

## بررسی اثر شکل ولتاژ منبع توان الکتریکی بر ویژگی‌های تابشی و چگالی جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری

فرشاد صحبت‌زاده<sup>۱</sup>، مولود باقری<sup>۱</sup> و سمانه مطلبی<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر
۲. گروه پژوهشی نانو و بیوتکنولوژی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

پست الکترونیکی: Lab.plasma@umz.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۹/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰)

### چکیده

در این مقاله به تولید جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری گاز آرگون با استفاده از روش تخلیه سد دی‌الکتریک با سه منبع توان الکتریکی با ولتاژ سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای در بسامد یکسان ۸ کیلوهرتز پرداختیم. ابتدا ویژگی مدار الکترونیک مورد نظر را برای تولید ولتاژ فشار قوی با شکل ولتاژ خروجی سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای توضیح می‌دهیم. سپس اثر شکل ولتاژ اعمالی در شکست الکتریکی گاز بررسی می‌کنیم. غلظت نسبی گونه‌های فعال شیمیایی از جمله اکسیژن، نیتروژن اتمی، رادیکال هیدروکسیل به وسیله بیناب نمایی گسیل نوری اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از یک مدل ساده نشان دادیم زمان برخاست کم موجب افزایش چگالی الکترون می‌شود بنابراین با توان الکتریکی مصرفی پایین‌تر می‌توان یک پلاسمای سرد تولید کرد.

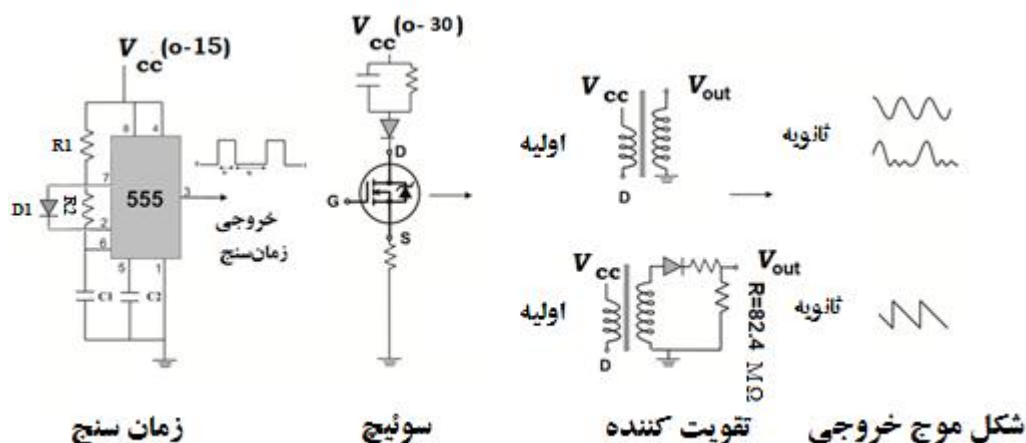
واژه‌های کلیدی: تخلیه سد دی‌الکتریک، پلاسمای سرد فشار اتمسفری، جت پلاسمای اتمسفری

### ۱. مقدمه

دارند. ما در این پژوهش تولید پلاسمای را بر پایه تخلیه سد دی‌الکتریک<sup>۱</sup> بنا نهادیم. ساختار این تخلیه شامل دو الکتروود می‌باشد که دست کم یکی از آنها با یک لایه از دی‌الکتریک پوشیده شده است. حضور یک یا چند لایه عایق بین دو الکتروود متصل به منبع تغذیه یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای تشکیل تخلیه فشار اتمسفری غیرحرارتی است [۱۱]. یکی از انواع تخلیه‌های الکتریکی غیرحرارتی فشار اتمسفری، جت پلاسمای اتمسفری

تخلیه‌های الکتریکی اتمسفری در سال‌های اخیر به دلیل دارا بودن مزایایی از جمله مقرون به صرفه بودن آزمایش، عملکرد بدون نیاز به خلأ و امکان دستیابی و پردازش نمونه بدون محدودیت در ابعاد و نیز واکنش پذیری بالا، به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پلاسمای سرد فشار اتمسفری کاربردهای زیادی در اصلاح سطوح [۱]، کشتن باکتری [۲، ۳]، بهبودی زخم‌ها و سرطان [۴، ۵] و صنعت نساجی [۶-۱۰]

۱. Dielectric Barrier Discharge (DBD)



شکل ۱. نمای کلی منبع توان الکتریکی پلاسما.

تولید پلاسما از نظر دما و چگالی را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا ضمن یافتن مزیت‌ها و معایب هر یک، ویژگی آنها هم با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از شکل موج دندان‌اره‌ای می‌تواند در توان تزریق بسیار پایین منجر به تولید جت پلاسما سرد اتمسفری شود به طوری که جت پلاسما تولید شده حاوی همان عناصر فعال شیمیایی باشد که جت پلاسما موج سینوسی و پالسی دارا می‌باشند. همچنین در این کار با استفاده از یک مدل ساده تئوری، به صورت عددی نشان می‌دهیم که کاهش زمان برخاست و لتاژ برانگیزش نقش مهمی در افزایش چگالی الکترونی دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند در ساخت چشمه‌های پلاسمایی بهینه برای کاربردهای پزشکی و صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این کار، تولید پلاسما سرد اتمسفری با ساختار سد دی‌الکتریک توسط منبع تغذیه‌ای که از مجموعه‌های زمان سنج، سوئیچ و تقویت کننده ساخته شده است، صورت پذیرفت. نمای کلی این مجموعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

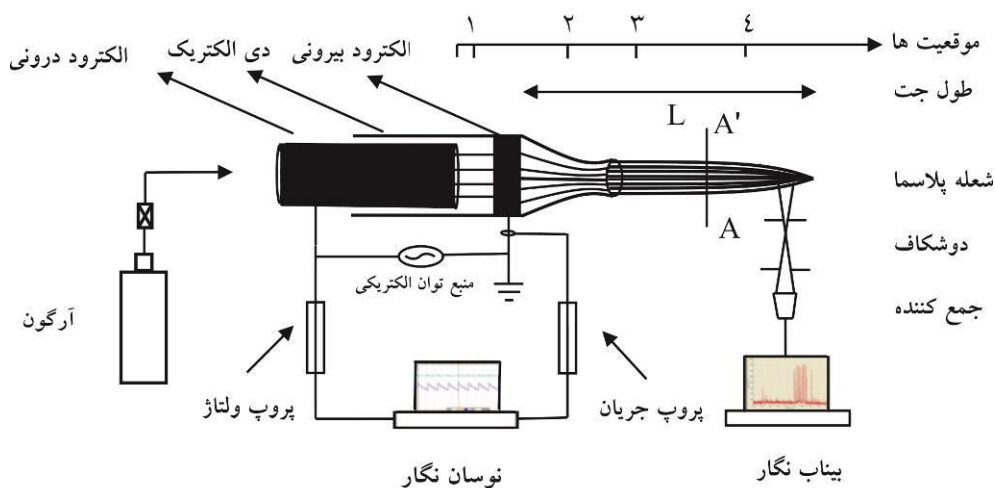
این منبع تغذیه فشار قوی AC با اختلاف پتانسیلی بین ۱۵-۶۰ کیلوولت در بسامدهای ۶۰-۵ کیلوهرتز و توان متوسط ۱۰۰ وات تولید می‌کند. این منبع به گونه‌ای طراحی شده که دوره کاری موج را نیز تغییر می‌دهد تا بهترین نقطه کار از

است که به عنوان یک روش جایگزین در رفع آلودگی از سطوح به ویژه در بیمارستان‌ها و درمان زخم‌ها [۱۲] مطرح شده است. داشتن یک جت پلاسما بهینه از نظر توان مصرفی و کارایی می‌تواند یک هدف مهم در کاربردهای پلاسما محسوب شود. لذا تلاش‌هایی جهت بهینه‌سازی و معرفی ساختارهای مناسب برای کاربردهای مختلف در جریان می‌باشد [۱۳-۱۵]. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که تشکیل پلاسما تابع شرایط منبع تغذیه نیز می‌باشد و ویژگی مولد مانند بسامد، دوره کار<sup>۱</sup> و شکل و لتاژ تأثیر بسزایی در شکل دهی حالت پلاسما دارد. بررسی ویژگی‌های پلاسما با شکل و لتاژهای مختلف موضوع ارزشمندی است. جت‌های پلاسمایی تولید شده تا کنون اکثراً با شکل و لتاژ سینوسی و در یک بسامد صورت گرفته است. والش و همکاران جت‌هایی با شکل و لتاژ سینوسی و مربعی را در بسامدهای مختلف آزمایش کرده‌اند [۱۶]. از آنجایی که مشخصات شکست گاز و پلاسما تشکیل شده تابع بسامد موج نیز می‌باشد لذا مقایسه پلاسماهای آنها با بسامدهای مختلف تعارض‌هایی را به دنبال دارد. برای اینکه تعارض‌ها و مشکلات تئوری در مقایسه این گونه پلاسماهای مرتفع شود، در این پژوهش ما با بهینه کردن توان خروجی چشمه پلاسما، اثر شکل و لتاژ سه منبع سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای با بسامد ثابت ۸ کیلوهرتز و دوره کار ۵۰ درصد را در ویژگی جت پلاسما بررسی می‌کنیم و تأثیر شکل و لتاژ در

۱. Duty Cycle

جدول ۱. مشخصات ترانس سه منبع توان الکتریکی.

شکل ولتاژ	$R_{in}$ ( $\Omega$ )	$L_{in}$ (mH)	$R_{out}$ (k $\Omega$ )	$L_{out}$ (H)
سینوسی	۳,۴۱	۸,۰۶۲	۱۱,۵۷	۴۹,۹۴
پالسی	۰,۵۷	۰,۲۶	۷,۱۸۵	۲,۸۶
دندان اره‌ای	۰,۶	۰,۶۹۲	۱۰۰۰۰	۵,۹۸



شکل ۲. طرح کلی چیدمان آزمایش.

به زمین آزمایشگاه متصل می‌شود. لوله نازل دار از جنس شیشه پیرکس به طول ۱۰۳ میلی‌متر و با ضخامت ۱ میلی‌متر در فضای بین دو الکترود قرار می‌گیرد و با الکترود بیرونی در تماس است. گاز آرگون از یک طرف الکترود داخلی وارد شده و در فضای میان دو الکترود درون لوله شیشه‌ای با اعمال ولتاژ شارش می‌یابد. آهنگ شارش گاز توسط دستگاه شارش‌سنجی که به منبع آرگون متصل شده است اندازه‌گیری می‌شود. با تغییر مشخصات الکتریکی تقویت کننده شکل ولتاژ سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای با ولتاژ ۱۵-۵ کیلوولت تولید می‌شود.

## ۲.۱. اندازه‌گیری ولتاژ شکست گاز

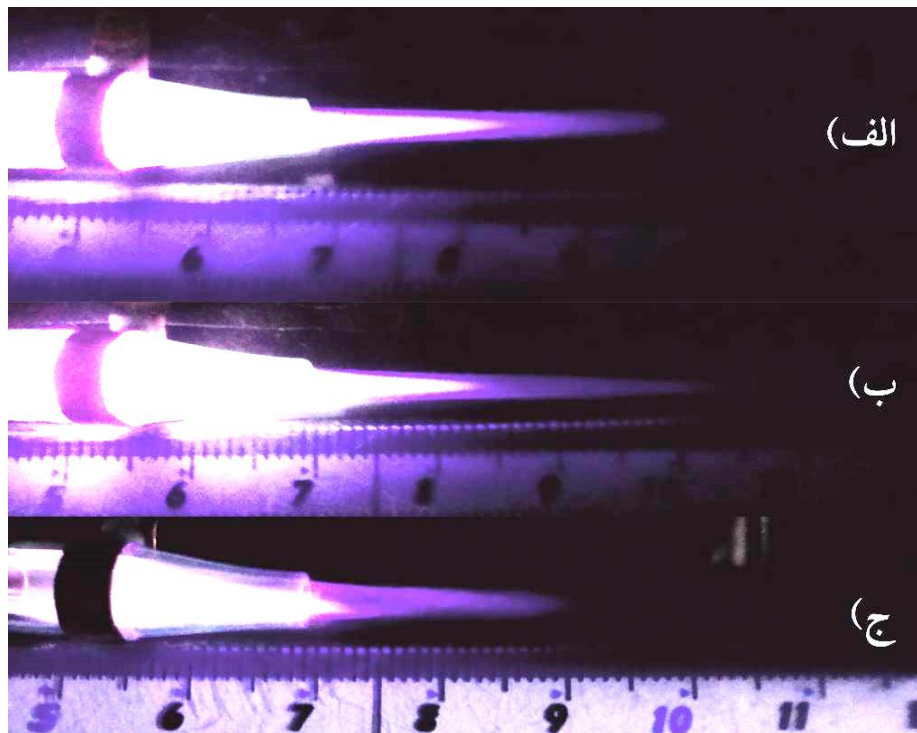
پس از تنظیم منبع توان الکتریکی برای هر یک از سه شکل ولتاژ و تنظیم الکترودها در فاصله ۴/۵ میلی‌متر، در بسامد ۸ کیلوهرتز و دوره کار موج نوسان ساز اولیه ۵۰ درصد، ولتاژ اعمال شد. وقتی ولتاژ اعمال شده به دو الکترود به ولتاژ

نظر توان مصرفی با ثابت نگه داشتن بسامد به دست آید. اساس این مدار به پیچیده‌تر تسلا معروف است [۱۷] و اولین بار در سال ۱۸۹۱ با استفاده از مدار RLC معرفی شد. در این کار یک سوئیچ حالت جامد IRFP۲۶۰ جایگزین مدار RLC شده است تا به عنوان منبع جریان وظیفه نوسان و کلید زنی را انجام دهد. بخش تقویت کننده نیز متشکل از مدار سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای می‌باشد که اندوکتانس آنها در جدول ۱ مشاهده می‌شود. در این جدول  $R_{in}$  و  $R_{out}$  به ترتیب مقاومت اولیه و ثانویه پیچ و هم چنین  $L_{in}$  و  $L_{out}$  به ترتیب اندوکتانس اولیه و ثانویه پیچ است.

طرح کلی چیدمان آزمایش تولید پلاسما سرد که در شکل ۲ نشان داده شده است، شامل قسمت‌های مختلف به قرار زیر می‌باشد: الکترود داخلی لوله‌ای شکل از جنس مس با قطر درونی ۳/۴ میلی‌متر، قطر خارجی ۵/۱۰ میلی‌متر و طول ۱۰۳ میلی‌متر می‌باشد. الکترود خارجی، لوله‌ای مسی به طول ۴/۴ میلی‌متر، قطر درونی ۸/۲۲ و قطر خارجی ۱۰/۲ میلی‌متر

جدول ۲. مقایسه ولتاژ شکست سه شکل ولتاژ با آهنگ شارش گاز ۱/۵ lit/min، فاصله الکترودها ۴/۵ mm.

ولتاژ دندان‌اره‌ای	ولتاژ پالسی	ولتاژ سینوسی	شکل ولتاژ
[v]	[v]	[v]	
۴۴۰	۵۰۰۰	۴۸۰۰	ولتاژ شکست

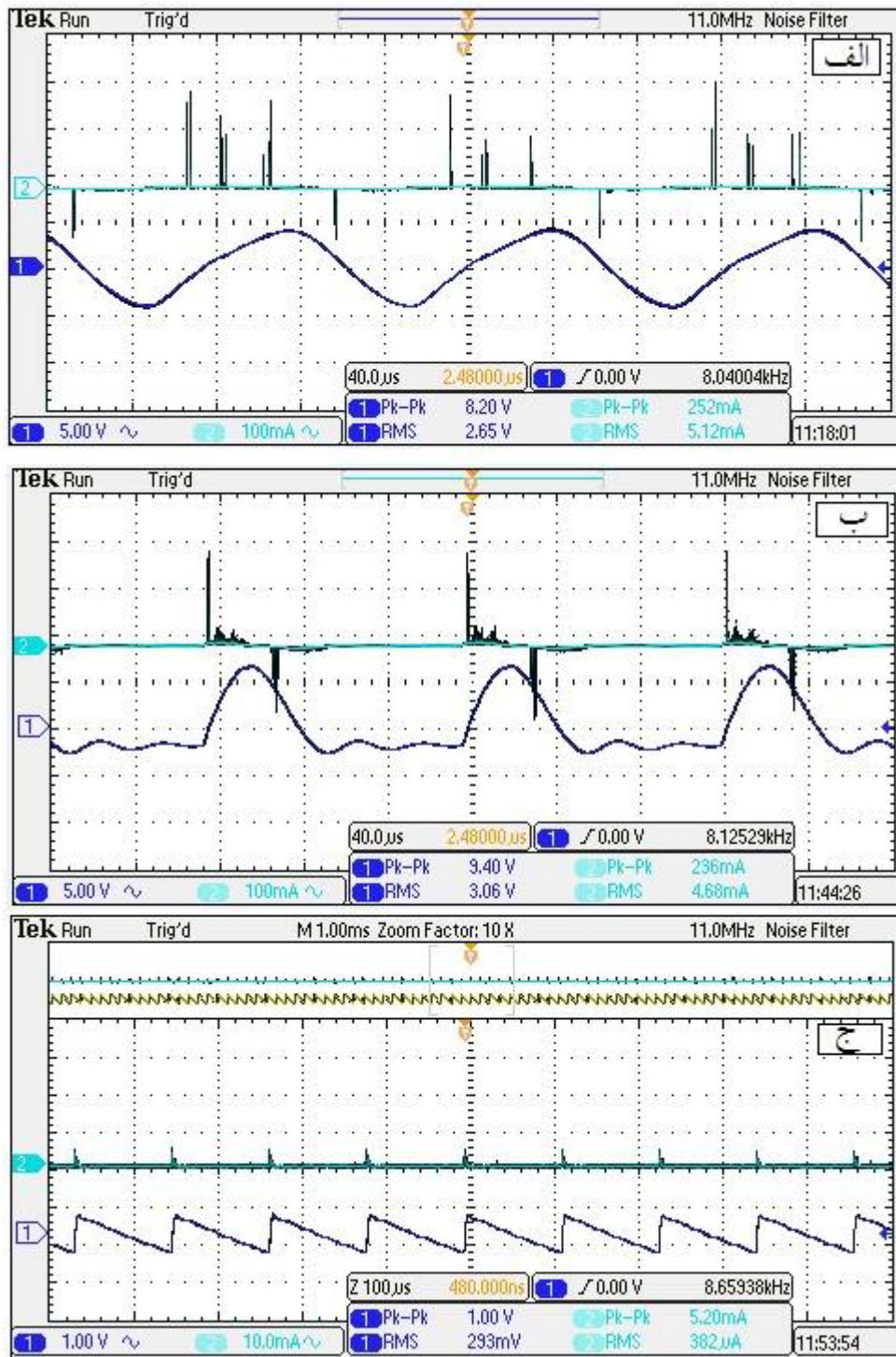


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) تصویر شعله پلاسمای منبع توان الکتریکی با ولتاژ سینوسی، (ب) تصویر شعله پلاسمای منبع توان الکتریکی با ولتاژ پالسی، (ج) تصویر شعله پلاسمای منبع توان الکتریکی با ولتاژ دندان‌اره‌ای.

## ۲.۲. مشخصات الکتریکی جت پلاسما

یکی از مشخصات الکتریکی مهم پلاسما، مشخصه‌های ولتاژ- جریان آن می‌باشد. برای اندازه‌گیری مشخصات الکتریکی شعله پلاسمای تولید شده، از اسیلوسکوپ دیجیتال مدل ۲۰۱۲ Tektronix-DPO، پروپ ولتاژ مدل ۳۰۰ Tektronix- P۶۰۱۵A، تقویت کننده جریان مدل ۳۰۰ Tektronix- TCPA و پروپ جریان مدل Tektronix-Tcp ۳۱۲ استفاده کردیم. وقتی ولتاژ اعمالی به ولتاژ شکست می‌رسد، پلاسما از حالت تاج به حالت تخلیه تابان تبدیل می‌شود. منحنی ولتاژ- زمان و جریان- زمان وابسته به هر یک از سه شکل ولتاژ در شکل ۴ (الف) تا (ج) نشان داده شده است.

شکست می‌رسد، گاز از حالت نارسانا به یک رسانا تبدیل می‌شود و به اصطلاح به پلاسما تبدیل می‌گردد. با توجه به مقدار ولتاژ، جریان قوی ظاهر می‌شود به طوری که در هر نیم دوره حداقل یک قله جریان مجزا دیده می‌شود. ولتاژ شکست گاز آرگون با سه شکل ولتاژ در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ (الف) تا (ج) شعله جت پلاسمای تولید شده آرگون در فشار اتمسفر برای ولتاژهای سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای نشان داده شده است. زمان برخاست ولتاژ سینوسی ۱۲۵ میکروثانیه، زمان برخاست ولتاژ پالسی حدود ۱۳ میکروثانیه و زمان برخاست ولتاژ دندان‌اره‌ای ۲ میکروثانیه است. یک مقاومت ۸۲/۴ مگا اهم در مدار دندان‌اره‌ای قرار داده شده است.

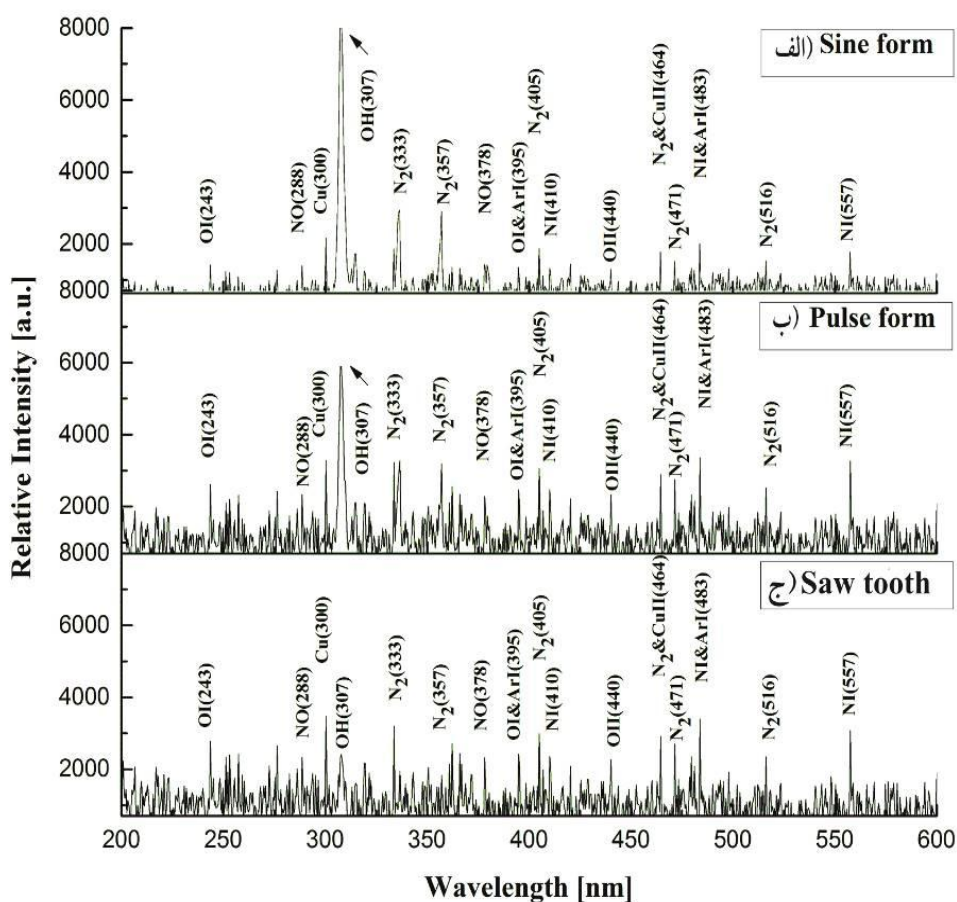


شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) (الف) نمودار ولتاژ - زمان و جریان - زمان ولتاژ سینوسی، (ب) نمودار ولتاژ - زمان و جریان - زمان ولتاژ پالسی، (ج) نمودار ولتاژ - زمان و جریان - زمان ولتاژ دنداناره‌ای.

OceanOptics مدل CG + HR2000 با قدرت تفکیک و جمع کننده ۱ نانومتر استفاده کردیم. این بیناب سنج دارای شکاف ورودی ۵ میکرومتر می‌باشد و طول موج‌های ۱۱۰۰ - ۲۰۰

### ۳.۲. بیناب سنجی نوری

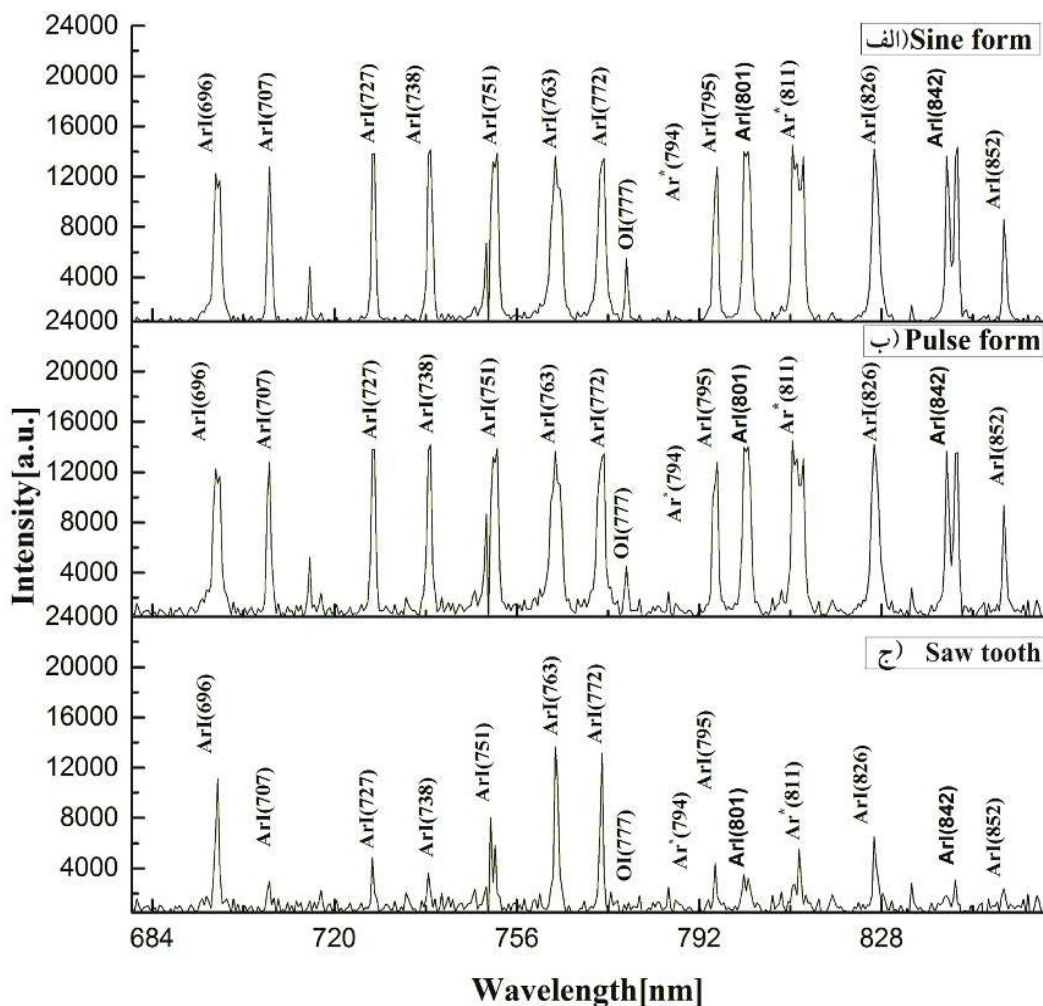
برای شناسایی گونه‌های موجود در جت پلازما از بیناب سنجی گسیل نوری استفاده کردیم. به این منظور از دستگاه بیناب سنج



شکل ۵. بیناب تابشی جت پلاسمای آرگون برای سه منبع توان الکتریکی از فضای بین دو الکترود و در بازه ۲۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر: (الف) شکل ولتاژ سینوسی، (ب) شکل ولتاژ پالسی، (ج) شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای.

پلاسمای تولید شده ولتاژ برانگیزش سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای با گاز آرگون را در فاصله میان دو الکترود و در بازه طول موج ۲۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر و شکل ۶ (الف) تا (ج) بیناب سنجی سه شکل ولتاژ را در فاصله میان دو الکترود با گاز آرگون در بازه طول موج ۶۸۴ تا ۹۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. گونه‌های فعال ایجاد شده در شعله پلاسمای فاکتور تعیین کننده در کارایی پلاسمای می‌باشند. از جمله این گونه‌ها  $N_2$ ،  $Ar^*$ ،  $NO$ ،  $OH$  و  $OI$  می‌باشند که از میان آنها،  $NO$ ،  $OH$  و اکسیژن اتمی  $OI$  بسیار واکنش پذیر هستند و نیمه عمر بالاتری نسبت به سایر عوامل تولید شده دارند. این گونه‌های واکنش پذیر قادر به جدا کردن اتم‌ها از سطح و جایگزین کردن آنها با گروه‌های عاملی مؤثر و در نتیجه اصلاح سطوح هستند. همچنین

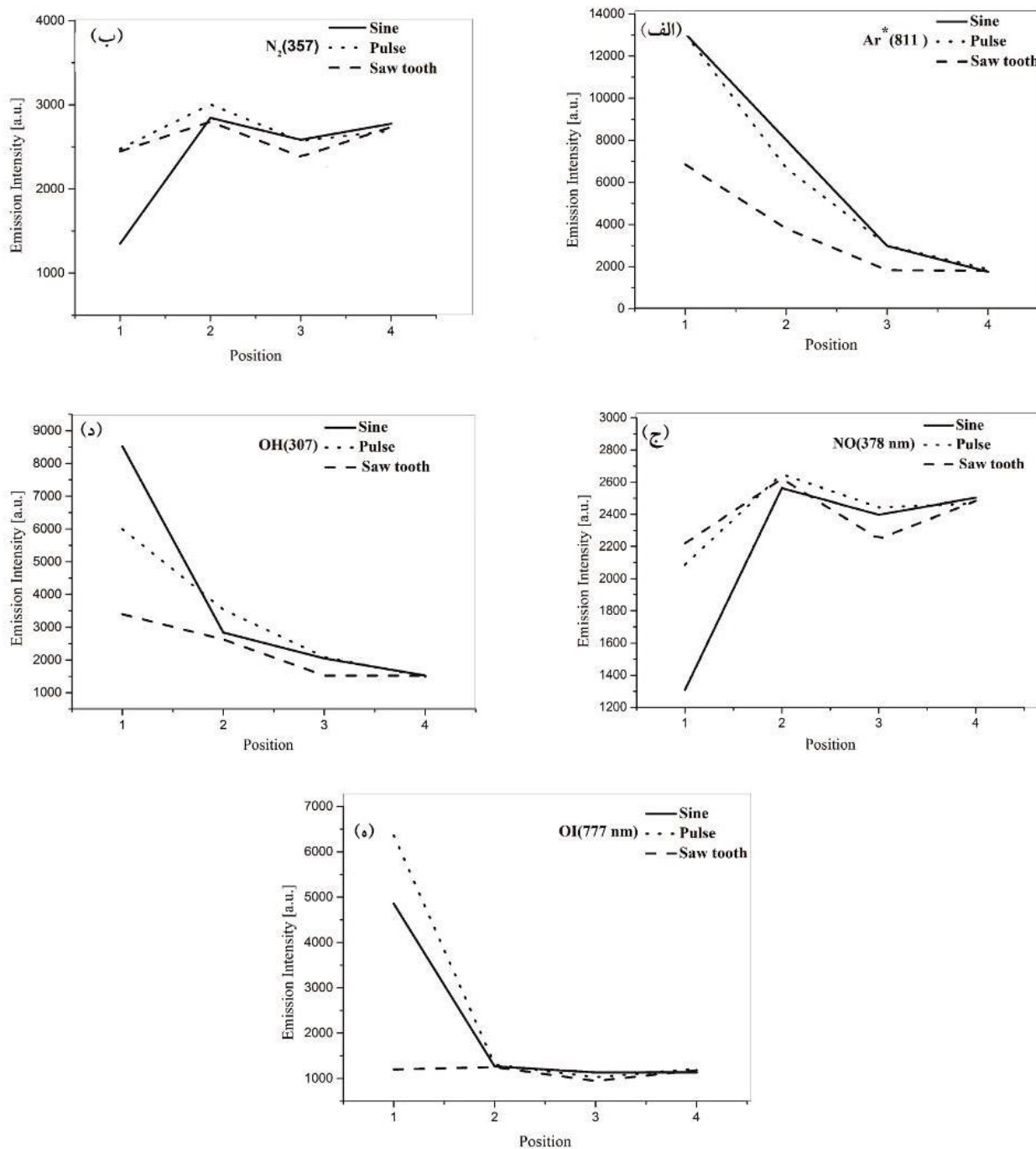
نانومتر را پوشش می‌دهد. توری بیناب سنج دارای ۳۰۰ خط در هر میلی‌متر می‌باشد. برای بیناب سنجی، دو شکاف موازی به عرض ۲ میلی‌متر و فاصله ۲ سانتی‌متر از هم را مقابل فیبر نوری از جنس کوارتز متصل به بیناب سنج قرار داده و آن را در فاصله ۵ میلی‌متر عمود بر شعله پلاسمای ابتدا در مکان بین دو الکترود و سپس در موقعیت‌های، مکان ۱ فاصله میان دو الکترود، مکان ۲ در فاصله میان الکترود زمین و لبه نازل، مکان ۳ در فاصله ۱ سانتی‌متر دور از نازل و مکان ۴ در فاصله ۳٫۷ سانتی‌متر دور از نازل در امتداد شعله قرار دادیم (شکل ۲). بیناب پلاسمای از فیبر نوری به بیناب سنج منتقل و سپس در کامپیوتر برای سه شکل ولتاژ سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای ثبت شده است. شکل ۵ (الف) تا (ج) بیناب سنجی سه جت



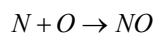
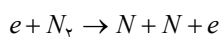
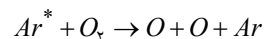
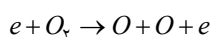
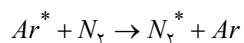
شکل ۶. بیناب تابشی جت پلاسمای آرگون برای سه منبع توان الکتریکی از فضای بین دو کترود و در بازه ۶۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر: (الف) شکل ولتاژ سینوسی، (ب) شکل ولتاژ پالسی، (ج) شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای.

گرفته است. وجود مس اتمی پدیده پراکنش مس از الکتروود مسی را نشان می‌دهد. همچنین وجود عناصر اتمی توانایی پلازما را در تبدیل گونه‌های مولکولی به اتمی نشان می‌دهد. در طول موج‌های کوتاه شدت بعضی از عناصر اتمی در ولتاژ دندان‌اره‌ای بیشتر از پالسی و سینوسی مشاهده می‌شود همچنین در طول موج‌های بلند شدت بعضی دیگر از عناصر اتمی معکوس آن است. در شکل ۷ (ب) و ۷ (ج) شدت تابش NO و N<sub>2</sub> با دور شدن از نازل جت پلازما افزایش می‌یابد زیرا جت آرگون با وارد شدن به محیط اطراف خود که از مولکول‌های هوا تشکیل شده است، آنها را یونیزه می‌کند در نتیجه اکسیژن و

گونه‌های واکنش پذیر اکسیژنی OI دارای اثر اکسیداسیون قوی روی ساختار خارجی سلول‌ها می‌باشند که یکی از مکانیزم‌های مؤثر باکتری کشی است، تحریک NO<sub>x</sub> ها نیز موجب تولید hv شده و این باعث شکستن اتصال های DNA می‌شود که یکی دیگر از روش‌های غیر فعال سازی باکتری‌ها می‌باشد. از اینرو شناسایی این گونه‌ها در پلاسمای تولید شده مهم است. شکل ۷ (الف) تا (ه) نمودار برخی از گونه‌های فعال پلاسمایی را بر حسب موقعیت مکانی بیناب سنج شکل ۲ نشان می‌دهد. با بررسی این طیف‌ها و نسبت دادن خطوط منتشر شده به اتم‌ها و مولکول‌های برانگیخته معین، ترکیبات تخلیه مورد بررسی قرار



شکل ۷. شدت نسبی عناصر برحسب موقعیت بیناب سنج: (الف) Ar\*، (ب) N<sub>2</sub>، (ج) NO، (د) OH، (ه) OI



نیتروژن موجود در هوایی که به جت برخورد می‌کنند یونیزه

می‌شود و نیتروژن مولکولی تحریک شده تولید می‌شود و

همچنین در اثر تجزیه مولکول اکسیژن، ترکیب NO تولید

می‌گردد. واکنش‌های زیر این پدیده را توضیح می‌دهد:





جدول ۳. توان تزریقی سه منبع توان الکتریکی.

شکل ولتاژ	$P_{in}$ [W]	$V_{out}$ [KV]	Flow [li/min]	$P$ [W/cm <sup>3</sup> ]
سینوسی	۲۰۱۶	۸٫۲	۱٫۵	۶٫۳
پالسی	۲۴٫۵۴	۹٫۴	۱٫۵	۱۳٫۴
دندان اره‌ای	۵٫۸۵	۱	۱	۰٫۰۰۳۷

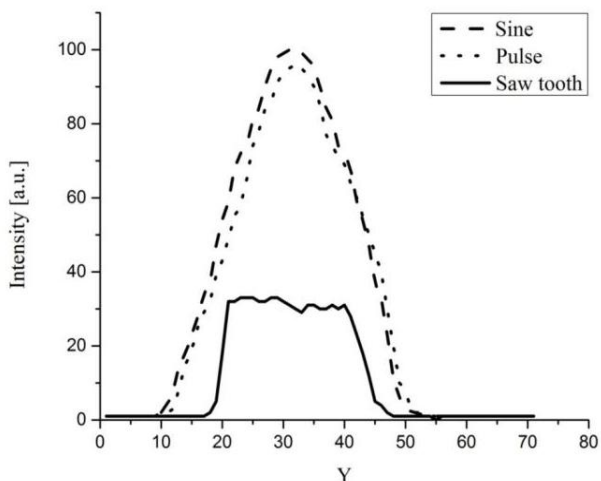
#### ۴.۲. توان تزریق شده پلاسما

چون الکترودهای توان دار و زمین یک ساختار خازنی را تشکیل می‌دهند بنابراین با اعمال ولتاژ متناوب همیشه یک جریان جابه‌جایی از مدار عبور می‌کند. از طرف دیگر وقتی گاز بین دو الکتروود یا به عبارت دیگر گاز داخل خازن از نظر الکتریکی شکسته می‌شود، رسانندگی محدودی دارد به عبارت دیگر هنوز الکترودها دارای ظرفیت خازنی می‌باشند لذا با حضور پلاسما بین دو الکتروود، ظرفیت خازنی دو الکتروود به دلیل محدود بودن رسانندگی پلاسمای کم یونیزه، جریان جابه‌جایی را در ولتاژ متناوب عبور خواهد داد.

با توجه به دلیل ذکر شده، در محاسبه توان تزریق شده به پلاسما برای هر سه شکل ولتاژ جریان جابه‌جایی را از جریان کل ثبت شده کم کرده‌ایم. سپس جریان خالص پلاسمایی را مد نظر قرار دادیم و با استفاده از حاصل ضرب ولتاژ لحظه‌ای در جریان لحظه‌ای که توسط نوسان نگار ثبت شده است، توان تزریق شده به سه جت پلاسما را محاسبه کردیم. حجم مورد نظر پلاسما را فضای بین دو الکتروود در نظر گرفتیم که مقدار آن  $V = ۰٫۱۳۷$  سانتی‌متر مکعب به دست آمد. در جدول ۳  $P_{in}$  توان تغذیه سوئیچینگ و  $P$  توان تزریقی به جت پلاسما در واحد حجم پلاسما می‌باشد. دیده می‌شود که توان تزریق شده به پلاسما برای شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای کمترین مقدار را دارد.

#### ۵.۲. شدت سنجی

از آنجایی که بررسی مدهای تخلیه جهت استفاده کاربردی آن مهم می‌باشد، به بررسی مد اشتعال تخلیه می‌پردازیم. برای این منظور با گرفتن عکس توسط دوربین دیجیتالی و تبدیل کدهای رنگی به توزیع شدت نسبی، منحنی توزیع نسبی شدت تابندگی



شکل ۸. شدت سنجی پلاسمای ولتاژ سینوسی، پلاسمای ولتاژ پالسی و پلاسمای ولتاژ دندان‌اره‌ای در راستای خط A-A' که در شکل ۲ نمایش داده شده است.

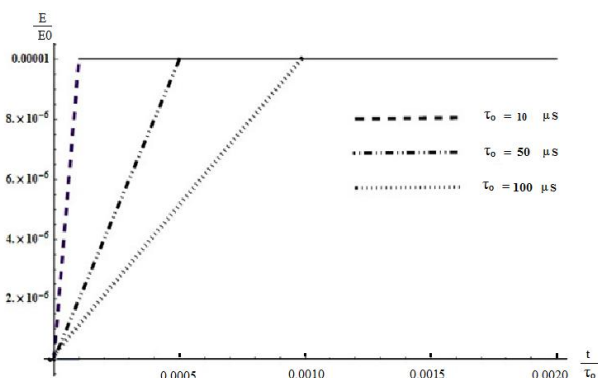
را در راستای عمود بر شعله رسم کردیم و سپس مد تخلیه را بررسی نمودیم. برای گرفتن عکس‌های دیجیتالی پلاسما از دوربین Sony مدل DSC-W ۳۵۰ استفاده کردیم. شکل ۸ منحنی توزیع نسبی شدت تابندگی را برای هر سه شکل ولتاژ نشان می‌دهد.

#### ۶.۲. وابستگی طول جت به شکل ولتاژ خروجی منبع تغذیه

طول جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری وابسته به عواملی از قبیل شکل ولتاژ منبع تغذیه، ولتاژ اعمالی، سرعت شارش گاز و فاصله بین الکترودها می‌باشد. با افزایش ولتاژ یا سرعت شارش گاز، طول جت افزایش می‌یابد و در یک حالت حدی به حالت اشباع می‌رسد. علت اشباع طول جت بر حسب ولتاژ، تثبیت چگالی پلاسما در مد تخلیه الکتریکی تابان می‌باشد، که اگر

جدول ۴. طول جت سه شکل موج، سینوسی، پالسی و دندان‌اره‌ای.

شارش [li/min]	L [cm]	V [kv]	P [w]	شکل ولتاژ
۱٫۵	۳٫۲	۱۰٫۲	۲۱٫۵	سینوسی
۱٫۵	۴٫۲	۹٫۲	۲۲٫۱	پالسی
۱٫۰	۲٫۵	۰٫۸	۹	دندان‌اره‌ای



شکل ۹. تغییرات میدان الکتریکی بر حسب  $t/\tau_0$  برای سه زمان برخاست ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکروثانیه.

است. به‌عنوان مثال، شکل ۹ تغییرات میدان الکتریکی اعمالی را برای سه زمان برخاست ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکروثانیه نشان می‌دهد. می‌دانیم چگالی الکترونی در حضور یونش و اتلاف ناشی از پخش و بازترکیب به صورت زیر است [۱۸]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D_e \nabla^2 n_e + (v_i - v_{\beta} n_e) n_e, \quad (9)$$

که  $v_i$  بسامد یونش می‌باشد و وابستگی شدیدی به میدان الکتریکی دارد به طوری که  $v_i = Pf\left(\frac{E}{N}\right)$  و با فشار گاز  $p$  متناسب است.  $D_e$  ضریب پخش آزاد الکترون‌ها و  $v_{\beta}$  بسامد بازترکیب الکترون-یون می‌باشد. می‌توان تغییرات چگالی الکترونی را با توجه به وابستگی زمانی بسامد یونیزاسیون به میدان الکتریکی و در نظر گرفتن بسامد پخش به صورت  $v_{dif} = D_e/\Lambda^2$  (  $\Lambda$  طول مشخصه پخش می‌باشد) به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = [v_i(t) - v_{\beta} n_e + v_{dif}] n_e. \quad (10)$$

از طرف دیگر  $v_{\beta}$  و  $v_{dif}$  نسبت به تغییر میدان الکتریکی کاهش یافته  $(E/N)$  تغییرات آرامی دارند و می‌توان با تقریب

ولتاژ باز هم افزایش یابد، حالت پلاسما از تابان به قوس تبدیل می‌شود و پلاسما از پلاسما سرد به پلاسما متعادل و گرم، گذار انجام می‌دهد که مورد دلخواه نیست. علت اشباع طول جت بر حسب شارش گاز، شارش‌های نسبتاً کم باز هم به دلیل تثبیت چگالی پلاسما تولید شده می‌باشد. اگر شارش گاز به مقدار زیادی افزایش یابد، طول جت کاهش خواهد یافت، زیرا پلاسما فرصت بازبایی در بین الکترونها را نخواهد داشت و شارش گاز متلاطم خواهد شد. ما در شرایط تقریباً یکسان طول جت پلاسما سه شکل موج را اندازه‌گیری کردیم و نتایج آن را در جدول ۴ ثبت نمودیم. در این جدول P توان تغذیه سوئیچینگ، V توان خروجی تخلیه الکتریکی، و ستون آخر مقدار شارش گاز و L طول جت پلاسما می‌باشد.

### ۳. اثر زمان برخاست ولتاژ در افزایش چگالی الکترونی

در اینجا با استفاده از یک مدل ساده عددی نشان می‌دهیم که کاهش زمان برخاست ولتاژ اعمالی بر پلاسما، منجر به افزایش چگالی پلاسما می‌شود. ابتدا فرض می‌کنیم که ولتاژ اعمالی یا معادل آن میدان الکتریکی اعمال شده، به صورت زیر باشد به طوری که قابلیت تغییر زمان برخاست با استفاده از تغییر در زمان  $\tau_0$  صورت می‌گیرد. حال شکل ریاضی میدان الکتریکی  $E(t)$  را که دارای زمان برخاست  $\tau_0$  است به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

$$E(t) = \begin{cases} E_0 t & t < \tau_0 \\ E_0 & t > \tau_0 \end{cases}, \quad (8)$$

به طوری که  $E_0$  دامنه بیشینه میدان الکتریکی اعمالی است که در این فرضیه ۱۰۰۰۰ ولت بر متر در نظر گرفته شده است. t زمان اعمال میدان الکتریکی و  $\tau_0$  زمان برخاست ولتاژ اعمالی

جدول ۵. پارامترهای استفاده شده در رابطه ۱۴ [۱۸].

$v_m [S^{-1}]$	$\mu_e [cm^2/V.s]$	$v_\beta [cm^2/S]$	$C [cm^{-1} torr^{-1}]$
$4/28 \times 10^9$	$434/2$	$10^{-7}$	$29,2$
$\Lambda [cm]$	$D_e [torr^{-1}]$	$D [(v/cm.torr)^{-1}]$	$P [torr]$
$0,311$	$K \times 13/57$	$26,6$	$760$

که در آن C و D ثابت‌های ضریب تاونسند برای گاز آرگون و P فشار گاز می‌باشد. با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ می‌توان وابستگی بسامد یونیزاسیون را بر حسب میدان الکتریکی وابسته به زمان به شکل زیر به دست آورد.

$$v_i(t) = \frac{e}{mv_m} E(t) C P_e^{-D \left[ \frac{P}{E(t)} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (14)$$

و در نتیجه، چگالی الکترون‌های تولید شده نیز با رابطه زیر به دست می‌آید.

$$n(t) - n_0 = a_1 \left( \frac{E_0}{\tau_0} \right)^{-1} \left\{ \exp \left[ -a_2 \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] - a_2 \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{a_2^2}{24} \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right) - \frac{a_2^3}{12} \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{4} \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right)^2 - \frac{a_2^4}{24} E_i \left[ -a_2 \left( \frac{E_0 t}{\tau_0} \right)^{-\frac{1}{2}} + \text{const} \right] \right\}. \quad (15)$$

در این رابطه  $a_1 = \frac{ePC}{mv_m}$  و  $a_2 = D\sqrt{P}$  می‌باشد. برای اینکه تأثیر زمان برخاست را در چگالی الکترونی تولید شده، مشاهده کنیم شش زمان برخاست مختلف را برای میدان الکتریکی معادله ۸ در نظر می‌گیریم و تولید الکترون‌ها را در اثر پدیده بهمنی تا زمان یکسانی یک میلی ثانیه با توجه به معادله ۱۵ به دست می‌آوریم به همین منظور با جایگذاری مقادیر موجود در جدول ۵ و با قرار دادن  $K = 6/3$  برای گاز آرگون در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$v_i(t) = 97 \times 10^5 E_0 \left( \frac{t}{\tau_0} \right) e^{-133303 \left( \frac{t}{\tau_0} \right)^{-1/2}}. \quad (16)$$

جدول ۶ تغییرات چگالی الکترون‌ها بر حسب زمان برخاست ولتاژ

خوبی آنها را ثابت فرض کرد یعنی  $v_{dif} = cte$  و  $v_a = cte$  در حالی که  $v_i$  تغییرات افزایشی تندی بر حسب افزایش (E/N) دارد. لذا در اعمال ولتاژ برانگیزش دندان‌اره‌ای با زمان برخاست کم چگالی بیشتری از الکترون‌ها در واحد زمان تولید می‌شود و این منجر به رویداد پدیده بهمنی در ولتاژ پایین تری نسبت به دو شکل موج دیگر می‌شود [۱۹].

از آنجایی که بسامد یونیزاسیون از بسامدهای پخش و باز ترکیب بعد از برخاست ولتاژ برانگیزش، بسیار بزرگ‌تر است یعنی  $v_{dif} n_e \gg v_\beta n_e$ ، بنابراین می‌توان در بررسی اثر زمان برخاست موج از دو جمله مربوط به بازترکیب و پخش صرف نظر کرد. معادله ۱۰ را می‌توان به سادگی حل کرد آنگاه خواهیم داشت:

$$\int_0^{\tau_0} \frac{dn_e}{n_e} = \int_0^{\tau_0} v_i(t) dt, \quad (11)$$

به طوری که  $n_e(0) = n_0$  می‌باشد. وابستگی بسامد یونیزاسیون به میدان الکتریکی یا به عبارت دیگر وابستگی آن به زمان را می‌توان از ضرایب یونیزاسیون تاونسند  $\alpha$  و سرعت سوق  $V_d$  محاسبه کرد.

$$v_i(t) = \alpha v_d = \alpha \mu_e |E(t)|, \quad e > 0, \quad (12)$$

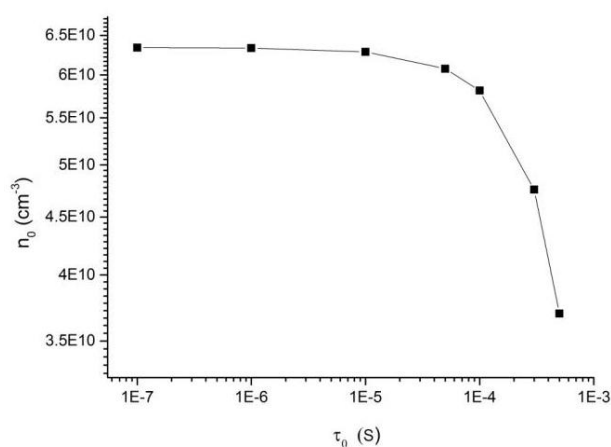
که  $\mu_e = \frac{e}{mv_m}$  حرکت‌پذیری الکترون می‌باشد،  $v_m$  هم بسامد برخورد برای انتقال تکانه بین الکترون و گاز زمینه می‌باشد. ضریب یونیزاسیون تاونسند  $\alpha$  نیز برای یک گاز بی‌اثر مانند آرگون با فرمول زیر داده می‌شود.

$$\alpha = CP \exp \left[ -D \left( P/E \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (13)$$

شکل ولتاژ خروجی منبع تغذیه تأثیر بسزایی در شکل‌دهی حالت تخلیه الکتریکی دارد. در این مقاله ما به بررسی شکل ولتاژ اعمالی به پلاسما پرداختیم. اگرچه روش‌های متفاوتی در تولید شکل ولتاژهای دلخواه وجود دارد، در برخی از روش‌ها ابتدا شکل موج‌های متناوب دلخواه با دامنه ولتاژی در حدود ۱۰ ولت توسط مولد ولتاژ متناوب<sup>۱</sup> تولید می‌شود و سپس توسط یک تقویت کننده، همان شکل موج تقویت و دامنه آن را به چند هزار ولت می‌رسانند [۲۰]. در روش دیگر با ترکیب چند هارمونیک شکل دلخواه موج خروجی را تعیین می‌کنند. در این کار ما با تغییر ویژگی اندوکتانس القاگر در بخش تقویت کننده مدار به شکل موج دلخواه رسیدیم و تأثیر آن را در ولتاژ شکست پلاسما و یکنواختی پلاسمای تولید شده مشاهده کردیم. نتایج نشان دادند که ولتاژ شکست پلاسمای تولید شده توسط منبعی که شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای دارد بسیار پایین‌تر از دو منبع دیگر است. نتایج شدت سنجی نیز نشان می‌دهد که شدت انتشاری از پلاسمای تولید شده توسط ولتاژ دندان‌اره‌ای در مقایسه با ولتاژهای سینوسی و پالسی غیر یکنواخت و همراه با تعداد زیادی استریمر می‌باشد. اگرچه ویژگی‌های پلاسمای ولتاژ دندان‌اره‌ای هنوز به طور کامل شناخته شده نیست ولی به دلیل تغییر مد با افزایش ولتاژ و تغییر بسامد برای مطالعه مدهای مختلف و موارد کاربردی دیگر بسیار جالب است. مهم‌ترین ویژگی ولتاژ دندان‌اره‌ای زمان برخاست کم و داشتن زمان فرو افت بسیار آرام می‌باشد. زمان برخاست کم ولتاژ منجر به افزایش میدان الکتریکی کاهش یافته (E/N) و افزایش چگالی الکترون‌ها می‌گردد و چون زمان تولید الکترون‌های پرانرژی کوتاه است به همین دلیل اتلاف انرژی الکترون‌ها در اثر پخش کمتر صورت می‌پذیرد و موجب برانگیختگی بیشتر اتم‌ها و مولکول‌ها می‌شود. از طرف دیگر زمان فرو افت آرام باعث شتاب الکترون‌ها و نگهداری تخلیه می‌گردد [۱۶] و [۲۱-۲۲]. همچنین در شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای با افزایش ولتاژ طول جت به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد ولی در دو شکل موج دیگر چنین افزایشی را مشاهده نکردیم. دلیل این امر را

جدول ۶. چگالی الکترون‌ها برحسب زمان برخاست ولتاژ در شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای.

$\mu s(\tau_e)$	$n_e \times 10^{10} (\text{particle/cm}^3)$
۰٫۱	۶٫۳۳۹۳۸
۱	۶٫۳۳۴۷۴
۱۰	۶٫۲۸۷۲۱
۵۰	۶٫۰۷۶۰۱
۱۰۰	۵٫۸۱۲۰۰
۳۰۰	۴٫۷۵۵۹۸
۵۰۰	۳٫۶۹۹۹۵



شکل ۱۰. نمودار چگالی الکترون بر حسب زمان برخاست موج شکل ولتاژ دندان‌اره‌ای.

طبق رابطه ۱۵ برای شش زمان برخاست مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که با کاهش هر چه بیشتر زمان برخاست، میزان تولید الکترون در پدیده بهمنی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در ولتاژ دندان‌اره‌ای چون زمان برخاست کمتر از سایر شکل ولتاژها می‌باشد لذا چگالی الکترونی بیشتری در لحظات اولیه تولید می‌شود. این موضوع کمک می‌کند تا با ولتاژ کمتری پلاسما تولید کرد و ولتاژ شکست متناظر با ولتاژ برانگیزش دندان‌اره‌ای کمتر از دو ولتاژ برانگیزش سینوسی و پالسی می‌باشد.

## بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که بیان شد ویژگی مولد مانند بسامد، دوره کار و

۱. Function Generator

نوری گونه‌های  $\text{NO}_x$ ، OH، OI، ArI و CuI در شعله پلاسما شناسایی شدند که نشان دهنده توانایی پلاسما در تبدیل گونه‌های مولکولی به اتمی، پردازش و پاک سازی سطوح مختلف می‌باشد [۱۹] و [۲۵-۲۷]. نتایج این کار می‌تواند در ساخت جت پلاسماهای بهینه برای کاربردهای بیولوژی، پزشکی و صنعتی مورد توجه قرار گیرد.

می‌توان به تجمع بار سطحی بر روی دی‌الکتریک شیشه‌ای نسبت داد که در ولتاژ دندانه‌اره‌ای، این تجمع بیشتر است به طوری که این موضوع با تولید زیاد الکترون در لحظات اولیه با این شکل ولتاژ سازگار است. تجمع بار سطحی منجر به تولید میدان الکتریکی خارجی می‌شود که در نهایت باعث شتاب جت خروجی می‌گردد [۲۳-۲۴]. با استفاده از نتایج بیناب سنجی

## مراجع

1. J R Roth, *Institute of physics publishing, Bristol and Philadelphia*, (2000).
2. F Sohbatazadeh, A Hossienzadeh Colagar, S Mirzanejad, S Motallebi, M Farhadi, and M Bagheri, *et al.*, Design and construction of triplet atmospheric cold plasma jet for sterilization. *IJPR*, **13** (2014) 363.
3. X Lu, T Ye, Y Cao, Z Sun, Q Xiong, Z Tang, Zh Xiong and Y Pan, "The roles of the various plasma agents in the inactivation of bacteria", (2008).
4. G Fridman, G Friedman, A Gustol, A B Shekhte, V N Vasilets, and A Fridman *Plasma Process. Polym.* **5** (2008) 503.
5. S Mirpour, H Ghomi, S Piroozmand, M Nikkhah, S H Tavassoli, & S Z Azad, "The Selective Characterization of Non thermal Atmospheric Pressure Plasma Jet on Treatment of Human Breast Cancer and Normal Cells", (2014).
6. A Calvimontes, R Saha, V Dutschk, *AUTEX Research J.* **11** (2011) 24.
7. C X Wang, Y P Qiu, *Surf. & Coat. Tech.* **201** (2007) 6273..
8. C X Wang, H L Xu, Y Liu, Y P Qiu, *Surf. & Coat. Tech.* **202** (2008) 2775.
9. Ch Wang, *Fibers and Polymers.* **11** (2010) 223.
10. D Sun, G K Stylios. *J Materials Proc. Tech.* **173** (2006) 172.
11. M A Lieberman and A J Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", John Wiley and Sons, Inc, New York (1994).
12. M Chichina, Z Hubicka, O Churpita, and M Tichy, *Plasma Process Polym.* **2** (2005) 501.
13. Z Cao, J L Walsh, and M G Kong. *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 21501.
14. X Zhang, M Li, R Zhou, K Feng and S Yang. *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008) 21502.
15. H S Park, S J Kim, H M Joh, T H Chung, S H Bac, and S H Leem, *Busan*, (2010) 604.
16. J Walsh, J J Shi and M G Kong, *Applied Physics Letters.* **88** (2006) 171501.
17. <http://en.Wikipedia.org/Wiki/flybacktransformer>.
18. Y P Raizer, and J E Allen, "Gas discharge physics (Vol. 1)", Berlin: Springer-Verlag (1991).
19. F Sohbatazadeh, A Hossienzadeh Colagar, S Mirzanejad, M Farhadi, M Bagheri, et al., "Design and Construction of triplet atmospheric cold plasma jet for sterilization", *IJPR*, **13** (2014) 363.
20. Trek [www.treking.com/products/H-V-Amp.asp](http://www.treking.com/products/H-V-Amp.asp).
21. W C Zhu, Q Li, X M Zhu, and Y. K Pu, Characteristics of atmospheric pressure plasma jets emerging into ambient air and helium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42** (20), (2009) 202002.
22. N Mericam-Bourdet, M Laroussi, A Begum, and E Karakas, Experimental investigations of plasma bullets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **42**(5), (2009) 055207.
23. S Norberg, "Modeling Atmospheric Pressure Plasma Jets: Plasma Dynamics, Interaction With Dielectric Surfaces, Liquid Layers and Cells", (Doctoral dissertation, University of Michigan) (2015).
24. S A Norberg, E Johnsen, and M J Kushner, Formation of reactive oxygen and nitrogen species by repetitive negatively pulsed helium atmospheric pressure plasma jets propagating into humid air, "Plasma Sources Science and Technology", **24** (3), (2015) 035026.
25. A H Colagar, H Memariani, F Sohbatazadeh, and A V Omran, "Non thermal Atmospheric Argon Plasma Jet Effects on Escherichia coli Biomacromolecules", *Applied biochemistry and biotechnology*, **171** (2013) 1617.
26. F Sohbatazadeh, S Mirzanejad, M Ghasemi, and M Talebzadeh, "Characterization of a non-thermal plasma torch in streamer mode and its effect on polyvinyl chloride and silicone rubber surfaces", *Journal of Electrostatics.* **71**(5) (2013) 875.
27. F Sohbatazadeh, A Hosseinzadeh, S Mirzanejad and S Mahmodi, E coil, P aeruginosa, and B cereus, Bacteria Sterilization Using Afterglow of Non-Thermal Plasma at Atmospheric Pressure *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **160** (2010) 1978.