

بررسی تجربی تأثیر ابعاد لوله و چیدمان الکترودها در جت پلاسمای سرد DBD فشار اتمسفری بر روی مشخصات جت پلاسمای آرگون

زهره کاظم

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
zohreh.kazem@yahoo.com

غلامحسین پوریوسفی*

استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
pouryoussefi@kntu.ac.ir

چکیده

فناوری پلاسمای سرد فشار اتمسفری (CAPP) که به سرعت در حال توسعه است، علاوه بر کاربردهای گسترده در تحقیقات زیستی، در حوزه‌های زیست-فناوری، ایمنی و فرآوری مواد غذایی، کشاورزی و پزشکی نیز به‌طور فعال مورد استفاده قرار گرفته است. تنوع زیاد در پیکربندی دستگاه‌های پلاسما و چیدمان الکترودها، زمینه را برای کاربردهای پلاسمای غیرحرارتی در درمان نمونه‌های زیستی مختلف و سطوح با ابعاد متنوع فراهم کرده است. یکی از انواع جت‌های پلاسمای سرد فشار اتمسفری، جت پلاسمای تخلیه با مانع دی‌الکتریک (DBD) است که در سال‌های اخیر توجه فراوانی را به خود جلب کرده است. در این مقاله، تشکیل جت پلاسمای سرد DBD فشار اتمسفری با استفاده از گاز خنثی آرگون در سه لوله با ابعاد مختلف و سه نوع چیدمان الکترودی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، تأثیر ولتاژ اعمالی، ابعاد لوله و چیدمان الکترودها بر طول ستون جت آرگون ارزیابی شده و پارامترهای فیزیکی ستون پلاسما، از جمله ولتاژ تخلیه، میانگین دمای گاز و دمای شکاف تخلیه، تحلیل شده‌اند. نتایج تجربی نشان داد که افزایش ولتاژ یا نرخ جریان در محدوده‌های پایین، موجب همگن‌تر شدن شکل ستون‌های پلاسمایی و افزایش طول آن‌ها می‌شود. همچنین، دمای شکاف تخلیه و محیط اطراف به‌ویژه در جت‌های آرگون افزایش قابل‌توجهی داشته است. طول جت پلاسما به‌طور مستقیم با قطر داخلی و ضخامت لوله دی‌الکتریک رابطه دارد. علاوه بر این، افزایش فاصله بین دو الکتروود تأثیر قابل‌توجهی بر دمای الکترودها و جت پلاسما داشته و به جلوگیری از قوس زدن و در نتیجه افزایش پایداری جت کمک می‌کند. همچنین مشاهده شد که کاهش فاصله بین الکترودها منجر به تشکیل سریع‌تر پلاسما و جت می‌شود. در نهایت، یافته‌های کمی به‌دست‌آمده از لوله سوم نشان داد که در فاصله ۳۰ میلی‌متری بین الکترودها، با افزایش ولتاژ از ۶ به ۱۰٫۸ کیلوولت، طول جت از ۸ میلی‌متر به ۴۹ میلی‌متر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: فشار اتمسفری، جت پلاسما، DBD، شکاف تخلیه، ستون پلاسما، گاز آرگون.

Experimental investigation of the effect of tube dimensions and electrodes arrangement in atmospheric pressure DBD cold plasma jet on argon plasma jet characteristics

Z. Kazem
Gh. H. Pouryoussefi

Department of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Department of Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Cold Atmospheric Pressure Plasma (CAPP) technology, which is rapidly developing, has been actively utilized not only in biological research but also in biotechnology, food safety and processing, agriculture, and medicine. The wide variety of plasma device configurations and electrode arrangements has facilitated the application of non-thermal plasma in treating diverse biological samples and surfaces of varying sizes. One type of cold atmospheric pressure plasma jet that has gained considerable attention in recent years is the Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma jet. In this paper, the formation of a cold atmospheric pressure DBD plasma jet using argon as a noble gas was experimentally investigated employing three tubes of different dimensions and three electrode configurations. The effects of applied voltage, tube dimensions, and electrode arrangements on the length of the argon plasma jet were evaluated, and physical parameters of the plasma column, including discharge voltage, average gas temperature, and discharge gap temperature, were analyzed. Experimental results showed that increasing the voltage or flow rate within low ranges led to a more homogeneous plasma column shape and an increase in its length. Additionally, a significant rise in both the discharge gap and ambient temperatures was observed, particularly in argon jets. The plasma jet length exhibited a direct relationship with the inner diameter and thickness of the dielectric tube. Moreover, increasing the distance between the two electrodes significantly affected the electrode and plasma jet temperatures and helped prevent arcing, thereby enhancing jet stability. Conversely, reducing the electrode gap resulted in faster plasma and jet formation. Finally, quantitative findings from the third tube indicated that at a 30 mm electrode gap, increasing the voltage from 6 kV to 10.8 kV extended the jet length from 8 mm to 49 mm.

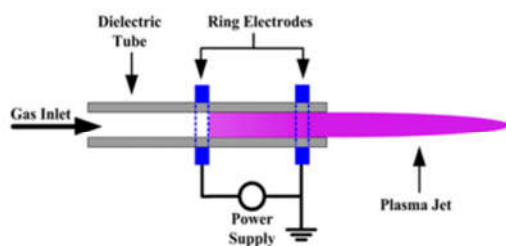
Keywords: Atmospheric Pressure, Plasma Jet, DBD, Discharge Gap, Plasma Length, Argon Gas.

۱- مقدمه

واکنش‌پذیری بالا و قابلیت تولید در شرایط فضای باز و بسته، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱] [۲]. در این نوع جت‌های پلاسمایی، دو الکتروود وجود دارد که حداقل یکی از آن‌ها با ماده دی‌الکتریک پوشش داده شده و تخلیه الکتریکی بین این دو الکتروود انجام می‌شود (شکل ۱). این تخلیه منجر به ایجاد هاله‌ای با رنگ‌های آبی یا بنفش می‌شود که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده است [۳].

جت‌های پلاسمایی تخلیه با مانع دی‌الکتریک (DBD) ^۱ در فشار اتمسفری، نوعی پلاسمای غیرتعادلی سرد هستند که به دلیل

^۱ Dielectric Barrier Discharge



شکل ۱- طرحواره جت پلاسمای DBD [۱۰].

در این مقاله، نتایج مربوط به ویژگی‌های جت پلاسمای آرگون فشار اتمسفر (APPJ) مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله پارامترهای مطالعه شده می‌توان به تأثیر ولتاژ اعمالی، ضخامت لوله دی‌الکتریک و فاصله الکترودها در آرایش‌های مختلف و همچنین دمای شکاف بین الکترودها و محیط اطراف اشاره کرد. همچنین، از گاز آرگون در فشار اتمسفری به عنوان گاز کار برای تولید پلاسمای در هوای آزاد استفاده شده است. استفاده از گازهای نجیب به دلیل فراهم آوردن شرایط مطلوب برای فرآیندهای یونیزاسیون، تحریک و تفکیک در پلاسمای است [۱۱]. برای درک بهتر این روش، جت پلاسمای DBD آرگون با سه لوله دارای ضخامت‌های متفاوت و فواصل الکترودی گوناگون، تحت شرایط تخلیه مشابه شامل ولتاژ، جریان، دمای شکاف و سایر پارامترهای پلاسمای (مانند شکل جت و طول ستون پلاسمای) مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این مطالعه مقایسه‌ای می‌تواند برای انتخاب جت‌های پلاسمایی مناسب جهت کاربرد در موارد حساس به دما مفید باشد.

۲- مشخصات آزمون تجربی

مشخصات ابعادی لوله‌های مورد استفاده برای تولید جت‌های پلاسمای فشار اتمسفری در این مطالعه، که به عنوان عایق دی‌الکتریک به کار رفته‌اند، به شرح زیر است:

(الف) لوله پیرکس با قطر خارجی ۵ میلی‌متر، قطر داخلی ۲/۳ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر (لوله اول)

(ب) لوله پیرکس با قطر خارجی ۶/۸ میلی‌متر، قطر داخلی ۲/۶ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر (لوله دوم)

(ج) لوله پیرکس با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۷ میلی‌متر و ضخامت ۱/۵ میلی‌متر (لوله سوم)

در تمامی مراحل آزمایش، از لوله‌های پیرکس به طول ۱۵ سانتی‌متر به عنوان عایق دی‌الکتریک و مجرای هدایت‌کننده گاز استفاده شده است. همچنین، در تمامی آرایش‌ها از دو فویل مسی با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و عرض ۱۵ میلی‌متر به عنوان الکترود حلقه‌ای بهره گرفته شده است. الکترود بالا که نزدیک به لبه لوله قرار دارد، در بیرون لوله نصب شده و الکترود پایین داخل لوله قرار گرفته است. برای هر لوله، فاصله بین دو الکترود در سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر تنظیم شد تا تأثیر این پارامترها بر عملکرد جت پلاسمایی مورد بررسی قرار گیرد. فاصله بین لبه بالایی الکترود مسی و لبه لوله شیشه‌ای در تمامی حالات به صورت ثابت و برابر با ۱۰ میلی‌متر نگه داشته شد. در تمامی شرایط آزمایش، الکترود داخلی به منبع جریان ولتاژ بالا (HV) و الکترود بیرونی به زمین متصل شده است. شکل ۲ نمونه‌ای از جت پلاسمای ساخته شده را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۳ طرحواره

جت‌های پلاسمایی DBD یکی از انواع جت‌های پلاسمای فشار اتمسفری غیرتعادلی APNP-J^۱ هستند که عمدتاً با گازهای خنثی و در دمای نزدیک به دمای اتاق عمل می‌کنند. این ویژگی سبب کاهش خطر وقوع قوس الکتریکی شده و ظرفیت جریان را محدود می‌کند که به جلوگیری از شکست ولتاژ کمک می‌کند. این مزایا باعث شده است که این نوع جت پلاسمای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع، کشاورزی و به‌ویژه پزشکی پیدا کند [۴] [۵]. اصطلاح «پلاسمای» نخستین بار توسط ایروینگ لانگمیر در سال ۱۹۲۸ مطرح شد و به گاز یونیزه شده در تخلیه الکتریکی اشاره دارد. پلاسمای از ذرات مختلفی شامل اتم‌ها و مولکول‌های خنثی، ذرات باردار (الکترون‌ها و یون‌ها)، ذرات ناپایدار (اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته، رادیکال‌ها) و فوتون‌ها تشکیل شده است [۶]. بر اساس دمای ذرات، پلاسمای به دو دسته پلاسمای تعادلی (حرارتی) و پلاسمای غیرتعادلی (غیرحرارتی) تقسیم می‌شود. پلاسمای حرارتی با گاز یونیزه و دمای بالا (بیش از ۱۵۰۰۰ کلوین) مشخص می‌شود [۷]. در حالی که پلاسمای غیرحرارتی یا سرد، گازی است که تا حدی یونیزه شده و دمای آن معمولاً نزدیک به دمای اتاق (حداکثر ۳۴۰ کلوین) است. از آنجا که درمان با پلاسمای سرد در دمای اتاق انجام می‌شود، می‌توان اثرات مخرب بر بافت‌های بیولوژیکی و ماتریس‌های حساس به گرما را به حداقل رساند، در حالی که خواص ضدعفونی‌کننده و استریلیزاسیون حفظ می‌شود. تا به امروز، انواع مختلفی از پلاسمای سرد تولید شده است. پلاسمای سرد فشار اتمسفر (CAPP) به طور گسترده‌ای در علوم زیستی و فناوری‌های کشاورزی مانند درمان‌های پزشکی و نگهداری گیاهان و مواد غذایی کاربرد دارد. این فناوری به عنوان یک فناوری نوظهور به سرعت در صنایع مختلف و حوزه‌های پزشکی توسعه یافته است. در کاربردهای بیولوژیکی، رایج‌ترین انواع پلاسمای جت‌های پلاسمای فشار اتمسفر (APPJ) و تخلیه با مانع دی‌الکتریک (DBD) هستند. APPJها جت‌های پلاسمای با تخلیه کم هستند که شعله‌های پلاسمای کوچک با توان پایین تولید می‌کنند و CAPP سرد ایجاد می‌نمایند. این جت‌ها از دو الکترود هم‌مرکز و جریان گاز تشکیل شده‌اند. جت‌های DBD نمونه‌ای از APPJها محسوب می‌شوند که بر اساس طراحی و مواد استفاده شده می‌توان آن‌ها را دسته‌بندی کرد [۸]. فاصله کم بین الکترودها امکان اعمال ولتاژ پایین را فراهم می‌کند و جریان گاز، معمولاً گازهای نجیب مانند هلیوم (He) یا آرگون (Ar)، ویژگی دمای پایین پلاسمای را تضمین می‌کند. APPJها می‌توانند با جریان‌های متناوب مستقیم، پالسی مستقیم یا فرکانس بالا (رادبویی و میکروویو) تولید شوند.

DBDها در برخی منابع به عنوان تخلیه‌های «بی‌صدا» یا «درخشش فشار اتمسفر» شناخته می‌شوند [۹]. ویژگی بارز آن‌ها وجود ماده دی‌الکتریک بین دو الکترود است. معمولاً DBDها در فرکانس حامل ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و با دامنه ولتاژ ده‌ها کیلوولت کار می‌کنند. فاصله بین الکترودها در این تخلیه‌ها از چند ده میکرون تا چند سانتی‌متر متغیر است.

^۱ Atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets

جدول ۱- جدول مقاومت دی الکتریک مواد

ماده	مقاومت دی الکتریک (V/m)
شیشه پیرکس (بوروسیلیکات)	14×10^6
شیشه کوارتز	8×10^6

در ابتدا، تمامی پارامترهای مذکور در دبی ثابت به ترتیب برای لوله‌های اول، دوم و سوم بررسی شدند؛ سپس همین پارامترها در شرایط ولتاژ ثابت مورد مطالعه قرار گرفتند. در آزمایش دوم، برخلاف آزمایش اول، ولتاژ در مقدار ثابت نگه داشته شد و دبی گاز برای هر سه لوله و تمامی فواصل الکترودی به تدریج افزایش یافت. هدف از این آزمایش‌ها، بررسی عملکرد لوله‌ها با فواصل مختلف، مشاهده تغییرات در فرآیند تشکیل پلاسما، طول و هندسه جت پلاسمایی، زمان تشکیل آن و همچنین مطالعه میزان افزایش دما و توان مصرفی می‌باشد.



شکل ۴- نمای بیرونی از دستگاه منبع تغذیه پلاسما به همراه دستگاه‌های اندازه‌گیری الکتریکی

منبع تغذیه پلاسما مورد استفاده در این تحقیق، یک منبع تغذیه الکتریکی متناوب فشار قوی فرکانس بالا (HVAC) با قابلیت اعمال ولتاژ ماکزیمم ۶۰ کیلوولت قله به قله، فرکانس حامل ۱۵ کیلوهرتز و بیشینه توان خروجی ۳۰۰۰ وات می‌باشد. این دستگاه از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

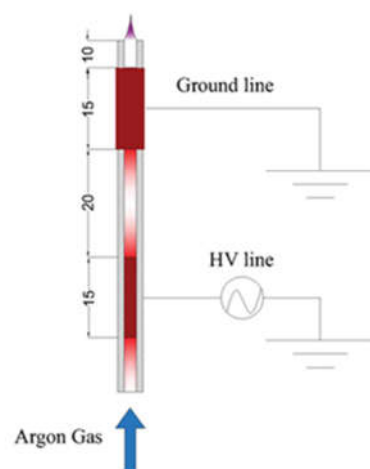
- ۱- آمپلیفایر توان متغیر جهت تنظیم توان الکتریکی خروجی
- ۲- ترانسفورماتور ولتاژ بالای فرکانس بالا برای تنظیم ولتاژ اعمالی مورد نیاز جهت تولید پلاسما (شکل ۴).

لازم به ذکر است که در این آزمایش‌ها، برای اندازه‌گیری دمای لوله‌ها در اطراف محیط تشکیل پلاسما از دوربین حرارتی مدل DT-۹۸۸۹ با دقت $\pm 2^\circ\text{C}$ درجه سانتی‌گراد یا $\pm 2\%$ درصد (هر کدام بزرگ‌تر باشد) استفاده گردید. تصاویر جت پلاسما توسط دوربین Nikon مدل D۳۴۰۰ ثبت شد. برای افزایش دقت تحلیل، کالیبراسیون دوربین با استفاده از جسم سیاه در دمای مرجع انجام شد. همچنین،

آرایش لوله‌ها و فواصل مختلف بین دو الکترود حلقه‌ای (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر) و نحوه اتصال آن‌ها را به تصویر می‌کشد. در هر سه حالت، فاصله الکترود بالایی از سر لوله ثابت و برابر ۱۰ میلی‌متر است.



شکل ۲- تصویر نمونه ای از جت پلاسمای ساخته شده



شکل ۳- طرحواره آرایش‌های الکترودی، اتصالات لوله‌ها و فاصله الکترودها از هم (نمونه ۲۰ میلیمتری)

به منظور انتخاب لوله شیشه‌ای مناسب به عنوان دی الکتریک، چندین نمونه شیشه از نظر مقاومت در برابر گرما، مقاومت ضربه و مهم‌تر از همه ضریب دی الکتریک مورد بررسی قرار گرفتند. از میان دی الکتریک‌های متداول، لوله‌های پیرکس و کوارتز به دلیل مقاومت بالای گرمایی، مقاومت مکانیکی مناسب و همچنین ویژگی‌های مطلوب دی الکتریکی، گزینه‌های برجسته‌ای محسوب می‌شوند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که هرچند کوارتز مقاومت گرمایی بیشتری دارد، اما پیرکس از ضریب مقاومت دی الکتریک قابل توجهی نسبت به کوارتز برخوردار است، که این ویژگی برای انجام این آزمایش‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا، لوله‌های پیرکس به عنوان دی الکتریک در این مطالعه انتخاب شدند. جدول ۱ مقادیر ضریب مقاومت دی الکتریک شیشه‌های کوارتز و پیرکس را نشان می‌دهد.

جدول ۲- جدول داده‌های جت پلاسمای لوله اول در دبی ثابت ($Q = 9$)

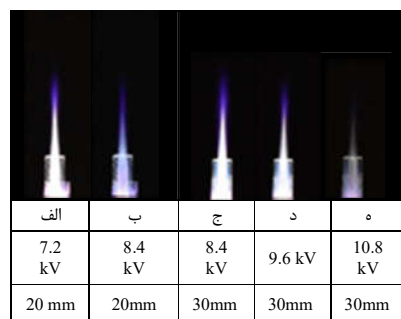
(lit/min, $Y = 20$ mm)			
V_{pp} (kV)	Power (W)	Jet Length (mm)	Jet Temperature (H) ($^{\circ}C$)
6	1.08	0	0
7.2	2.16	14	24.3
8.4	6.5	19	32.6
9.6	18.65	21	39.0

در جدول ۳، در دبی ۹ لیتر بر دقیقه و با افزایش فاصله بین دو الکترود به ۳۰ میلی‌متر، بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که جت پلازما در ولتاژ بالاتری نسبت به جت پلازما با فاصله الکترودی ۲۰ میلی‌متر تشکیل می‌شود. همچنین، طول جت در این حالت بیشتر اما دمای آن کمتر است.

جدول ۳- جدول داده‌های جت پلاسمای لوله اول در دبی ثابت ($Q = 9$)

(lit/min, $Y = 30$ mm)			
V_{pp} (kV)	Power (W)	Jet Length (mm)	Jet Temperature (H) ($^{\circ}C$)
6	1.24	0	0
7.2	0.61	0	0
8.4	1.67	19	28.8
9.6	1.23	23	45.7
10.8	13.41	23	48.8

در شکل ۶، تصاویر جت پلاسمایی در دبی $Q = 13$ lit/min، برای لوله اول و فواصل الکترودی ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر با افزایش ولتاژ قابل مشاهده است. در دبی‌های بالاتر نیز، با افزایش ولتاژ، طول جت پلاسمایی افزایش یافته و هندسه جت تشکیل شده کشیده‌تر و درخشان‌تر می‌شود. همچنین، در فاصله الکترودی کمتر، جت پلاسمایی در ولتاژ پایین‌تر زودتر شکل می‌گیرد. علاوه بر این، طول و هندسه جت پلاسمایی در بخش (ب) تقریباً مشابه بخش (ه) است.



شکل ۶- شکل جت پلازما در $Q = 13$ lit/min با افزایش ولتاژ برای لوله اول

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ و جداول ۲ و ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله تخلیه بین دو الکترود، ولتاژ مورد نیاز برای یونیزاسیون گاز آرگون و تبدیل آن به پلازما به طور پیوسته افزایش می‌یابد. در واقع، حاصل‌ضرب فشار گاز در طول شکاف تخلیه، ولتاژ لازم برای شروع تخلیه یا قوس الکتریکی بین دو الکترود در یک گاز را تعیین می‌کند [۱۳].

عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول جت پلازما با تحلیل تصاویر دیجیتال در محیط کنترل‌شده و با استفاده از خط‌کش مرجع تصویری، حدود ± 1 میلی‌متر برآورد گردید. مجموعه مقدار عدم قطعیت (با در نظر گرفتن مقادیر عدم قطعیت هر یک از متغیرها)، با استفاده از روش ریشه مجموع مربعات (RSS) و همچنین استفاده از روابط دیفرانسیل جزئی-کامل محاسبه شد.

۳- بررسی داده‌های آزمایش

ابتدا تأثیر افزایش ولتاژ اعمالی و دبی گاز بر هندسه، طول، کیفیت و نرخ برافروختگی جت پلاسمایی مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثرات این پارامترها بر دما در نواحی مختلف لوله تحلیل شد. تغییرات طول جت پلازما و نرخ برافروختگی بر اساس افزایش ولتاژ و دبی گاز، دمای الکترودها، جت‌ها و همچنین محیط اطراف جت پلاسمایی به همراه نمودارهای دما بر حسب توان ارائه شده است.

در بخش نخست آزمایش، تمامی پارامترهای مذکور در دبی ثابت به ترتیب برای لوله‌های اول، دوم و سوم مورد مطالعه قرار گرفتند؛ سپس در بخش دوم، همین پارامترها در شرایط ولتاژ ثابت بررسی شدند. شایان ذکر است که طول ستون پلازما شاخصی کلیدی برای تعیین میزان و شدت تخلیه محسوب می‌شود و در این مطالعه به عنوان پارامتری برای توصیف ویژگی‌های پلازما و استنتاج جنبه‌های عملکرد آن به کار گرفته شده است [۱۲].

۳-۱- بررسی عملکرد لوله‌ها در دبی ثابت

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، لوله اول با فاصله بین دو الکترود ۱۰ میلی‌متر، هیچ مقاومتی در برابر رژیم قوس از خود نشان نداد؛ به طوری که تنها در ولتاژ $V_{pp} = 8.4$ kV جت ضعیف، لحظه‌ای و ناپایداری تشکیل شد که بلافاصله به قوس تبدیل گردید. همچنین، توان و دما در این فاصله به سرعت افزایش یافتند.

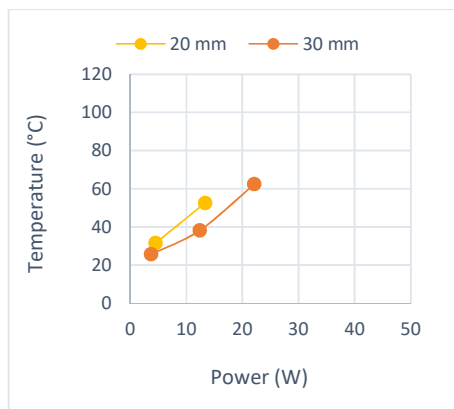


شکل ۵- شکل جت پلازما در ($Y = 10$ mm, $Q = 3$ lit/min $V_{pp} = 8/4$)

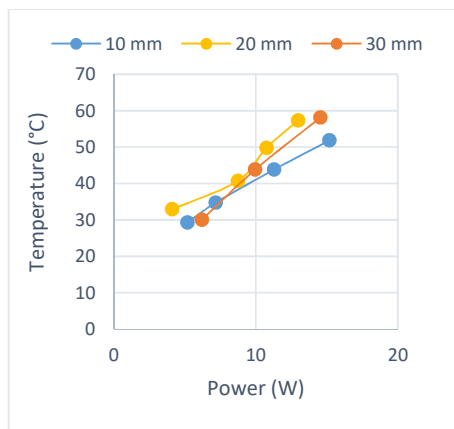
(kV برای لوله اول)

با توجه به داده‌های جدول ۲، با افزایش فاصله بین دو الکترود به ۲۰ میلی‌متر، طول جت تشکیل شده با افزایش ولتاژ بیشتر می‌شود و به تبع آن، دما نیز افزایش می‌یابد.

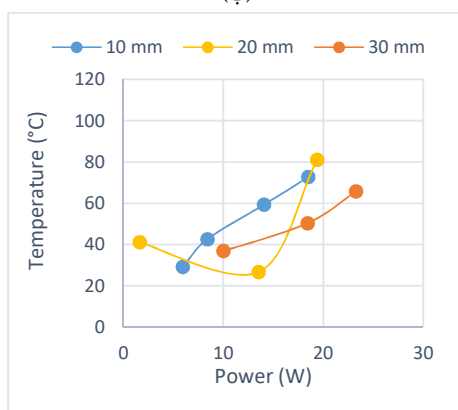
است که در آرایش ۲۰ میلی‌متر، طول جت پلاسما در ولتاژ 10.8 کیلوولت نسبت به سایر فواصل بیشتر است.



(الف)



(ب)

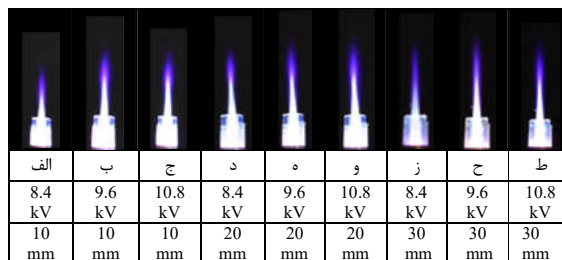


(ج)

شکل ۹- نمودار تغییرات دما بر حسب توان لوله جت آرگون در محل تشکیل پلاسما در $Q = 13 \text{ lit/min}$ با افزایش ولتاژ، (الف) لوله اول (ب) لوله دوم (ج) لوله سوم (لوله با فاصله بین دو الکترود: ۱۰ میلی‌متر - نمودار آبی، ۲۰ میلی‌متر - نمودار زرد و ۳۰ میلی‌متر - نمودار قرمز)

شکل ۹ نمودار تغییرات دما بر حسب توان جت پلاسما را در محل تشکیل پلاسما در موقعیت دبی ۱۳ لیتر بر دقیقه برای هر سه لوله

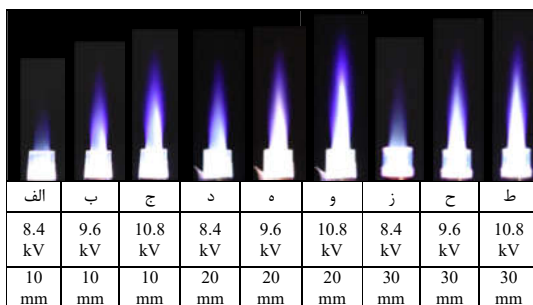
در لوله اول به دلیل ضخامت کم دی‌الکتریک، دما با سرعت بالا و تا میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بنابراین، لوله‌ای با قطر داخلی تقریباً برابر و ضخامت بیشتر به منظور بررسی تأثیر ضخامت دی‌الکتریک مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۷- نمایش شکل جت پلاسما در $Q = 13 \text{ lit/min}$ با افزایش ولتاژ

برای لوله دوم

در شکل ۷، برای لوله دوم با قطر خارجی بزرگتر مشاهده می‌شود که همانند لوله اول، جت پلاسما در آرایش الکترودی ۲۰ میلی‌متر زودتر از آرایش ۳۰ میلی‌متر تشکیل می‌شود. با این تفاوت که مقاومت این لوله به دلیل ضخامت بیشتر دی‌الکتریک، در مقابل رژیم قوس بالاتر است. در فاصله ۲۰ میلی‌متر شاهد افزایش توان و تشکیل جت پلاسما هستیم، اما با افزایش ولتاژ، طول و هندسه جت تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین، در این لوله هندسه جت پلاسما در فاصله ۲۰ میلی‌متر نسبت به لوله با ضخامت کمتر، عریض‌تر است. در فاصله ۳۰ میلی‌متر نیز با افزایش ولتاژ، طول و شدت درخشش جت افزایش یافته و هندسه جت به صورت سوزنی شکل و کشیده ظاهر می‌شود.



شکل ۸- شکل جت پلاسما در $Q = 13 \text{ lit/min}$ با افزایش ولتاژ برای

لوله سوم

در لوله سوم (شکل ۸)، قطر داخلی نسبت به دو لوله دیگر بزرگتر است؛ بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رفت، طول جت پلاسما در این لوله بیشتر از دو لوله دیگر می‌باشد. همچنین افزایش قطر داخلی موجب تغییر هندسه جت شده و آن را نسبت به لوله‌های اول و دوم عریض‌تر و کشیده‌تر کرده است. توان و دما در این لوله با سرعت کمتری افزایش یافته و لوله مقاومت قابل توجهی در برابر رژیم قوس از خود نشان می‌دهد. جت پلاسما در لوله سوم نسبت به دو لوله دیگر قوی‌تر و پایدارتر است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ، طول و درخشندگی جت افزایش می‌یابد، با این تفاوت که در آرایش با فاصله ۳۰ میلی‌متر، در ولتاژهای 9.6 و 10.8 کیلوولت طول جت ثابت باقی می‌ماند و تغییری نمی‌کند. همچنین لازم به ذکر

نمایش می‌دهد. این نمودار رابطه مستقیم بین دما و توان را نشان داده و روند صعودی دما را با افزایش توان برای تمامی لوله‌ها و فواصل الکترودی به وضوح بیان می‌کند.

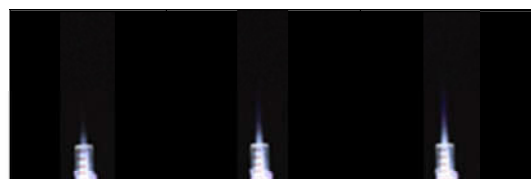
به طور کلی، در منابع پلاسمای غیرتعدالی با فشار اتمسفر، الکترون‌ها انرژی بیشتری نسبت به یون‌ها و مولکول‌های گاز دارند و این انرژی برای تولید رادیکال‌های واکنش‌پذیر شیمیایی به کار گرفته می‌شود. در این فرآیند، الکترون‌های با انرژی بالا از طریق برخوردهای غیرالاستیک، انرژی خود را به مولکول‌های گاز منتقل می‌کنند که منجر به افزایش دمای گاز و در نتیجه افزایش دمای جت می‌شود [۱۴].

طول ستون پلاسما در دبی ۱۳ لیتر بر دقیقه با افزایش فاصله بین الکترودها به اوج خود رسید. طول جت با افزایش ولتاژ قله و به تبع آن افزایش توان میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش ولتاژ اعمالی، توان مصرفی الکتریکی جت افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش میزان تخلیه پلاسما و چگالی آن شده و در نتیجه جت برافروخته‌تر و بلندتر می‌شود.

افزایش ولتاژ و چگالی پلاسما منجر به تشکیل جت‌های برافروخته‌تر (روشن‌تر) و افزایش دمای جت می‌گردد. تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین حرارتی نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ در دبی ثابت، دمای متوسط محل تشکیل پلاسما (شامل لوله شیشه‌ای و الکترودها) افزایش یافته است که این افزایش دما نشان‌دهنده افزایش دمای جت پلاسما می‌باشد.

۳-۲- بررسی عملکرد لوله‌ها در ولتاژ ثابت

در این بخش، بر خلاف بخش قبلی، آزمایش‌ها در شرایط ولتاژ ثابت و دبی گاز متغیر انجام شدند تا تأثیر افزایش دبی بر عملکرد لوله‌ها و فواصل الکترودی بررسی شود. در این روش، برای لوله اول و در ولتاژ ۶ کیلوولت، جت پلاسمای ضعیفی تشکیل شد (شکل ۱۰).



الف	ب	ج
9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min
10 mm	10 mm	10 mm

شکل ۱۰- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 6 \text{ kV}$ با افزایش دبی برای لوله اول

همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش دبی گاز، طول و درخشندگی جت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، هندسه جت به شکل سوزنی مشاهده می‌شود. در این آزمایش نیز، مشابه حالت دبی ثابت، لوله اول در آرایش الکترودی ۲۰ میلی‌متر بیشترین طول جت را دارا می‌باشد.

با در نظر گرفتن ولتاژ ثابت برای لوله اول، بر خلاف حالت دبی ثابت، مشاهده شد که جت پلاسما بسیار قوی‌تر و پایدارتر است و مقاومت لوله در برابر جریان و ولتاژ به‌طور قابل توجهی افزایش یافته

است. همچنین، افزایش دما و توان در این شرایط به میزان چشمگیری کمتر بوده است.



الف	ب	ج	د	ه	و	ز
6 lit/min	9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min	9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min
20 mm	20 mm	20 mm	20 mm	30 mm	30 mm	30 mm

شکل ۱۱- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 8/4 \text{ kV}$ با افزایش دبی برای لوله اول



الف	ب	ج	د	ه	و	ز	ح	ط
9 lit/m in	12 lit/m in	15 lit/m in	9 lit/m in	12 lit/m in	15 lit/m in	9 lit/m in	12 lit/m in	15 lit/m in
10 mm	10 mm	10 mm	20 mm	20 mm	20 mm	30 mm	30 mm	30 mm

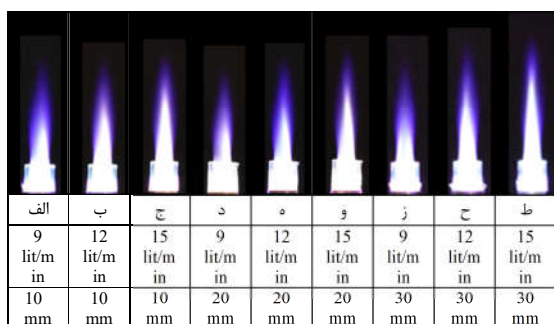
شکل ۱۲- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 8/4 \text{ kV}$ با افزایش دبی برای لوله دوم

در لوله دوم، برای ولتاژ 8.4 کیلوولت، جت پلاسما در فاصله ۱۰ میلی‌متر سریع‌تر به حالت پایدار رسید، در حالی که در فاصله ۲۰ میلی‌متر جت پلاسما در ضعیف‌ترین وضعیت نسبت به سایر فواصل قرار دارد (شکل ۱۲). همچنین در لوله سوم (شکل ۱۳)، جت پلاسما در فاصله ۲۰ میلی‌متر قوی‌تر مشاهده شد.

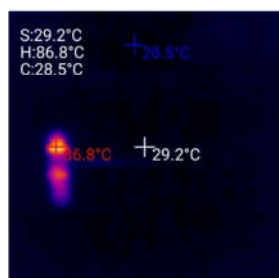


الف	ب	ج	د	ه	و	ز	ح	ط
9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min	9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min	9 lit/min	12 lit/min	15 lit/min
10 mm	10 mm	10 mm	20 mm	20 mm	20 mm	30 mm	30 mm	30 mm

شکل ۱۳- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 8/4 \text{ kV}$ با افزایش دبی برای لوله سوم



شکل ۱۶- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 10/8$ kV با افزایش دبی برای لوله سوم



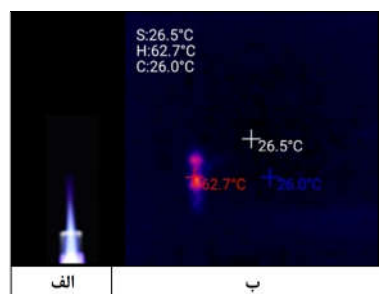
شکل ۱۷- دمای جت پلاسمای ($Q=15$ lit/min $V_{pp}=10.8$ kV, $Y=30$ mm) برای لوله سوم



شکل ۱۸- شکل جت آرگون در موقعیت ($Y=30$ mm, $V_{pp}=12$ kV) برای لوله سوم

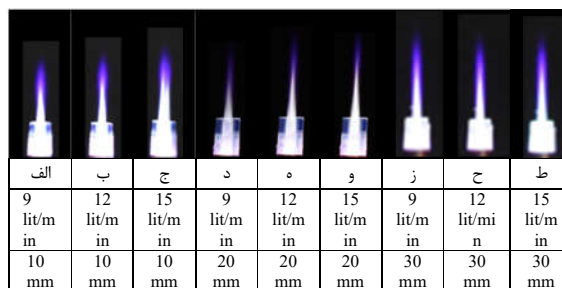
در نمودار شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی گاز از ۰ تا ۱۵ لیتر بر دقیقه، طول جت پلاسما به طور تقریبی از ۳۴ تا ۴۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

مطابق گزارش‌های پیشین، طول ستون پلاسما علاوه بر ولتاژ اعمالی و ویژگی‌های میدان الکتریکی، به سرعت جریان گاز نیز وابسته است و دبی در ناحیه بالادست بر پایداری و طول جت پلاسمای ناحیه پایین‌دست تأثیرگذار می‌باشد [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸].



شکل ۱۴- الف) شکل جت پلاسما در ($Q=3$ lit/min, $V_{pp}=10/8$ kV) ب) نمایش دمای جت پلاسما و محیط اطراف (H) نشان‌دهنده گرم‌ترین نقطه عکس، (C) نشان دهنده سردترین نقطه و (S) نمایانگر دمای ناحیه درخشان) با دوربین حرارتی

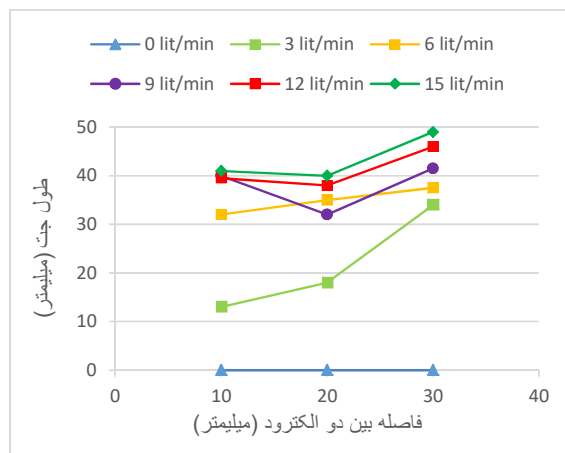
در لوله اول، برای فواصل الکترودی ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و ولتاژ ۱۰.۸ کیلوولت، جت پلاسما تشکیل نشد و تنها در فاصله ۳۰ میلی‌متر، جت نسبتاً ضعیفی ایجاد گردید (شکل ۱۴).



شکل ۱۵- شکل جت پلاسما در $V_{pp} = 10/8$ kV با افزایش دبی برای لوله دوم

در ولتاژ ۱۰.۸ کیلوولت برای لوله‌های دوم و سوم و در دبی‌های ۹، ۱۲ و ۱۵ لیتر بر دقیقه، جت پلاسما تشکیل شد. طول جت‌ها در تمامی فواصل در هر دو لوله تقریباً برابر است، اما هندسه جت در لوله دوم در فاصله ۲۰ میلی‌متر به صورت سوزنی و تیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۵). با بررسی شکل ۱۴ در لوله با قطر داخلی بیشتر، مشاهده می‌شود که جت‌ها در دبی ۱۵ لیتر بر دقیقه قوی‌تر و درخشان‌تر بوده و طول جت پلاسما در فاصله ۳۰ میلی‌متر و دبی ۱۵ لیتر بر دقیقه مقداری بیشتر است.

برای بررسی افزایش طول بیشتر جت پلاسما در لوله سوم با فاصله الکترودی ۳۰ میلی‌متر، ولتاژ تا ۱۲ کیلوولت افزایش داده شد، اما به دلیل دمای بسیار بالا، محل اتصال سیم و الکتروود لحیم شده باز شد (شکل ۱۸).



شکل ۱۹- نمودار تغییرات طول جت پلاسمای لوله سوم در ($V_{pp}=10.8$ kV)

در این آزمایش‌ها مشاهده شد که با افزایش فاصله بین الکترودها، زمان تشکیل جت پلاسما افزایش یافته و روند شکل‌گیری پلاسما و جت به تعویق افتاده است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که در بیشترین فاصله بین الکترودها (۳۰ میلی‌متر)، جت پلاسما نسبت به چیدمان ۲۰ میلی‌متری زودتر تشکیل می‌شود، اما از نظر شدت بسیار ضعیف‌تر از دو آرایش دیگر است. این موضوع به دلیل فاصله نسبتاً زیاد الکترودها، ولتاژ اعمالی کمتر و میزان یونش پایین‌تر در این چیدمان می‌باشد. همچنین با کاهش فاصله الکترودها، دمای لوله و الکترودها افزایش یافته و دمای جت پلاسما نیز به میزان قابل توجهی بیشتر می‌شود.

با افزایش ولتاژ اعمالی، جریان عبوری و متعاقباً توان مصرفی الکتریکی جت نیز همواره افزایش می‌یابد. تصاویر به‌دست‌آمده نشان دادند که با افزایش ولتاژ و قوی‌تر شدن میدان الکتریکی، جت‌های پلاسما پرتوان‌تر و روشن‌تر شده و طول آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. بر اساس تصاویر ثبت شده توسط دوربین حرارتی و اندازه‌گیری طول جت‌ها، مشاهده شد که لوله اول جت پلاسما با دمای بسیار بالا و طول نهایی حدود ۲۰ تا ۲۳ میلی‌متر تولید می‌کند. این لوله با افزایش ولتاژ و دبی گاز در آرایش‌های مختلف الکترودی، جتی کوتاه‌تر نسبت به دو لوله دیگر تولید کرده و خطر وقوع قوس به‌ویژه در فواصل کم افزایش می‌یابد.

لوله دوم جت پلاسما با طول نهایی حدود ۲۲ تا ۲۸ میلی‌متر و دمایی کمتر از لوله اول ایجاد می‌کند. نکته مهم در مورد این لوله، پایداری بیشتر جت و کاهش چشمگیر خطر قوس به دلیل افزایش ضخامت دی‌الکتریک آن است. لوله سوم که دارای قطر داخلی بزرگ‌تر است، جت پلاسما با طولی در حدود ۴۰ تا ۴۹ میلی‌متر تولید می‌کند که به‌طور قابل توجهی بلندتر از دو لوله دیگر است. همچنین، این لوله مقاومت بالایی در برابر رژیم قوس دارد و دمای آن بیشتر از لوله اول گزارش شده است.

افزایش فاصله بین الکترودها تأثیر قابل‌توجهی در افزایش طول و پایداری جت پلاسما دارد؛ اما در نمونه‌هایی با شکاف‌های ۲۰ و ۳۰ میلی‌متری، طول جت‌ها تغییر محسوسی نداشته و در محدوده نسبتاً ثابتی باقی ماند. در شکاف ۳۰ میلی‌متری، جت پلاسما به‌طور قابل

توجهی قوی‌تر، پایداری و با هندسه‌ای سوزنی شکل و کشیده تشکیل شد. همچنین، با افزایش فاصله بین الکترودها، نرخ افزایش توان الکتریکی کاهش یافته و به تبع آن، افزایش دمای کمتری توسط دوربین حرارتی ثبت گردید. این شرایط موجب پایداری شدن جت و به تأخیر افتادن وقوع رژیم قوس می‌شود.

افزایش ضخامت لوله تأثیر مهمی در افزایش مقاومت آن داشته و منجر به تولید جت پلاسما بلندتر، قوی‌تر و پایداری می‌گردد. این اثر به‌ویژه در مقایسه با لوله اول در فاصله ۱۰ میلی‌متری بسیار چشمگیر و محسوس است، به‌گونه‌ای که مقاومت لوله در برابر افزایش ولتاژ و دبی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه، توان و دما با نرخ کمتری افزایش می‌یابند. در لوله با ضخامت کمتر (لوله اول)، هندسه جت نازک‌تر و سوزنی‌تر بود ولی افزایش ضخامت باعث عریض‌تر شدن جت شد.

یک نکته حائز اهمیت این است که در دبی ثابت، با افزایش ولتاژ، میزان تخلیه الکتریکی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در نتیجه شدت میدان الکتریکی بین الکترودها تقویت می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که تخلیه پلاسما از رژیم برافروختگی به سمت قوس انتقال یابد که منجر به آسیب جدی، از جمله سوراخ شدن لوله می‌گردد. این پدیده به‌ویژه در لوله اول بسیار مشهود است؛ به‌طوری که افزایش ولتاژ بیش از حد، علاوه بر ایجاد قوس، باعث نصف شدن لوله از قسمت زیرین الکترود بالایی شد. به عنوان نمونه بارز، در حالت دبی ثابت برای لوله اول و به‌ویژه در فاصله ۱۰ میلی‌متر، لوله قادر به ادامه آزمایش از دبی ۳ لیتر بر دقیقه و ولتاژ ۸/۴ کیلوولت به بعد نبود.

با افزایش فاصله الکترودها در این لوله، تا حدی این مشکل کاهش یافت، اما ولتاژهای بالا به‌ویژه در فاصله ۲۰ میلی‌متر، باعث افزایش سریع توان و خطر وقوع قوس می‌شد. این مسئله با افزایش ضخامت دی‌الکتریک لوله دوم و افزایش قطر داخلی لوله سوم به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد. در ولتاژهای بالاتر، جت‌های پلاسما به حالت تعادل رسیده و افزایش طول بیشتری رخ نمی‌دهد و پایداری جت حفظ می‌شود. در این شرایط، با توجه به توزیع معادله یونش ساها^۱ حالات برانگیخته، چگالی این حالات نزدیک به تعادل است [۱۹].

۴- تحلیل تئوریک و روابط تجربی

۱. بر اساس قانون پاشن^۲، ولتاژ شکست گاز به صورت تابعی از فشار گاز و فاصله بین دو الکترود بوده و از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$V_b = B * pd / [\ln(A * pd) - \ln(\ln(1 + 1/\gamma_{se}))]$$

که در آن، A و B ثابت‌هایی وابسته به گاز آرگون با مقادیر تقریبی^۱ $A \approx 15 \text{ cm}^{-1} \text{ Torr}$ ، $B \approx 180 \text{ V/(cm.Torr)}$ هستند. d فاصله الکترودها، p فشار گاز، V ولتاژ شکست و γ_{se} ضریب بازگشت الکترون ثانویه می‌باشد.

همچنین، در شرایط دبی متغیر و ولتاژ ثابت، طول جت پلاسما با افزایش دبی به صورت نمایی افزایش یافته و با رابطه زیر تقریب زده می‌شود:

$$L = L_0 + a * (1 - e^{-b * Q})$$

¹ Saha ionization equation

² Paschen's Law

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، جت پلاسما ی آرگون در فشار اتمسفر و تحت شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای طول، شکل، دما و توان جت در سه لوله با ابعاد متفاوت و سه آرایش الکترونی مختلف اندازه گیری شدند؛ هر بار با ثابت بودن دبی و بار دیگر با ثابت بودن ولتاژ. طول ستون پلاسما از جمله شاخص های مهم برای ارزیابی ویژگی های پلاسما و اطلاعاتی مانند سرعت و چگالی آن است و همچنین نقش مهمی در تعیین محدوده فاصله کاری برای کاربردهای حساس دارد [۲۳]. کاهش فاصله الکترونها میدان الکتریکی را قوی تر می کند اما چگالی پلاسما کاهش می یابد؛ زیرا زمان اقامت گاز در میدان کاهش یافته و یون ها و الکترون ها به دلیل ترکیب مجدد کاهش می یابند. افزایش طول ستون پلاسما با افزایش ولتاژ اعمالی به دلیل انرژی بیشتر تحویلی به بارها اتفاق می افتد که باعث شکل گیری جت سوزنی و تیز در لوله شیشه ای شده و تخلیه پلاسما در هوای اطراف صورت می گیرد [۲۴] و [۲۵]. مطالعات نشان داد که افزایش ولتاژ و دبی گاز طول جت را در هر سه لوله افزایش داده و فاصله بیشتر بین الکترونها نیز به طول ستون افزوده است. علاوه بر آن، قطر داخلی و ضخامت لوله تأثیر قابل توجهی بر طول ستون پلاسما، قدرت و دمای جت دارند. با افزایش ولتاژ و فاصله بین الکترونها، دمای جت افزایش می یابد. در منابع پلاسما ی غیرتعادلی با فشار اتمسفر، الکترون ها نسبت به یون ها و مولکول های گاز انرژی بیشتری برای تولید رادیکال های واکنش پذیر دارند و با برخوردهای غیرالاستیک انرژی خود را به مولکول ها منتقل کرده و باعث افزایش دمای گاز و در نهایت دمای جت می شوند [۲۶].

افزایش ضخامت لوله دی الکتریک مقاومت در برابر افزایش ولتاژ و دبی گاز را افزایش داده و در نتیجه به طولانی تر شدن ستون پلاسما کمک می کند. همچنین این ضخامت بیشتر باعث کاهش احتمال وقوع رژیم قوس می شود. افزایش قطر داخلی لوله نیز امکان عبور جریان حجمی بیشتر گاز را فراهم کرده و طول جت را افزایش می دهد. در همه لوله ها و فواصل، افزایش توان و دمای جت در شرایط دبی ثابت کمتر از حالت ولتاژ ثابت است، که این امر احتمال وقوع قوس را کاهش می دهد. همچنین نسبت فاصله بین دو الکتروند بر تشکیل پلاسما و جت تأثیرگذار است؛ کاهش فاصله باعث تشکیل سریع تر پلاسما می شود اما احتمال وقوع قوس را نیز افزایش می دهد.

نتایج کلی این مطالعه به شرح زیر است:

- افزایش ولتاژ و دبی گاز باعث افزایش طول و پایداری جت پلاسما می شود.
- افزایش فاصله بین الکترونها مانع وقوع قوس شده و ستون پلاسما را پایدارتر می کند.
- ضخامت بیشتر دی الکتریک مقاومت در برابر شکست و دمای بالا را بهبود می بخشد.

در نهایت، تحلیل نظری و روابط تجربی ارائه شده می تواند در طراحی بهینه جت های پلاسما کاربرد داشته باشد. [۲۷].

که در آن Q دبی گاز، a و b پارامترهای تجربی وابسته به شرایط آزمایش و L_0 حداقل طول جت است.

۲. رابطه تجربی استخراج شده بین طول جت و ولتاژ

$$L = 4.1 \times V + 4.7, (R^2 \approx 0.98)$$

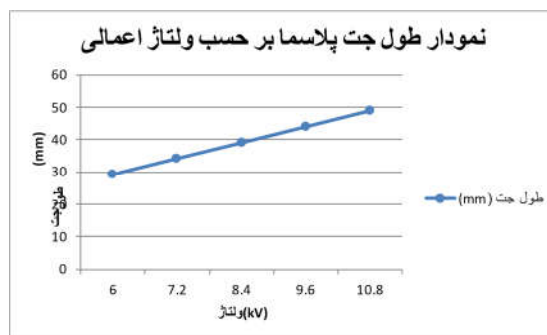
قانون پاشن نشان می دهد که ولتاژ شکست گاز ابتدا با افزایش فشار و فاصله الکترونها کاهش یافته و سپس افزایش می یابد و در نتیجه به مقدار بهینه (کمینه) مشخصی می رسد. بر اسای داده های آزمایش، رابطه تجربی بین ولتاژ اعمالی (V) برای لوله سوم با فاصله ۳۰ میلی متر، دبی ۱۳ لیتر بر دقیقه و طول جت پلاسما (L) به صورت خطی قابل بیان است (شکل ۲۰).

۳. رابطه تجربی طول جت برحسب دبی برای بررسی اثر دبی گاز بر طول جت، از رابطه نمای استفاده شد:

$$L(Q) = L_0 + a(1 - e^{-bQ})$$

این روابط نشان دهنده تأثیر ترکیبی ولتاژ و دبی گاز بر تولید و پایداری ستون پلاسما در فشار اتمسفر هستند [۲۰ و ۲۱]. ساختار دینامیکی مشاهده شده در برخی ولتاژها، با پدیده «پلاسما بولت ها» که در جت های غیرتعادلی گزارش شده، تطابق دارد [۲۲].

تجزیه و تحلیل نتایج نشان می دهد که با افزایش ولتاژ، توان ورودی افزایش یافته و انرژی یونیزاسیون بهبود می یابد که این امر منجر به افزایش طول جت پلاسما می شود. با این حال، در ولتاژهای بالا، به خصوص زمانی که فاصله بین الکترونها کم باشد، احتمال وقوع قوس افزایش می یابد. از این رو، ضخامت لوله دی الکتریک و تعیین فاصله بهینه بین الکترونها نقش کلیدی در حفظ پایداری پلاسما ایفا می کنند. دقت اندازه گیری در آزمایش های پلاسما، به ویژه در شرایط فشار اتمسفری، نقش حیاتی در اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج ایفا می کند. در این پژوهش، برای ارزیابی کیفیت برازش مدل تجربی، از ضریب تعیین تقریباً برابر با $(R^2 \approx 0.98)$ استفاده شد که نشان دهنده تطابق بسیار خوب داده های تجربی با مدل ارائه شده است. علاوه بر این، نمودارهای نتایج همراه با نوارهای خطا با دامنه ± 1 میلی متر رسم شده اند که میزان پراکندگی داده ها و سطح اطمینان نتایج را به طور دقیق منعکس می کنند.



شکل ۲۰ - نمودار رابطه بین طول جت پلاسما و ولتاژ اعمالی برای لوله سوم با فاصله الکترونی ۳۰ میلی متر (رابطه تجربی)

مقدار ضریب تعیین ($R^2 \approx 0.98$) نشان دهنده تطابق بسیار خوب داده ها با مدل خطی بوده و صحت فرضیات خطی بودن رفتار سیستم در محدوده آزمایش را تأیید می کند.

۶- مراجع

- [20] Park S, Choe W, Youn Moon S, Park J. Electron density and temperature measurement by continuum radiation emitted from weakly ionized atmospheric pressure plasmas. *Applied Physics Letters*. 2014 Feb 24;104(8).
- [21] Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Science and Technology*. 2017 Apr 3;26(5):053001.
- [22] Lu X, Laroussi M, Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Science and Technology*. 2012 Apr 16;21(3):034005.
- [23] Chen FF. *Introduction to plasma physics*. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [24] Li X, Yuan N, Jia P, Chen J. A plasma needle for generating homogeneous discharge in atmospheric pressure air. *Physics of Plasmas*. 2010 Sep 1;17(9).
- [25] Walsh JL, Iza F, Janson NB, Law VJ, Kong MG. Three distinct modes in a cold atmospheric pressure plasma jet. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010 Feb 3;43(7):075201.
- [26] Park S, Choe W, Youn Moon S, Park J. Electron density and temperature measurement by continuum radiation emitted from weakly ionized atmospheric pressure plasmas. *Applied Physics Letters*. 2014 Feb 24;104(8).
- [1] Bibinov NK, Fateev AA, Wiesemann K. Variations of the gas temperature in He/N₂ barrier discharges. *Plasma Sources Science and Technology*. 2001 Sep 27;10(4):579.
- [2] Chiper AS, Chen W, Mejlholm O, Dalgaard P, Stamate E. Atmospheric pressure plasma produced inside a closed package by a dielectric barrier discharge in Ar/CO₂ for bacterial inactivation of biological samples. *Plasma Sources Science and Technology*. 2011 Feb 28;20(2):025008.
- [3] Laroussi M, Akan T. Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: a review. *Plasma Processes and Polymers*. 2007 Nov 22;4(9):777-88.
- [4] Isbary G, Shimizu T, Li YF, Stolz W, Thomas HM, Morfill GE, Zimmermann JL. Cold atmospheric plasma devices for medical issues. *Expert review of medical devices*. 2013 May 1;10(3):367-77.
- [5] Kolb JF, Mohamed A, Price RO, Swanson RJ, Bowman A, Chiavarini RL, Stacey M, Schoenbach KH. Cold atmospheric pressure air plasma jet for medical applications. *Applied Physics Letters*. 2008 Jun 16;92(24).
- [6] Arjunan KP, Sharma VK, Ptasińska S. Effects of atmospheric pressure plasmas on isolated and cellular DNA—a review. *International journal of molecular sciences*. 2015 Jan 29;16(2):2971-3016.
- [7] Reece Roth J. *Industrial plasma engineering*. IOP. 1995.
- [8] Lu X, Laroussi M, Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Science and Technology*. 2012 Apr 16;21(3):034005.
- [9] Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma chemistry and plasma processing*. 2003 Mar;23(1):1-46.
- [10] Teschke M, Kedzierski J, Finantu-Dinu EG, Korzec D, Engemann J. High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005 May 23;33(2):310-1.
- [11] Nur M, Kinandana AW, Winarto P, Muhlisin Z. Study of an atmospheric pressure plasma jet of Argon generated by column dielectric barrier discharge. In *Journal of Physics: Conference Series* 2016 Nov 1 (Vol. 776, No. 1, p. 012102). IOP Publishing.
- [12] Lu X, Naidis GV, Laroussi M, Reuter S, Graves DB, Ostrikov K. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Physics Reports*. 2016 May 4;630:1-84.
- [13] Yao C, Chang Z, Chen S, Ma H, Mu H, Zhang GJ. Comparative simulation analysis on the ignition threshold of atmospheric He and Ar dielectric barrier discharge. *Physics of Plasmas*. 2017 Sep 1;24(9).
- [14] Laurent M, Desjardins E, Meichelboeck M, Naudé N, Stafford L, Gherardi N, Laroche G. Characterization of argon dielectric barrier discharges applied to ethyl lactate plasma polymerization. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017 Nov 3;50(47):475205.
- [15] Mohamed AA, Kolb JF, Schoenbach KH. Low temperature, atmospheric pressure, direct current microplasma jet operated in air, nitrogen and oxygen. *The European Physical Journal D*. 2010 Dec;60(3):517-22.
- [16] Stepanova O, Pinchuk M, Astafiev A, Chen Z. A streamer behavior evolution during an applied voltage cycle in helium and argon atmospheric pressure plasma jets fed by DBD. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2020 Mar 5;59(SH):SHHC03.
- [17] Chen FF. *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. New York: Plenum press; 1984 Jan 31.
- [18] Mericam-Bourdet N, Laroussi M, Begum A, Karakas E. Experimental investigations of plasma bullets. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009 Feb 17;42(5):055207.
- [19] Jonkers J, Van De Sande M, Sola A, Gamero A, Van Der Mullen J. On the differences between ionizing helium and argon plasmas at atmospheric pressure. *Plasma Sources Science and Technology*. 2002 Dec 23;12(1):30.