشفته و یا تضعیف یا تقویت آشفتگی باشد. با توجه به مصرف انرژی، کنترل جریان را میتوان به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در روشهای غیرفعال، مانند استفاده از مولدهای گردابهی ثابت و یا دندانهای کردن سطوح، نیازی به مصرف انرژی نیست اما این روشها فقط برای شرایط به خصوصی کاربرد دارند و برای مثال با تغییر عدد رینولدز یا زوایهی حمله کارآیی خود را از دست میدهند. از طرف دیگر

^{*} نويسنده مكاتبه كننده، آدرس پست الكترونيكي: ebrahimikm@modares.ac.ir تاريخ دريافت: ۹۴/۰۹/۲۲ تاريخ پذريش: ۱/۱۸ ۹۵۰

و تبدیل به پلاسما کرده، سپس آن را در راستای الکترود پوشیده شتابدهی میکند. ذرات باردار شتابدار در حین حرکت به ذرات خنثای هوا برخورد کرده و باعث انتقال مومنتوم به هوای اطراف میگردند. به عبارت دیگر، یک نیروی حجمی به هوای اطراف وارد میشود که این نیرو مکانیزم مورد استفاده در کنترل فعال جریان است [۲].



نداشتن قطعهی متحرک، قابلیت اطمینان بالا، زمان پاسخ بسیار کوتاه، توان مصرفی پایین، سادگی نصب و وزن بسیار پایین از جمله ویژگیهای این محرک است.

در یک دستهبندی کلی، تحقیقات انجام شده در زمینهی محرک پلاسمایی را میتوان به دو بخش تقسیم کرد. در پژوهشهای دستهی اول، کاربرد محرکهای پلاسمایی در کنترل جریان مورد بررسی قرار میگیرد. محرکهای پلاسمایی کارایی بالای خود را در کنترل جربان هوا تا سرعتهایی به میزان ۳۰ m/s و در برخی موارد تا حدود گشری از ۱۱۰ و بیشتر، نشان دادهاند. کارایی این محرکها در تعداد کثیری از کاربردهای معروف آیرودینامیکی بررسی شدهاست که از این میان یرفویل، و همچنین به جتهای آزاد و لایههای اختلاطی اشاره کرد. در پژوهشهای دسته دوم، مشخصات هندسی و الکتریکی محرکهای پلاسمایی در غیاب جریان هوا مورد بررسی قرار میگیرد. نتایج این بخش برای بهینهسازی و شناخت بهتر محرکها و همچنین بالا بردن کارایی آنها در کنترل جریان ضروری است [۳]. اکثر تحقیقات صورت بردسی باد یونی القایی در غیاب جریان هوا مورو است [۳]. اکثر تحقیقات صورت

هدف پژوهشهای دستهی دوم تغییر آرایش خطوط میدان الکتریکی و گرادیان آن به گونهای است که اولا چگالی تعداد یون موجود در پلاسما افزایش یابد و ثانیا یونها با بالاترین سرعت ممکن شتابدهی شوند و در نتیجه بیشترین مومنتوم ممکن را به هوای خنثای اطراف منتقل کنند. از دیگر اهداف این پژوهشها این است که توان الکتریکی ورودی تا آنجا که ممکن است به توان مکانیکی هوای خنثای اطراف تبدیل شود. برای این منظور باید اتلافاتی مثل گرمایش دیالکتریک کمینه شوند [۴]. علاوه بر این همانطور که در مراجع [۴ و از حالت یکنواخت به حالت رگهای تبدیل میشود، با افزایش بیشتر توان مصرفی، میانگین سرعت جریان القایی کاهش مییابد. بنابراین باید از اتلافات ناشی از ورود به رژیم رگهای¹ نیز جلوگیری شود.

متغیرهای موثر بر میزان سرعت جریان القایی و توان مصرفی را میتوان به چهار دسته زیر تقسیم کرد:

- متغیرهای هندسی مانند پهنای الکترودها، ضخامت دیالکتریک و فاصلهی بین الکترودها، مطابق شکل ۳
 - متغیرهای ساختاری مانند جنس دیالکتریک
 - متغیرهای محیطی مانند فشار، دما و رطوبت نسبی محیط



شکل ۲- تبدیل رژیم یکنواخت تخلیهی پلاسما به رژیم رگهای با افزایش ولتاژ در محرک پلاسمایی DBD [۷]



شکل ۳- متغیرهای هندسی اصلی یک محرک پلاسمایی DBD [۴]

محققان فراوانی به بررسی اثر این متغیرها پرداختهاند اما به طور کلی این پژوهشها دارای معایب زیر هستند:

- این بررسیها با رهیافت یک عامل در هر زمان^۲ بدست آمدهاند. در این نوع رهیافت ابتدا برای تمامی متغیرها یک مقدار پایه در نظر گرفته میشود و برای بررسی اثر یک متغیر، سایر متغیرها را در مقدار پایهشان ثابت نگه میدارند و متغیر مورد بررسی را در محدودهی مورد نظر، تغییر میدهند. عیب این رهیافت در نظر نگرفتن اثر متقابل^۳ احتمالی بین متغیرها است [۸]. به عبارت دیگر، لزومی ندارد اثری که تغییر یک متغیر روی سرعت جریان القایی و یا توان مصرفی دارد به ازای مقادیر کوچک و بزرگ یک متغیر دیگر، یکسان باشد. برای مثال ممکن است به ازای مقادیر کوچک متغیر دوم، افزایش متغیر اول باعث افزایش سرعت گردد در حالی که به ازای مقادیر بزرگ متغیر دوم، افزایش متغیر اول باعث کاهش سرعت گردد. در این صورت بین این دو متغیر اثر متقابل وجود خواهد داشت.
- در این پژوهشها تنها به مطالعهی رفتار سرعت جریان القایی به واسطهی تغییر مقدار سایر متغیرها پرداخته شده است و تنها در چند مورد خاص تغییرات توان مصرفی بررسی شده است.

متغیرهای الکتریکی مانند ولتاژ، فرکانس و شکل موج ولتاژ

² one-factor-at-a-time approach

³ interaction

¹ filamentary regime

در پژوهش حاضر تمامی مشکلات بالا برطرف شده است. برای این منظور بجای رهیافت یک عامل در هر زمان، از رویکرد عاملی کامل^۱ استفاده شده است. در این رهیافت به جای تغییر یک متغیر در هر زمان، متغیرها به طور همزمان تغییر داده میشوند و همهی حالات بررسی میشود. همچنین در تمامی آزمایشها سرعت جریان القایی و توان مصرفی به طور همزمان و تا اندکی پس از ورود به رژیم رگهای اندازهگیری شدهاند.

در ادامه در قسمت ۲، جزئیات آزمایشگاهی و متغیرهای مورد بررسی معرفی شده، در قسمت ۳ تشریح و بررسی نتایج صورت گرفته، و در نهایت در قسمت ۴، نتیجهگیری و پیشنهادها ارائه شده است.

۲- جزئیات آزمایشگاهی

در شکل ۴ نمای کلی منبع تغذیهی مورد استفاده در پژوهش حاضر و وسایل اندازه گیری الکتریکی شامل اسیلوسکوپ و مولتیمتر نشان داده شده است. منبع تغذیهی مورد استفاده دارای جریان متناوب ولتاژ قوی با شکل موج سینوسی و ماکزیمم ولتاژ پیک تا پیک KV ۷۰ و ماکزیمم فرکانس حامل ۳۰ kHz است.



شکل ۴- نمای کلی منبع تغذیه و وسایل اندازهگیری الکتریکی [۷]

در طول آزمایشها، از یک اسیلوسکوپ دیجیتال (GW INSTEK GDS-1072-U) برای اندازه گیری دامنه یولتاژ اعمالی، از یک مولتیمتر دیجیتال برای اندازه گیری فرکانس حامل (VICTOR VC97) و از یک مولتیمتر دیجیتال دیگر (True RMS (Mastech MS8226T) برای اندازه گیری مقدار مؤثر جریان استفاده شده است. برای این منظور مولتیمتر اول به صورت فرکانس سنج تنظیم و به سیگنال خروجی اسیلاتور وصل گردیده است. همچنین مولتیمتر دوم به صورت سری بین الکترود پوشیده شده و کابل اتصال به زمین قرار گرفته است.

¹full factorial approach

در این پژوهش اثر متغیرهای ولتاژ، فرکانس، فاصلهی بین الکترودها، ضخامت دیالکتریک و پهنای الکترود پوشیده بررسی شده است. در جدول ۱ و ۲ سطوح^۲ مورد بررسی هر متغیر آورده شده است.

جدول ۱- سطوح متغیرهای الکتریکی مورد بررسی		
فرکانس حامل (kHz)		
{17,117,11,}		

توجه شود که شروع تخلیهی پلاسما و ورود به رژیم رگهای تابع متغیرهای مختلف است، بنابراین سطوح ابتدایی و انتهایی ولتاژ لزوما مطابق جدول ۱ نیست.

جدول ۲- سطوح متغیرهای هندسی مورد بررسی

پهنای الکترود	ضخامت	فاصلهی بین
پوشیده	دیالکتریک	الکترودها
(cm)	(mm)	(mm)
{٢/٥ .١/٥ .٠/٥}	{7 , 4 , 7}	{0 .1/0}

الکترودهای مورد بررسی در این پژوهش از جنس مس و به ضخامت μm ۵۰ و طول ۲۵ Cm انتخاب شده است. سایر متغیرهای الکتریکی و هندسی در تمامی آزمایشها ثابت در نظر گرفته شده است. برای مثال شکل موج ولتاژ به صورت سینوسی و پهنای الکترود در معرض هوا ۲۵ در نظر گرفته شده است. همچنین در تمامی آزمایشها مانع دی الکتریک از جنس پلکسی گلس با ولتاژ شکست آزمایشها مانع دی الکتریک از جنس پلکسی گلس با ولتاژ شکست شده است.



شکل ۵- نمایی از محرک پلاسمایی در آرایش هندسی w₂ = 2.5 cm و t = 5 mm ،t = 4 cm

٩٧

در طول آزمایشها، از یک دستگاه میکرومانومتر دیجیتال مدل Testo 0560-5126 و از یک میکرولوله سیلیکونی به عنوان لولهی پیتوت به قطر mm ۰/۵ mm برای اندازه گیری سرعت جریان القایی در میدان پلاسما استفاده شده است. دقت میکرومانومتر مورد استفاده برابر با ۲۹ ۰/۱ طو مناسب برای اندازه گیری سرعتهای پایین است.

همانطور که در مراجع [۴ و ۵] توضیح داده شده است، با تغییر متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش، مکان سرعت بیشینه در راستای عمود بر سطح تغییر نکرده و فقط اندازهی آن تغییر می کند. به عبارت دیگر تمامی پروفیلهای سرعت، دارای بیشینهای در فاصلهی حدودا mm ۵/۰ از سطح دیوار هستند. برای مثال در شکل ۶ اثر افزایش ولتاژ بر پروفیل سرعت جریان القایی نشان داده شده است.



همچنین با فاصله گرفتن از لبهی داخلی الکترود پوشیده، سرعت ماکزیمم ابتدا افزایش و پس از یک فاصلهی مشخص (۵ mm) کاهش مییابد. از این رو برای اندازه گیری سرعت بیشینه لایهی مرزی، مطابق شکل ۲. لولهی پیتو در فاصله ۳m ۸/۵ نسبت به سطح دیوار و mm ۵ پایین دست لبه داخلی الکترود پوشیده شده قرار داده شده است. تمامی دادهها پس از پایدار شدن شرایط سیال (به طور متوسط ۱۵ ثانیه بعد از اعمال تغییر) ثبت گردیده است.



شکل ۷- نمای جانبی محرک پلاسمایی و لولهی پیتوت [۷]

سرعت از معادلهی برنولی و به کمک رابطهی زیر تعیین می گردد:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$
(1)

که در این رابطه،

ps فشار استاتیکی (Pa)

(kg/m^3) چگالی هوا (p

با توجه به ثابت بودن چگالی، عدم قطعیت اصلی در اندازه گیری سرعت، مربوط به اندازه گیری فشار است که همانطور که قبلا توضیح داده شد، برای مانومتر مورد استفاده در این پژوهش مقدار آن برابر Pa +۰/۱ است.

۳- تشریح و بررسی نتایج

در این قسمت به ترتیب اثر متغیرهای ولتاژ، فرکانس حامل، فاصلهی بین الکترودها، ضخامت دیالکتریک و پهنای الکترود پوشیده بر سرعت جریان القایی، توان مصرفی الکتریکی، شروع تخلیهی یکنواخت پلاسما و شروع رگهای شدن تخلیهی پلاسما بررسی میشود.

$(f_{AC} \ e \ V_{pp})$ اثر ولتاژ و فرکانس (V_{pp} و

شکلهای ۸ و ۹، رفتار سرعت جریان القایی و توان مصرفی را به عنوان تابعی از ولتاژ و فرکانس نشان میدهد. در محرک شکل ۸، از دیالکتریک به ضخامت mm ۲، الکترود پوشیده شده به پهنای ۵ m ۵/۵۰ و آرایش لبهلب بین الکترودها استفاده شده است. اما در محرک شکل ۹، ضخامت دیالکتریک mm ۶، پهنای الکترود پوشیده شده mn ۱/۵ cm ۵ است.

با بررسی شکلهای ۸ و ۹، و همچنین آرایشهای هندسی مختلف دیگر، نتایج زیر مشاهده میشود:

در هر فرکانس با افزایش ولتاژ، سرعت جریان القایی ابتدا افزایش مییابد اما پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، پیوسته کاهش مییابد. مات این رفتار این است که ابتدا در رژیم یکنواخت تخلیه پلاسما، با افزایش ولتاژ، قدرت میدان الکتریکی افزایش مییابد اما پس از ورود به رژیم رگهای تخلیهی پلاسما، توان الکتریکی ورودی به جای تبدیل به توان مکانیکی سیال، به صورت نور و حرارت موضعی درون رگههای برافروخته، تلف میشود. توان مکانیکی سیال به کمک رابطهی زیر تعریف میشود [۳]:

$$P_{\rm mec} = \frac{1}{2}\rho L \int_0^\infty v^3(y) \, dy \tag{7}$$

که در این رابطه،

(W) توان مکانیکی سیال (Pmec

- (kg/m 3) چگالی هوا (ρ
- L طول الکترود (m) v سرعت جريان (m/s)
- v سرعت جریان (m/s)
 فاصلهی عمودی از سطح دیواره (m)

درون رگهها، پدیده انتقال بار و چگالی پلاسما به صورت موضعی افزایش مییابد. این امر باعث میشود که این رگهها نسبت به سایر نقاط محرک، برافروختهتر بشوند. از طرف دیگر، این پدیده باعث میشود در بیرون از رگهها، قدرت و چگالی پلاسما و نیز مقدار نیروی حجمی اعمالی به سیال کاهش یابد و در نهایت به طور کلی سرعت جریان القایی در سراسر طول محرک، کاهش یابد [۲].

- با افزایش فرکانس، شروع تخلیهی پلاسما و همچنین ورود به رژیم رگهای در ولتاژهای پایین تر رخ می دهد.
- در هر ولتاژ با افزایش فرکانس، سرعت جریان القایی افزایش مییابد اما پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، پیوسته کاهش مییابد (برای مثال در ولتاژ kV ۱۲ شکل ۸ – الف و یا ولتاژ N۹ kV شکل ۹ – الف این رفتار مشخص است). علت این امر مشابه اثر ولتاژ است.
- با افزایش ولتاژ، ورود به رژیم رگهای تخلیهی پلاسما در فرکانسهای پایین رخ میدهد.
- f_{AC} = 10 kHz • f_{AC} = 12 kHz 6 f_{AC} = 14 kHz • f_{AC} = 16 kHz Consumption (W/cm) 3 Power 2 0L 6 10 12 13 14 15 16 8 q 11 V_{PP} (kV) (ب)
- در هر فرکانس با افزایش ولتاژ، توان مصرفی پیوسته افزایش مییابد، چه در رژیم یکنواخت و چه در رژیم رگهای تخلیهی پلاسما. بنابراین شروع رگهای شدن تخلیهی پلاسما، برای عملکرد محرک مناسب نیست، زیرا علاوه بر کاهش سرعت جریان القایی، باعث افزایش توان مصرفی الکتریکی و در نهایت کاهش قابلیت محرک برای کنترل جریان میشود.
- در هر ولتاژ با افزایش فرکانس، توان مصرفی پیوسته افزایش می ابد.



شکل ۸- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و فرکانسهای مختلف w2 = 0.5 cm ،t = 2 mm برای آرایش هندسی d = 0 mm ،t = 2 mm





۳-۳- اثر فاصله بین دو الکترود (d)

شکلهای ۱۰ و ۱۱، رفتار سرعت جریان القایی و توان مصرفی را به عنوان تابعی از ولتاژ و فاصله بین دو الکترود نشان میدهد. در محرک شکل ۱۰، از دیالکتریک به ضخامت ۱۰ kHz الکترود پوشیده شده به پهنای ۲/۵ cm، و فرکانس ۲۸ استفاده شده است. اما در محرک شکل ۱۱، ضخامت دیالکتریک

۶، پهنای الکترود پوشیده شده CM cm و فرکانس ۱۲ kHz است. با بررسی شکلهای ۱۰ و ۱۱، و همچنین آرایشهای مختلف دیگر، نتایج زیر مشاهده میشود:

• در هر ولتاژ با افزایش فاصله بین دو الکترود، سرعت جریان

القایی کاهش می یابد. علت این رویه کاهش قدرت میدان الکتریکی و در نتیجه کاهش حرکت ذرات باردار به سمت الکترود پوشیده شده است [۴].

 افزایش فاصله بین دو الکترود میتواند باعث خارج شدن از رژیم رگهای تخلیهی پلاسما و در نتیجه افزایش سرعت گردد (برای

مثال در ولتاژ ۱۷ kV شکل ۱۰ - الف). علت این امر کاهش قدرت میدان الکتریکی است.

- با افزایش فاصله بین دو الکترود، شروع تخلیه و همچنین ورود به رژیم رگهای تخلیه در ولتاژهای بالاتر رخ میدهد.
- در هر ولتاژ با افزایش فاصله بین دو الکترود، توان مصرفی پیوسته
 کاهش می یابد.



شکل ۱۰- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و فواصل بین دو الکترود مختلف برای فرکانس f_{ac} = 10 kHz و w₂ = 2.5 cm و آرایش هندسی t = 4 mm



شكل ١١- رفتار الف) سرعت جريان القايى و ب) توان مصرفى واحد طول الكترود به ازاى ولتاژها و فواصل بين دو الكترود مختلف w2 = 1.5 cm براى فركانس f_{AC} = 12 kHz و w2 = 1.5 cm براى فركانس t = 6 mm

t) اثر ضخامت دیالکتریک (t)

شکلهای ۱۲، ۱۳ و ۱۴، رفتار سرعت جریان القایی و توان مصرفی را به عنوان تابعی از ولتاژ و ضخامت دیالکتریک نشان میدهد. در هر سه محرک از آرایش لببهلب بین دو الکترود و فرکانس kHz ۱۰ استفاده شده است اما پهنای الکترود پوشیده شده به ترتیب cm ۱۰/۵ cm ۱/۵ cm

با بررسی شکلهای ۱۲، ۱۳ و ۱۴، و همچنین آرایشهای مختلف دیگر، نتایج زیر مشاهده میشود:

در رژیم یکنواخت تخلیهی پلاسما، در هر ولتاژ با افزایش
 ضخامت دی الکتریک، سرعت جریان القایی کاهش می ابد. دلیل

این امر کاهش قدرت میدان الکتریکی و در نتیجه کاهش حرکت ذرات باردار به سمت الکترود پوشیده شده است.

- افزایش ضخامت دیالکتریک میتواند باعث خارج شدن از رژیم رگهای تخلیهی پلاسما و در نتیجه افزایش سرعت گردد (برای مثال در ولتاژ ۲۱ kV شکل ۱۲ – الف این رفتار مشاهده میشود) علت این امر کاهش قدرت میدان الکتریکی است.
- با افزایش ضخامت دیالکتریک، شروع تخلیهی پلاسما و همچنین ورود به رژیم رگهای تخلیهی پلاسما در ولتاژهای بالاتر رخ میدهد علت این رفتار نیز کاهش قدرت میدان الکتریکی است.

در ₂*W*های کوچک (شکلهای ۱۲ و ۱۳)، افزایش ضخامت دیالکتریک باعث میشود محرک دیرتر وارد رژیم رگهای تخلیهی پلاسما شود و بتوان با افزایش ولتاژ، قدرت میدان الکتریکی را بیشتر کرده و در نتیجه بتوان به سرعتهای بالاتری دست یافت. بنابراین در *2W*های کوچک اگرچه در ولتاژهای پایین، محرک با ضخامت دیالکتریک کمتر، سرعت بیشتری را القا میکند اما در ولتاژهای بالا، بیشترین سرعتی که میتوان بدان دست یافت مربوط به محرک با دیالکتریک ضخیم تر است. از طرف دیگر در *2W* بزرگتر (شکل ۱۴)، افزایش ضخامت دیالکتریک اگرچه ورود به رژیم رگهای تخلیهی پلاسما را به تاخیر میاندازد ولی باعث کاهش سرعت ماکزیمم میشود.

بنابراین در این ویژگی بین ضخامت دی الکتریک (t) و پهنای الکترود پوشیده شده (w₂)، اثر متقابل وجود دارد. به این معنی که اثر متغیر t روی سرعت جریان القایی به ازای w₂های کوچک و بزرگ یکسان نیست. علت این رویه در قسمت ۳-۴ و پس از بررسی اثر پهنای الکترود پوشیده شده توضیح داده میشود.

در هر ولتاژ با افزایش ضخامت دیالکتریک، توان مصرفی پیوسته
 کاهش می ابد.







شکل ۱۳- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و ضخامت دیالکتریک مختلف w2 = 1.5 cm و d = 0 mm برای فرکانس f_{AC} = 10 kHz و آرایش هندسی



شکل ۱۴- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و ضخامت دیالکتریک مختلف برای فرکانس 4_1 10 f_{AC} و f_{AC} و 10 kHz ف w₂ = 2.5 cm و d = 0 mm

(w₂) اثر پهنای الکترود پوشیده شده (-۳

شکلهای ۱۵، ۱۶ و ۱۷، رفتار سرعت جریان القایی و توان مصرفی را به عنوان تابعی از ولتاژ و پهنای الکترود پوشیده شده نشان میدهد. در هر سه محرک فاصلهی بین دو الکترود، ۲/۵ mm و فرکانس، ۱۴ kH انتخاب شده است اما ضخامت دیالکتریک به ترتیب ۴ mm ۶ mm است.

با بررسی شکلهای ۱۴۱۵، ۱۶ و ۱۷، و همچنین آرایشهای مختلف دیگر، نتایج زیر مشاهده میشود:

 وقتی دیالکتریک ضخیم است (شکلهای ۱۵ و ۱۶)، در رژیم یکنواخت تخلیهی پلاسما، در هر ولتاژ با افزایش پهنای الکترود پوشیده شده، سرعت جریان القایی ابتدا افزایش یافته و سپس در یک حد مشخص ثابت میماند. علت این رفتار این است که از یک سو با افزایش پهنای الکترود، ذرات باردار در مسیر طولانی تری شتابدار می شوند و در نتیجه سرعت بیشتری خواهند داشت. اما از سوی دیگر گسیل ثانویهی الکترونها که باعث خودپایداری پلاسما می شود، تضعیف می گردد و پلاسما نمی تواند بیشتر از یک حد مشخص گسترش یابد [۵]. در فرایند تخلیهی پلاسما، برخورد یک الکترون با یک ذرهی خنثی از هوا منجر به تولید دو الکترون و یک یون مثبت می شود. این دو الکترون نیز

با دو ذرهی خنثی دیگر برخورد میکنند و چهار الکترون تشکیل میدهند و این رویه ادامه پیدا میکند. این نوع گسیل الکترون، گسیل ثانویه نامیده میشود.

- وقتی دیالکتریک نازک است (شکل ۱۷)، با افزایش پهنای الکترود، سرعت جریان القایی بر خلاف دو حالت قبل، اشباع نمی شود. و به عبارت صحیح تر احتمالا در الکترود پوشیده شدهی پهن تری نسبت به حالت های قبل، اشباع می گردد. علت این امر افزایش قدرت میدان الکتریکی با نازک شدن دی الکتریک است.
- از اثر متقابل موجود بین ضخامت دیالکتریک و پهنای الکترود پوشیده شده، میتوان نتیجه گرفت که در هر ضخامتی از دیالکتریک، یک پهنای الکترود پوشیده بحرانی وجود دارد که با افزایش پهنای الکترود بیشتر از آن، سرعت جریان القایی اشباع شده و دیگر افزایش پیدا نمیکند. در این حالت هرچه ضخامت دیالکتریک کمتر باشد، پهنای الکترود بحرانی بیشتر خواهد بود.
- افزایش پهنای الکترود پوشیده شده، توان مصرفی را به میزان
 اندکی افزایش میدهد.



شکل ۱۵- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و پهنای الکترود پوشیده شده مختلف d = 2.5 mm و t = 6 mm و آرایش هندسی f_{ac} = 14 kHz و آرایش هندسی



شکل ۱۶- رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و پهنای الکترود پوشیده شده مختلف d = 2.5 mm و t = 4 mm و آرایش هندسی f_{AC} = 14 kHz و



شکل ۱۷– رفتار الف) سرعت جریان القایی و ب) توان مصرفی واحد طول الکترود به ازای ولتاژها و پهنای الکترود پوشیده شده مختلف برای فرکانس f_{AC} = 14 kHz و آرایش هندسی d = 2.5 mm و t = 2 mm

۴- نتیجهگیری

بررسى تجربى اثر متغيرهاى هندسى و الكتريكى بر عملكرد محر كهاى پلاسمايى

در پژوهش حاضر، برای اولین بار با استفاده از رویکرد عاملی کامل، رفتار محرک پلاسمایی DBD به عنوان تابعی از متغیرهای الکتریکی و هندسی به صورت تجربی مطالعه و نواقص کارهای قبلی در این زمینه پوشش داده شد. اندازه گیریهای سرعت جریان القایی نشان داد که در رژیم یکنواخت تخلیهی پلاسما، با افزایش ولتاژ، فرکانس و پهنای الكترود يوشيده شده، سرعت جريان القايي افزايش پيدا ميكند. اما افزایش فاصلهی بین دو الکترود و ضخامت دی الکتریک منجر به کاهش سرعت خواهد شد. همچنین نشان داده شد با افزایش ولتاژ و فرکانس پس از یک مقدار معین تخلیهی پلاسما وارد رژیم رگهای شده و سرعت کاهش می یابد. در این حالت با کاهش فاصله ی بین دو الکترود و یا افزایش ضخامت دیالکتریک میتوان از رژیم رگهای خارج و سرعت را افزایش داد. از طرف دیگر استفاده از رویکرد عاملی باعث شد تا اثر متقابل بین ضخامت دیالکتریک و پهنای الکترود پوشیده شده شناسایی و نشان داده شود که در هر ضخامتی از دیالکتریک، یک پهنای الکترود پوشیده بحرانی وجود دارد که با افزایش پهنای الکترود بیشتر از آن سرعت جریان القایی اشباع شده و دیگر افزایش پیدا نمی کند. در این حالت هرچه ضخامت دی الکتریک کمتر باشد، پهنای الكترود بحراني بيشتر خواهد بود. تشخيص اين رفتار بدون استفاده از رویکرد عاملی ممکن نبود. همچنین بررسی توان مصرفی نشان داد که در رژیم یکنواخت تخلیهی پلاسما، تغییراتی که باعث افزایش سرعت میشوند، توان مصرفی را نیز افزایش میدهند، هرچند تغییرات پهنای الكترود پوشيده تاثير چنداني روى توان مصرفى ندارد. اين رفتار در رژیم رگهای تخلیهی پلاسما برعکس می شود. به عبارت دیگر در این رژیم، تغییراتی که باعث کاهش سرعت میشوند، توان مصرفی را افزایش میدهند. بنابراین باید از ورود به رژیم رگهای جلوگیری نمود.

۵- مراجع

 Gad-el-Hak M., Flow Control: Passive, active and reactive flow management, Cambridge University Press, New York, 2007.
 Corke T. C., Post M. L., and Orlov D. M., Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications, Experiments in Fluids, Vol. 46, No. 1, pp. 1-26, 2009.

[3] Moreau E., Airflow control by non-thermal plasma actuators, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40, No. 3, pp. 605-636, 2007.

[4] Roth J. R., Dai X., Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 2006.

[5] Forte M., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., and Cazalens M., 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, Vol. 43, No. 6, pp. 917-928, 2007.

[6] Thomas, F. O., Corke, T. C., Iqbal, M., Kozlov, A. and Schatzman, D., Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control, AIAA Journal, Vol. 47, No. 9, pp. 2169-2178, 2009.

[7] Pouryoussefi S. G., and Mirzaei M., Experimental Study of the Unsteady Actuation Effect on Induced Flow Characteristics in DBD Plasma Actuators, Plasma Science and Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 415-424, 2015.

[8] Montgomery D. C., Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2012.