



## مشخصه یابی الکتریکی و ترمودینامیکی مشعل پلاسما غیر انتقالی و جریان مستقیم با گاز کاری هوا

پرهام فیروزی کوهی<sup>۱</sup>، محمد رضا خانی<sup>\*</sup>، بابک شکری<sup>۱</sup>

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹  
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷  
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲

### کلمات کلیدی:

مشعل پلاسما حرارتی  
پلاسما هو  
جریان الکتریکی مستقیم  
قوس الکتریکی غیر انتقالی  
مشخصه یابی الکتریکی  
ترمودینامیکی

**خلاصه:** امروزه استفاده صنعتی و تحقیقاتی از تکنولوژی پلاسما حرارتی در فرایند پردازش مواد و امحا زباله‌های خطرناک بسیار کاربردی هستند. این تحقیق، طراحی و ساخت مشعل برای گازی‌سازی مواد کربن پایه مایع است، به نحوی خاص که این مواد باید با زاویه‌ای مشخص به داخل شعله مشعل پلاسما اسپری شود. در این تحقیق فقط به بررسی مشخصات ترمودینامیکی و الکتریکی مشعل پلاسما پرداخته‌ایم که یکی از قسمت‌های دستگاه امحا پسماندهای مایع است. مشعل پلاسما در دو حالت مورد آزمایش قرار گرفته است و در نهایت مشخصه‌های الکتریکی و ترمودینامیکی مشعل پلاسما اندازه‌گیری و تحت مقایسه قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، مشعل پلاسما ساخته شده دارای ولتاژ الکتریکی بیشینه ۲۱۰ ولت و همچنین راندمان حرارتی ۸۶/۲ درصد است. مقدار بیشینه آنتالپی پلاسما ۲۱/۵ مگاژول بر کیلوگرم و همچنین بیشینه دمای بالک جت پلاسما در خروجی نازل ۳۴۰۰ کلوین است. با توجه به نتایج بدست آمده مشعل پلاسما طراحی شده در دما بالای ۳۰۰۰ درجه سلسیوس در فاصله ۲۰ میلی متری از خروجی نازل دارای آنتالپی ۲۱/۵ مگاژول بر کیلوگرم و راندمان حرارتی مناسب ۸۳ الی ۸۶ درصد بوده است، که می‌تواند ترکیبات عالی و کربن پایه را به صورت کامل تحت فرایند گازی‌سازی قرار دهند.

### ۱- مقدمه

هستند و برای کاربردهای پوشش دهی و برش مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. گروه دوم دارای سرعت جت پلاسما خروجی پایین‌تری هستند و برای کاربردهای متالوژی و امحا زباله مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱ و ۱۲]. در کاربرد امحا زباله بسته به جامد یا مایع بودن زباله یا نحوه اضافه کردن زباله، عرض جت پلاسما تشکیل شده باید به نحوی باشد که جت پلاسما آن پهن، سرعت جت پلاسما خروجی پایین و با دمایی بالا در خروجی نازل تشکیل گردد. در فرایند گازی‌سازی، نرخ تجزیه و کیفیت محصول خروجی، تحت تأثیر دما و گونه‌های شیمیایی پلاسما تشکیل شده قرار می‌گیرد. در زمینه ساخت مشعل‌های پلاسما برای امحا انواع پسماندهای صنعتی، تحقیقات متنوعی صورت گرفته است. از جمله این کاربردها می‌توان به امحا پسماندهای جامد و مایع شهری، بیمارستانی، صنعتی و پرتوزا به صورت مستقیم تحت فرایند گازی‌سازی و یا کم‌خطر سازی خاکستر باقی‌مانده از آنها اشاره نمود. ژوکوف<sup>۱</sup> و زاسپیکین [۱۳] ساختار مشعل‌های پلاسما با توان بالا و مشخصه‌های این مشعل‌ها تحت عنوان پلاسما ترون که برای کاربردهای

امروزه استفاده صنعتی و تحقیقاتی از تکنولوژی پلاسما حرارتی در فرایند پردازش مواد بسیار کاربردی هستند [۱] و گستره وسیعی از کاربردها از قبیل پوشش دهی سطحی فلزات و غیر فلزات [۲]، سنتز کردن مواد و تولید نانو ذرات [۳ و ۴]، تولید پودر با کیفیت بالا از مواد دیرگداز [۵]، برشکاری و جوشکاری [۶] و همچنین امحا زباله‌های خطرناک [۷] مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از سیستم‌هایی که می‌توانند جت پلاسما حرارتی را تولید کنند مشعل‌های پلاسما حرارتی هستند. این مشعل‌ها با جریان الکتریکی مستقیم، جریان الکتریکی متناوب، منابع رادیو فرکانس و دیگر روش‌های تخلیه الکتریکی روشن می‌شوند [۸ و ۹]. مشعل‌های پلاسما حرارتی جریان مستقیم یکی از پرکاربردترین نوع روش تشکیل پلاسما حرارتی است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشعل‌های پلاسما حرارتی جریان مستقیم بسته به سرعت جت خروجی و نرخ توان پلاسما تشکیل شده به دو دسته تقسیم می‌گردند. گروه اول دارای سرعت جت پلاسما خروجی بالاتری

1 Zhukov

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m\_khani@sbu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



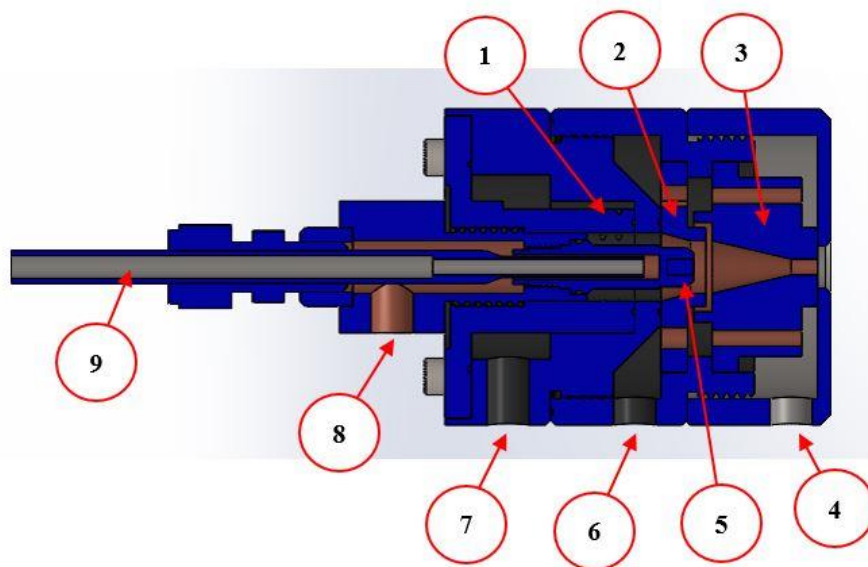
بالا پلاسما، ۴- راندمان حرارتی مشعل و ۵- گونه‌های فعال اتمی موجود در شعله پلاسما. به دلیل این که به صورت پیش فرض باید مواد کربنی در فاصله ۲۰ میلی‌متری از خروجی نازل مشعل تزریق شوند، ما این فاصله را به عنوان فاصله مؤثر خود در نظر گرفته‌ایم. در نتیجه مقدار دما بالک پلاسما و پهنای شعله در این فاصله تحت اندازه‌گیری قرار گرفت. ما در این تحقیق فقط به بررسی مشخصات ترمودینامیکی و الکتریکی مشعل پلاسما پرداخته‌ایم که یکی از قسمت‌های دستگاه امحا پسماندهای مایع است. اجزا و قطعات تشکیل دهنده مشعل پلاسما که مورد مطالعه و طراحی قرار گرفته است، شامل نازل‌ها، الکترودها، عایق‌های الکتریکی و کانال‌های خنک‌سازی می‌باشند که از نظر جزئیات با دیگر پژوهش‌های نام برده شده متفاوت است. در قسمت چیدمان آزمایش، تجهیزات لازم جهت راه‌اندازی و مشخصه‌یابی مشعل مورد بررسی قرار گرفت. مشعل پلاسما ساخته و تحت مطالعه قرار گرفته به صورت جریان مستقیم و غیر انتقالی است. گاز کاری مشعل در این تحقیق هوا و نوع خنک‌کاری مشعل به صورت آب خنک در نظر گرفته شده است. مشعل پلاسما تحت دو گروه آزمایشی قرار گرفت. ابتدا مشعل پلاسما در حالت فشار گاز کاری ثابت به تغییرات جریان الکتریکی قرار گرفت و سپس در حالت جریان الکتریکی ثابت به تغییرات فشار گاز کاری قرار گرفت و مورد بررسی و مطالعه قرار داده شد. مشخصه‌های الکتریکی مانند ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی، فرکانس غالب قوس الکتریکی و مد رفتاری قوس الکتریکی تحت بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفت. در بخش نهایی مشخصه‌های راندمان حرارتی، آنتالپی پلاسما خروجی از مشعل و میانگین دما بالک پلاسما خروجی را تحت محاسبه قرار گرفت. در این مقاله به جزئیات طراحی و ساخت قطعات مشعل پلاسما مورد بررسی قرار نگرفته است. در نتیجه مشعل پلاسما را با متون قبلی از نظر فنی می‌توان فقط در مشخصه‌های نام برده مورد بررسی قرار داد. مشخصه‌ها شامل روش تخلیه الکتریکی در مشعل پلاسما، ولتاژ الکتریکی مشعل، مشخصه فرکانسی ولتاژ، مد رفتاری ولتاژ قوس الکتریکی، راندمان حرارتی، آنتالپی پلاسما و دمای بالک پلاسما است. از دیگر نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به جامعیت در بررسی پارامترهای الکتریکی و ترمودینامیکی مشعل پلاسما ساخته شده اشاره کرد. همچنین دو متغیر مهم در مشعل‌های پلاسما کلاس جریان مستقیم، یعنی فشار گاز کاری و جریان الکتریکی در نظر گرفته شد و اثر این دو متغیر به صورت مقایسه‌ای بر مشخصه‌های الکتریکی و ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع با توجه به مقدمه‌ای که در بالا بیان شد می‌توان گفت مزیت و نوآوری‌های مقاله نوشته شده به شرح زیر است.

متالوژی در کوره‌های سیمانی و امحا پسماند مورد استفاده قرار می‌گرفت را مورد تحقیق و بررسی قرار داده‌اند. نیکیتا اوبرازتسوف<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴] طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی مشعل‌های پلاسما حرارتی با جریان متناوب را مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند که برای پردازش مواد آلی مورد استفاده قرار می‌گرفت. کیم<sup>۲</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی سیستم امحا پسماندهایی با زنجیره‌های بالای کلر<sup>۳</sup> به روش مشعل پلاسما حرارتی پرداخته‌اند و همچنین اثر پلاسما تشکیل شده با گاز کاری هوا و بخار آب را مورد مقایسه قرار داده‌اند. نیشیکاوا<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] طراحی و ساخت مشعل پلاسما جریان مستقیم با گاز کاری بخار و هوا را مورد تحقیق و بررسی قرار داده‌اند و همچنین اثر تغییر گاز کاری مشعل پلاسما در نرخ تجزیه زنجیره‌های کربنی در فرایند گازی‌سازی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. گوها<sup>۵</sup> و همکاران [۱۷] به طراحی و مشخصه‌یابی مشعل پلاسما جریان مستقیم با گاز کاری بخار آب در فشار اتمسفری برای کاربردهای پردازش مواد و گازی‌سازی مواد کربنی پرداخته‌اند. آنشاکوف<sup>۶</sup> و همکاران [۱۸] به طراحی و مشخصه‌یابی مشعل پلاسما با الکتروود آند (نازل) چند پله پرداخته‌اند و هدف آنها طراحی سیستمی جهت شکستن ساختار پسماندهای خطرناک صنعتی بوده است. چاؤ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۹] به مطالعه عددی و مشخصه‌یابی تجربی مشعل پلاسما جریان مستقیم با گاز کاری بخار آب پرداخته‌اند، که ساختار الکترودهای مشعل پلاسما آنها از نوع لوله‌ای می‌باشد. شوکوان<sup>۸</sup> و همکاران [۲۰] طراحی و ساخت مشعل پلاسما با جریان جت پلاسما آرام در ناحیه خروجی از نازل مشعل را مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

در این تحقیق برای کاربرد امحا پسماندهای کربن پایه، طراحی و ساخت مشعل پلاسما حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. از نوآوری‌های این تحقیق، طراحی مشعل برای گازی‌سازی مواد کربن پایه مایع است، به نحوی خاص که این مواد باید با زاویه‌ای مشخص به داخل شعله مشعل پلاسما اسپری شود. از این جهت چند پارامتر در مشخصه‌یابی مشعل پلاسما برای این کاربرد مهم می‌شود که عبارت هستند از، ۱- پهنای شعله مناسب در فاصله ۲۰ میلی‌متری در خروجی نازل مشعل، ۲- دمای بالای ۳۰۰۰ کلوین بالک پلاسما در فاصله ۲۰ میلی‌متری در خروجی نازل مشعل، ۳- آنتالپی

- 1 Nikita Obratsov
- 2 Kim
- 3 Polychlorinated Biphenyls (PCBs)
- 4 Nishikawa
- 5 Guohua
- 6 Anshakov
- 7 Chau
- 8 Xiuquan

1	Swirl ring nozzle
2	Ignition nozzle
3	Nozzle (anode electrode)
4	Inlet water cooling for nozzle
5	Cathode electrode
6	Outlet water cooling for nozzle
7	Inlet working gas
8	Outlet water cooling for cathode
9	Inlet water cooling for cathode



شکل ۱. ساختار و اجزا مشعل پلازما طراحی شده نشان داده شده است، که شامل: ۱-نازل جریان گاز گردابی، ۲-نازل احتراق اولیه، ۳-نازل (الکتروود اند)، ۴- ورودی جریان خنک کننده نازل، ۵- الکتروود کاتد، ۶- خروجی جریان خنک کننده نازل، ۷- ورودی گاز کاری مشعل، ۸- خروجی جریان خنک کننده کاتد، ۹- ورودی جریان خنک کننده کاتد.

**Fig. 1. Structure and components of the designed plasma torch are shown, that including: 1-swial ring nozzle, 2-ignition nozzle, 3-Nozzle (anode electrode), 4-Inlet water cooling for nozzle, 5-Cathode electrode, 6-Outlet water cooling for nozzle, 7-Inlet working gas, 8-Outlet water cooling for cathode, 9-Inlet water cooling for cathode.**

## ۲- الگوسازی نظری و تجربی

### ۲-۱- اجزا و نحوه عملکرد مشعل پلازما

مشعل پلازما مورد آزمایش و بررسی با جریان الکتریکی مستقیم روشن می‌گردد، نوع انتقال قوس الکتریکی به صورت غیر انتقالی و گاز کاری مشعل، هوا در نظر گرفته شده است. در نتیجه پلازما تشکیل شده پلازما هوا است، اتمسفر تخلیه جت پلازما نیز در هوا و در فشار اتمسفر است. شیمی پلازما تشکیل شده به دلیل استفاده از هوا به عنوان گاز کاری و همچنین اتمسفر محیط از گونه‌های اتمی اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن در حالت پایدار و برانگیخته تشکیل شده است. همچنین گونه‌های مولکولی بخار آب و هیدروکسید در حالت ناپایدار به صورت چرخشی و دورانی نیز تشکیل شده‌اند. الکتروود کاتد و نازل جت پلازما خروجی از نوع آب خنک در نظر گرفته شده است.

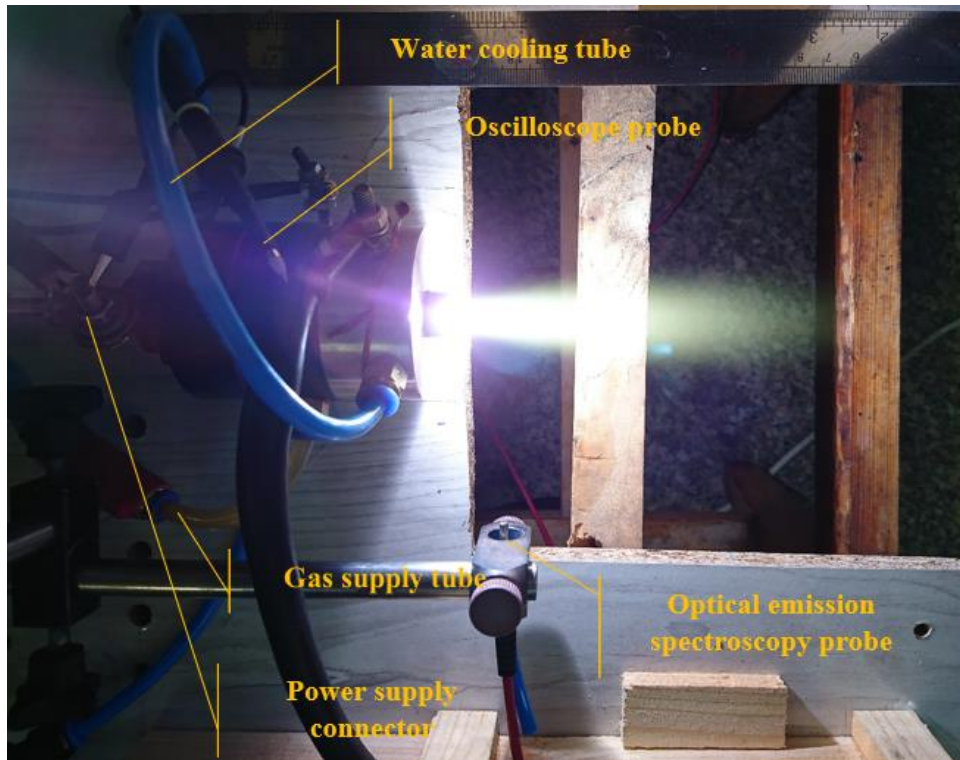
ساختار کلی و اجزا مشعل پلازما طراحی شده را در شکل ۱ نمایش داده شده است. ۱-نازل جریان گاز گردابی، ۲-نازل احتراق اولیه، ۳-نازل

✓ مشعل پلازما طراحی و ساخته شده برای کارکرد در کوره امحا پسماند مایع در نظر گرفته شده است که ویژگی‌های لازم برای آن پیشتر اشاره شده است.

✓ مشعل پلازما طراحی و ساخته شده دارای مشخصه‌های طراحی مانند ساختار الکتروودها، نازل‌ها، کلاس الکتریکی، مکانیزم راه‌اندازی، مکانیزم پایدارسازی قوس الکتریکی و دیگر جزئیات می‌باشد که مشابه آن در مقالات یاد شده مشاهده نمی‌شود.

✓ مشخصه‌های ترمودینامیکی و الکتریکی در مقاله ما به صورت کاملاً جامع و یکپارچه است و تقریباً شامل تمام مشخصه‌یابی‌های لازم جهت بررسی یک مشعل پلازما حرارتی می‌شود.

✓ دو پارامتر اصلی جریان الکتریکی و فشار گاز کاری که بر مشخصه‌های الکتریکی و ترمودینامیکی مشعل پلازما تأثیر دارند در مقاله ما به صورت کامل بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته است و از این مقایسه بهترین عملکرد مشعل در شرایط کاری مختلف گزارش شده است.



شکل ۲. نمایی از بالا مشعل پلاسما که در حالت روشن نمایش داده شده است.

Fig. 2. Top view of the plasma torch that displayed in working mode.

شده است. برای خنک کردن الکترودها از یک پمپ آب با فشار ۶ بار، که به یک مخزن آب در دمای ۲۵ درجه متصل شده است. هوا برای راه اندازی مشعل پلاسما به عنوان منبع گاز در نظر گرفته شده است، که در یک مخزن تحت فشار ۴۰ بار ذخیره گردیده است. مقدار گاز ورودی به مشعل پلاسما را توسط یک فشار سنج قبل از ورود به مشعل پلاسما اندازه گیری شده است و دمای آب خنک کننده مشعل پلاسما در ورودی و خروجی مشعل توسط دو دما سنج اندازه گیری شده است. برای مطالعه ولتاژ و جریان عبوری از مشعل پلاسما یک اسپکروسکوپ<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت که برای انتقال اطلاعات به یک کامپیوتر متصل شده است. برای تخمین گونه های شیمیایی موجود در پلاسما و دمای میانگین پلاسما دستگاه اسپکتروسکوپی<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش اسپکتروسکوپی نور تابش شده از بالک پلاسما برای تخمین گونه های شیمیایی و دمای میانگین پلاسما استفاده گردیده است، مکان پروب طیف سنجی در فاصله ۲۰ میلی متر از خروجی نازل قرار داده شده است. شکل ۲، نمایی از مشعل پلاسما هوا در توان ۲۵ کیلووات را به نمایش گذاشته است که تحت تست و نمونه گیری قرار گرفته است.

(الکتروند)، ۴- ورودی جریان خنک کننده نازل، ۵- الکتروند کاتد، ۶- خروجی جریان خنک کننده نازل، ۷- ورودی گاز کاری مشعل، ۸- خروجی جریان خنک کننده کاتد، ۹- ورودی جریان خنک کننده کاتد است. عمل کرد مشعل پلاسما به شرح زیر است. جریان گاز پس از ورود به مشعل توسط نازل جریان گردابی درون ناحیه تشکیل پلاسما تزریق شده است، با اعمال ولتاژ بالا بین ۷ تا ۱۰ کیلوولت با فرکانس ۲ تا ۵ مگاهرتز، احتراق اولیه ایجاد می گردد، چگالی بار الکترونی در این ناحیه بالا می رود، رسانندگی الکتریکی محیط افزایش می یابد و در نتیجه قوس الکتریکی بین الکتروند کاتد و آند برقرار می گردد و جت پلاسما در خروجی مشعل پلاسما تشکیل می شود.

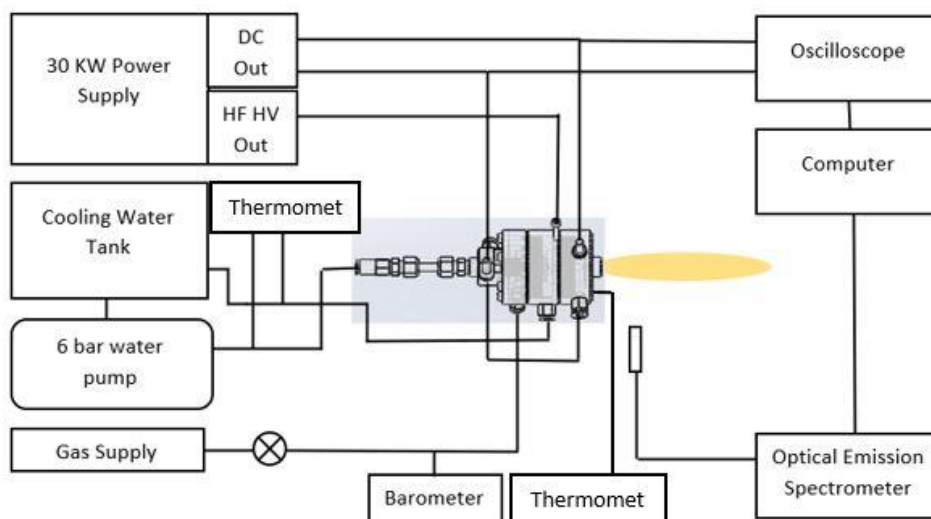
## ۲-۲- چیدمان اجزا آزمایش

در شکل ۳، چیدمان اجزا آزمایش تشریح شده است. برای روشن کردن مشعل پلاسما از یک منبع تغذیه ۳۰ کیلووات ترانسی جریان مستقیم استفاده شده است. منبع تغذیه قابلیت کنترل جریان بین ۲۰ تا ۱۵۰ آمپر را داشته و کنترل جریان به صورت تریستور سویچینگ در نظر گرفته شده است. برای شروع قوس الکتریکی یک ولتاژ ۱۰ کیلوولت با فرکانس ۲ مگا هرتز استفاده

1 Tektronix TDS2000

2 Avaspec-3648





شکل ۳. نموداری از چیدمان و تنظیمات آزمایش، تشریح شده است.

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup is described.

ایستاد<sup>۱</sup> که در آن نسبت بزرگی افت و خیز ولتاژ به میانگین ولتاژ زیر ۲۰ درصد است، رفتار بازگشتی<sup>۲</sup> که در آن نسبت بزرگی افت و خیز ولتاژ به میانگین ولتاژ بین ۲۰ الی ۵۰ درصد است، رفتار ضربه‌ای<sup>۳</sup> که در آن نسبت بزرگی افت و خیز ولتاژ به میانگین ولتاژ بالاتر از ۵۰ درصد است تعریف می‌گردند و همچنین نوع گاز پلاسما در رفتار افت و خیز ولتاژ بسیار مؤثر است. مد رفتار قوس الکتریکی را به صورت فرمول زیر تعریف شده است.

$$AVM = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{avr}} \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)،  $V_{max}$  ولتاژ بیشینه مشعل،  $V_{min}$  ولتاژ کمینه مشعل و  $V_{avr}$  ولتاژ میانگین مشعل است.

برای بدست آوردن فرکانس قالب حرکت قوس الکتریکی بر روی نازل، باید بر نمودار ولتاژ \_ زمان اندازه‌گیری شده توسط اسیلوسکوپ، تابع تبدیل فوریه<sup>۴</sup> را اعمال گردد و فرکانس قالب حرکت قوس الکتریکی را تخمین زده

## ۲-۳- روابط نظری و روش آزمایش

روش آزمایش به شرح زیر تعریف شده است، ابتدا مشعل پلاسما را روشن و مشخصه‌های مشعل پلاسما برای دو گروه مختلف بررسی گردیده است. در گروه اول فشار گاز کاری (هوا) را در مقدار ۲ بار ثابت نگه داشته شده است و جریان الکتریکی از ۵۰ آمپر تا ۱۰۰ آمپر مورد افزایش قرار گرفته شده است و در هر مرحله مقدار پارامترهای مشعل پلاسما را اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. در گروه دوم جریان الکتریکی در ۱۰۰ آمپر ثابت نگه داشته شد و فشار گاز کاری (هوا) مشعل از ۲ بار تا ۳ بار مورد افزایش قرار گرفته شده است و در هر مرحله پارامترهای مشعل پلاسما ثبت گردیده است. پارامترهای مشعل پلاسما، ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی، دمای آب خنک کننده ورودی، دمای آب خنک کننده خروجی، دمای بدنه مشعل و طیف سنجی نور گسیلی از جت پلاسما خروجی در نظر گرفته شده است. با استفاده از ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط اسیلوسکوپ، مقدار میانگین ولتاژ، بیشینه و کمینه ولتاژ را ثبت و همچنین فرکانس قالب حرکت قوس الکتریکی و مد رفتاری قوس مورد بررسی و مشخصه‌یابی قرار گرفته است. ویژگی‌های مهم الکتریکی مشعل‌های پلاسما، افت و خیز ولتاژ و فرکانس قالب ولتاژ مشعل در شرایط مختلف تعریف شده است. مقدار افت و خیز ولتاژ نشان دهنده پایداری قوس الکتریکی در نقطه الصاق قوس الکتریکی به اند است. قوس‌های الکتریکی متحرک دارای سه نوع رفتاری هستند، که شامل رفتار

- 1 Steady mode
- 2 Takeover mode
- 3 Restrike mode
- 4 Fast Fourier Transform (FFT)

$$Q_{cooling} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cw} \quad (۶)$$

انرژی اتلافی به صورت تابشی  $Q_{rad}$  از سطح نازل، انرژی اتلافی به صورت همرفت  $Q_{conv}$  از سطح تماس بین نازل و هوا و انرژی اتلافی در خنک سازی الکترودها  $Q_{cw}$  تعریف شده است. در نتیجه می توان راندمان حرارتی را برای مشعل پلاسما جریان مستقیم به شرح زیر تعریف گردد.

$$\eta = \frac{I.V - (A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) + Ah(T_s - T_\infty) + 4.18c_{cw} \cdot q_{cw}(T_2 - T_1))}{I.V} \quad (۷)$$

که  $\eta$  راندمان حرارتی،  $I$  میانگین جریان الکتریکی مشعل،  $V$  میانگین ولتاژ الکتریکی مشعل،  $A$  سطح بیرونی مشعل که در تماس با هوا محیط قرار دارند،  $\varepsilon$  ضریب تابش سطح مشعل،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $h$  ضریب انتقال حرارت همرفتی بین سطح بیرونی مشعل و هوا محیط،  $c_{cw}$  گرمای ویژه آب،  $q_{cw}$  شار انرژی انتقال یافته از سطح آند و کاتد به آب در واحد حجم،  $T_s$  دمای سطح بیرونی مشعل،  $T_\infty$  دمای هوای محیط،  $(T_2 - T_1)$  اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به مشعل تعریف شده است. یکی از مشخصه های مهم دیگر در مشعل ها، آنتالپی یا به عبارتی دیگر مقدار انرژی انتقال داده شده به پلاسما است. مقدار آنتالپی ویژه پلاسما خروجی در مشعل به صورت زیر تعریف شده است.

$$h_p = \frac{I.V - (Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cw})}{Q_{wp}} + h_0 \quad (۸)$$

در معادله بالا  $h_p$  آنتالپی ویژه پلاسما در خروجی مشعل است.  $I.V$  کل توان الکتریکی ورودی به مشعل،  $Q_{rad}$  کل توان تابشی اتلافی،  $Q_{conv}$  کل توان همرفتی اتلافی بین مشعل و اتمسفر محیط،  $Q_{cw}$  کل توان اتلافی به واسطه خنک کننده،  $Q_{wp}$  دبی جرمی گاز کاری مشعل (هوا) و  $h_0$  آنتالپی ویژه گاز کاری مشعل (هوا) قبل از ورود به مشعل در نظر گرفته شده است. مقدار  $h_p$  برای گاز هوا در دمای اتاق آزمایش ۳۱۴/۷ کیلوژول بر کیلوگرم بوده است. در معادله بالا از انرژی جنبشی در خروجی مشعل به دلیل پایین بودن سرعت پلاسما خروجی صرفه نظر شده است.

شود. نمودار فرکانسی حرکت قوس الکتریکی به صورت فرمول زیر تعریف شده است.

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} (e^{-i\frac{2\pi}{N}})^{kn} a_n \quad (۲)$$

$$I = \frac{2}{N} \sqrt{(|ReA_k|)^2 + (|ImA_k|)^2} : k = 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (۳)$$

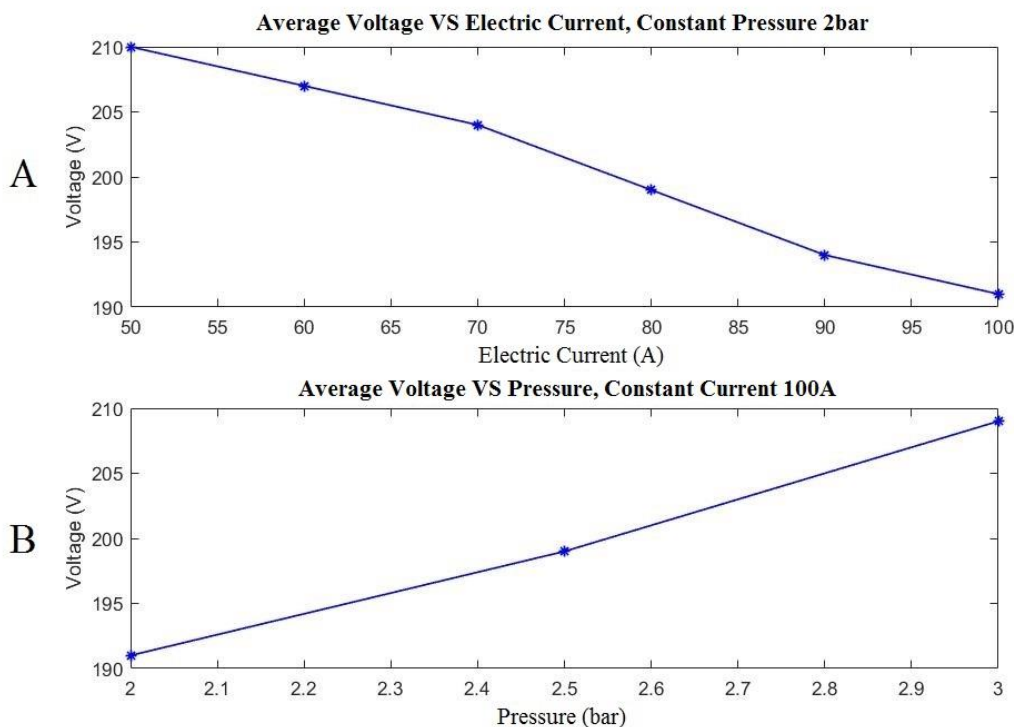
$$f = \frac{F}{N} \times m : m = 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (۴)$$

در معادله بالا  $N$  تعداد نمونه های برداشته شده است،  $I$  بردار شدت فرکانس های موجود در نمونه ولتاژ برداشته شده است و  $f$  بردار فرکانس های موجود در نمونه ولتاژ برداشته شده است. مقدار ولتاژ هر نمونه برداری است و  $A_k$  تبدیل فوریه انجام شده می باشد. در تابع FFT دو نکته مورد توجه قرار گرفته شده است. اول، مقدار  $A_k$  ها به صورت مختلط تعریف شده است و مقدار مطلق آن را در نظر گرفته شده است. دوم، به مقدار  $\frac{N}{2}$  از ضرایب دارای مقدار یکسان هستند، در نتیجه تعداد طول نمونه گیری از نمونه اول تا نمونه  $\frac{N}{2}$  در نظر گرفته شده است. برای تعریف بردار فرکانس مقدار  $\frac{F}{N}$  را در مجموعه اعداد صحیح از ۰ تا  $\frac{N}{2}$  ضرب گردید، که  $F$  فرکانس نمونه برداری و  $N$  تعداد نمونه ها تعریف شده است.

راندمان حرارتی به عنوان یکی از پارامترهای مهم مشعل ها به شرح زیر تعریف شده است.

$$\eta = \frac{E_{input} - Q_{cooling}}{E_{input}} \quad (۵)$$

انرژی ورودی در مشعل های جریان مستقیم  $E_{input}$  از ضرب میانگین جریان در میانگین ولتاژ بدست آورده شده است و انرژی اتلاف شده به صورت زیر تعریف می گردد.



شکل ۴. نمودار الف، تغییرات ولتاژ به جریان الکتریکی را نشان داده است و نمودار ب، تغییرات ولتاژ به فشار هوا ورودی را نشان داده است.

**Fig. 4.** Diagram A, shows the voltage variation to the electric current and Diagram B, shows the voltage changes to the working gas pressure.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه ولتاژ الکتریکی

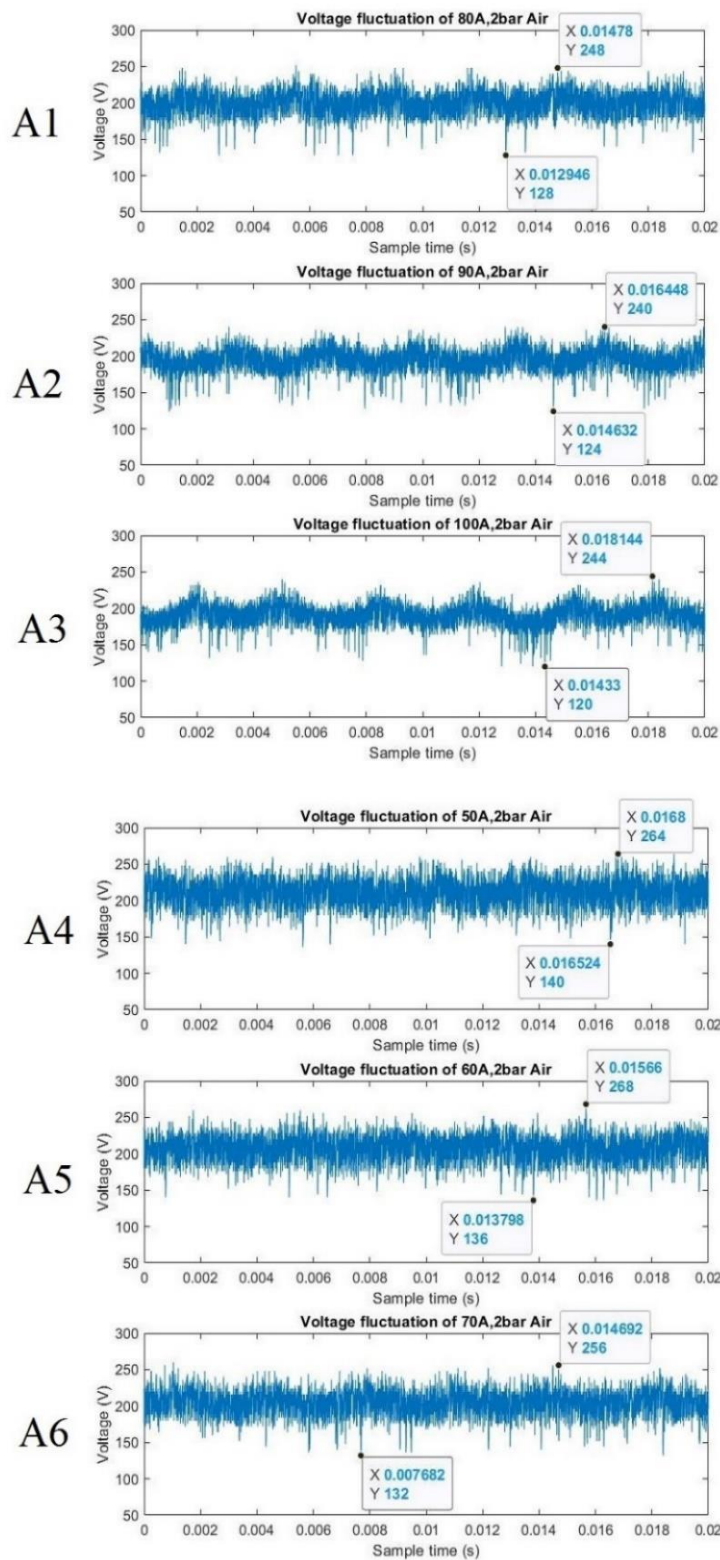
در شکل ۴ نمودار تغییرات ولتاژ به جریان الکتریکی و تغییرات ولتاژ به فشار هوا ورودی نشان داده شده است. در حالت اول شکل ۴\_الف به شرح زیر است، که فشار هوا ورودی ثابت و برابر با ۲ بار در نظر گرفته شده است و مقدار جریان مشعل پلاسما مورد افزایش قرار گرفت، در نتیجه چگالی بار در ستون قوس الکتریکی افزایش پیدا کرده و دما افزایش یافته است، رسانندگی الکتریکی افزایش یافته و قوس الکتریکی ضخیم‌تر شده است و در نتیجه مقدار افت پتانسیل مشعل کاهش پیدا کرده است. در حالت دوم شکل ۴\_ب مقدار جریان الکتریکی مشعل پلاسما را ثابت و برابر با ۱۰۰ آمپر قرار داده شده است و فشار هوا ورودی به مشعل پلاسما از ۲ تا ۳ بار مورد افزایش قرار گرفته شده است. در نتیجه مقدار سرعت سیال پلاسما درون مشعل افزایشی شده است، نیروی درگ وارده بر قوس الکتریکی در محل الصاق قوس الکتریکی بر روی نازل افزایش و همچنین طول قوس الکتریکی افزایش یافته است. در نتیجه افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی در نمودارهای شکل ۴ مشاهده شده است.

#### ۳-۲- مشخصه فرکانسی ولتاژ و مد رفتاری ولتاژ قوس الکتریکی

در شکل ۵ نمودار افت و خیز ولتاژ مشعل پلاسما در جریان‌های مختلف از ۵۰ تا ۱۰۰ آمپر را از الف ۱ تا الف ۶ که با رنگ آبی نشان داده شده است، که فشار گاز هوا ورودی برابر با ۲ بار است و همچنین مدت زمان نمونه برداری از ولتاژ مشعل پلاسما ۲۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. در نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش جریان قوس الکتریکی، ولتاژ میانگین قوس الکتریکی کاهش یافته است اما مقدار افت و خیز ولتاژ یا به عبارتی مقدار بیشینه و کمینه ولتاژ تقریباً ثابت بوده است. در تمامی جریان‌های الکتریکی نوع رفتار قوس از نوع ضربه‌ای<sup>۱</sup> است و با افزایش جریان الکتریکی درصد آن بیشتر شده است.

در شکل ۶ نمودارهای فرکانس قالب ولتاژ مشعل را از ب ۱ تا ب ۶ که با رنگ قرمز نشان داده شده است. این نمودار را از تبدیل فوریه نمودار ولتاژ-زمان، مشعل در بازه زمانی ۲۰ میلی ثانیه گرفته شده است. کاملاً مشهود است که با افزایش جریان الکتریکی، فرکانس‌های مختلف موجود کم شده‌اند و یک فرکانس قالب بیشینه شده است. فرکانس ۳۰۰ هرتز موجود در

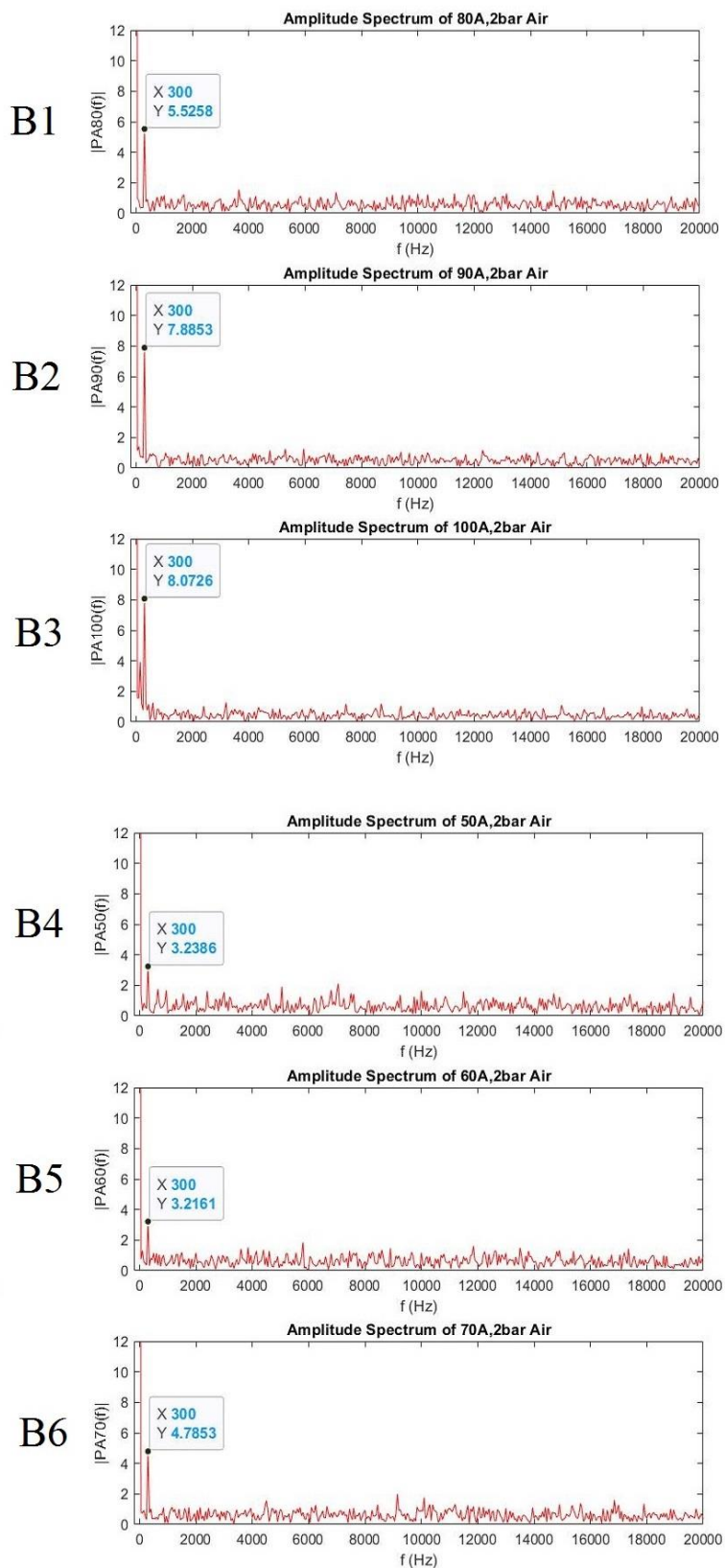
1 Restrike



شکل ۵. نمودار الف ۱ تا الف ۶، افت و خیز ولتاژ مشعل پلازما در جریان‌های الکتریکی مختلف در فشار گاز کاری ۲ بار نشان داده شده است.

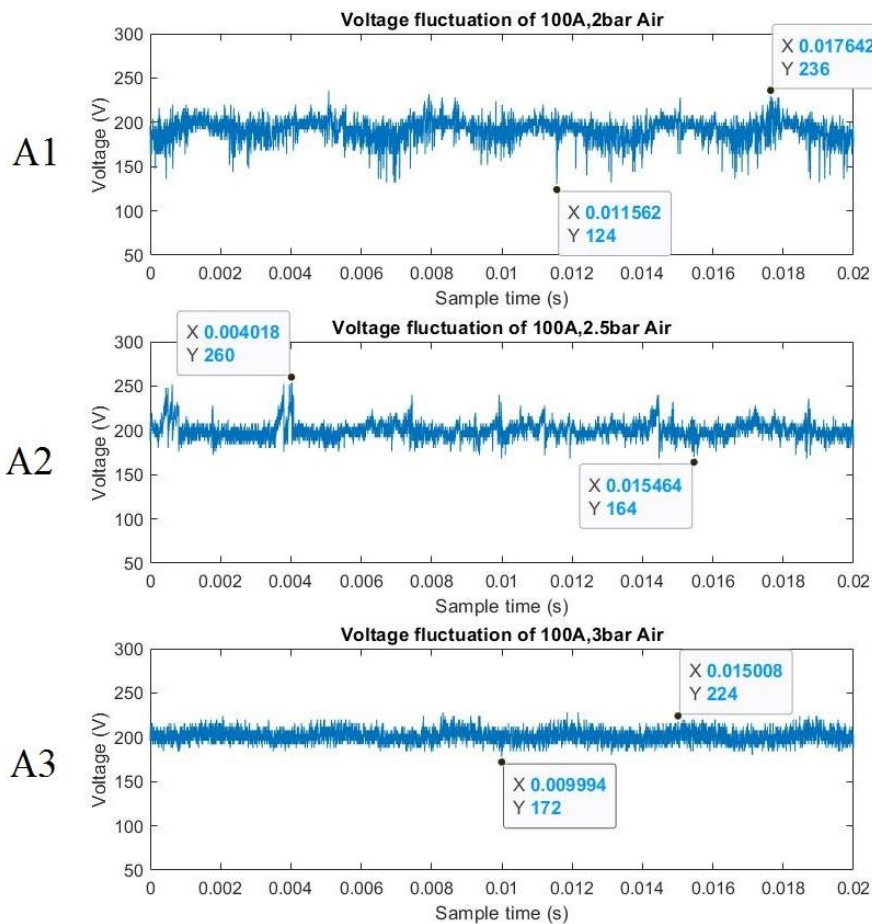
Fig. 5. Diagram A1: A6, shows the Plasma torch voltage fluctuations to the variation electric current at 2 bar constant gas pressure.





شکل ۶. نمودار ب ۱ تا ب ۶، فرکانس قالب ولتاژ مشعل در جریان‌های الکتریکی مختلف در فشار گاز کاری ۲ بار نشان داده شده است.

Fig. 6. Diagram B1: B6, shows the main frequency of plasma torch voltage fluctuations to the variation electric current at 2 bar constant gas pressure



شکل ۷. نمودار الف ۱ تا الف ۳، افت و خیز ولتاژ مشعل پلاسما در فشارهای گاز کاری مختلف در جریان الکتریکی ثابت ۱۰۰ آمپر نشان داده شده است.

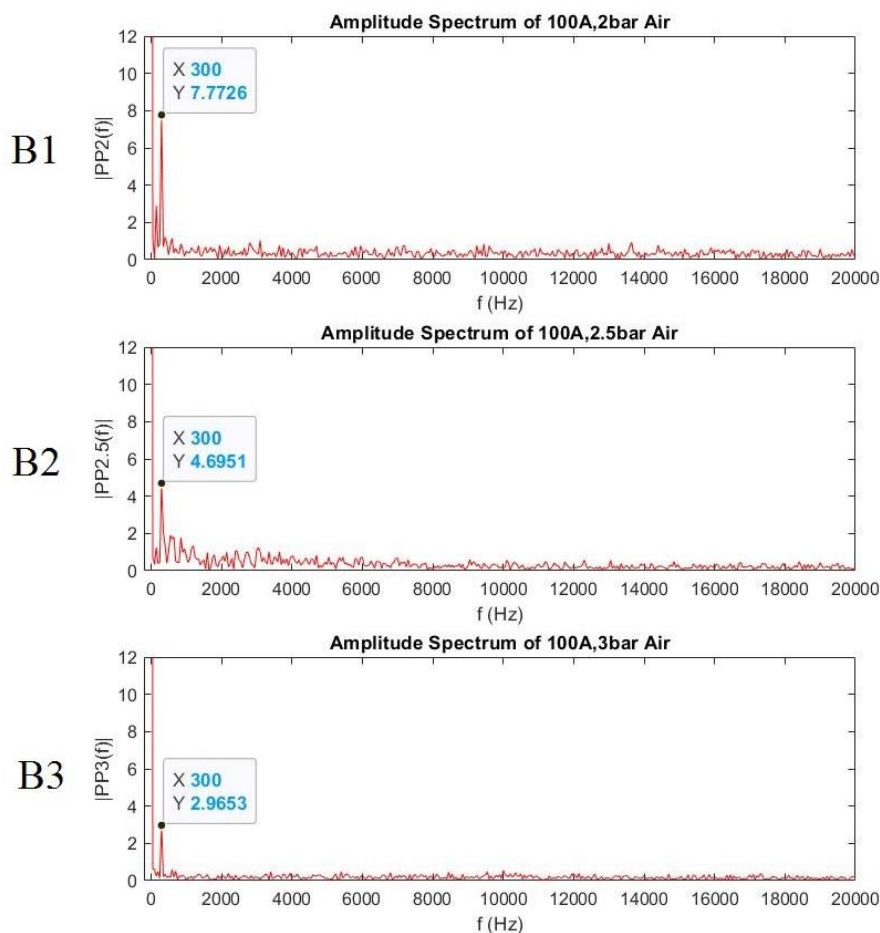
**Fig. 7. Diagram A1: A3, shows the Plasma torch voltage fluctuations to the variation working gas pressure at 100 A constant electric current.**

الکتریکی، قوس به سمت خروجی نازل هدایت می‌شود، در نتیجه طول قوس الکتریکی افزایش و ولتاژ میانگین مشعل افزایش می‌یابد. میزان افت و خیز ولتاژ یا به عبارتی دیگر، اختلاف بین بیشینه و کمینه ولتاژ هم افزایشی می‌شود که در نمودارها به صورت واضح مشهود شده است. رفتار قوس الکتریکی در تمامی فشارهای گاز ورودی به صورت ضربه‌ای<sup>۱</sup> بوده است اما درصد آن رو به کاهش است، که به دلیل ثابت شدن محل الصاق قوس الکتریکی در نزدیکی خروجی نازل می‌باشد.

شکل ۸ نمودارهای الف ۱ تا الف ۳، فرکانس قالب ولتاژ مشعل در فشارهای ورودی مختلف با رنگ قرمز در نظر گرفته شده است، این نمودار از تبدیل

سیستم به عنوان فرکانس ثابت منبع تغذیه است که تقریباً مقدار شدت آن ثابت می‌باشد، منبع تغذیه مورد استفاده در این آزمایش‌ها به صورت سه فاز و نوع کنترل جریان آن ترستور سواپچینگ در نظر گرفته شده است. هر فاز دارای اختلاف ۱۲۰ درجه و فرکانس ۵۰ هرتز بوده است و چون توسط دیود رکتیفایر جریان یکسو شده است در نتیجه یک فرکانس ۳۰۰ هرتز به واسطه منبع تغذیه در نمودارها مشاهده شده است.

در شکل ۷ نمودارهای الف ۱ تا الف ۳، افت و خیز ولتاژ مشعل پلاسما از فشار ورودی ۲ تا ۳ بار در جریان ۱۰۰ آمپر نشان داده شده است. همچنین مدت زمان نمونه برداری ولتاژ مشعل پلاسما ۲۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. با افزایش فشار گاز ورودی، نیروی درگ وارد بر ستون قوس



شکل ۸. نمودار ب ۱ تا ب ۳، فرکانس قالب ولتاژ مشعل در فشارهای گاز کاری مختلف در جریان الکتریکی ثابت ۱۰۰ آمپر نشان داده شده است.

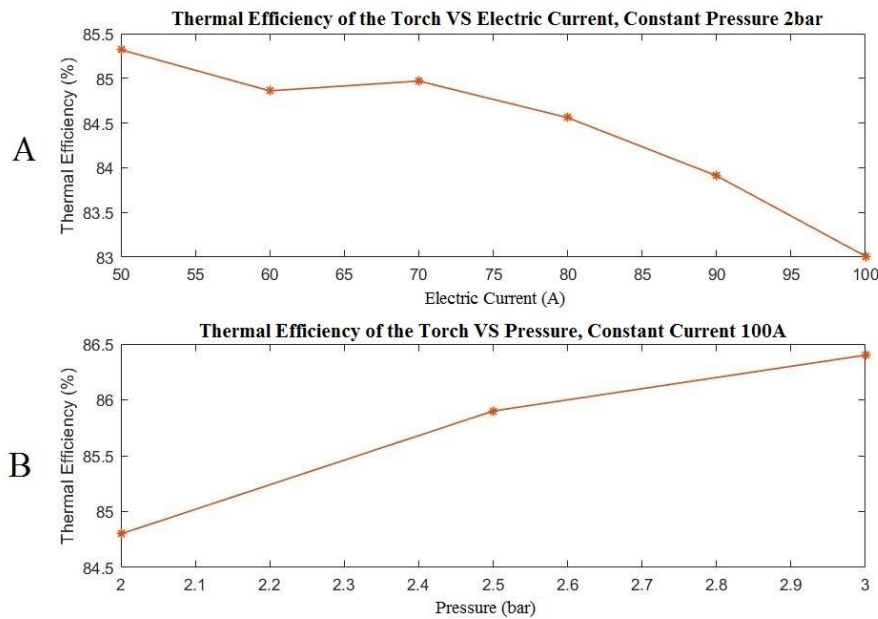
**Fig. 8. Diagram B1: B3, shows the main frequency of plasma torch voltage fluctuations to the variation working gas pressure at 100 A constant electric current.**

واسطه نیروی درگ ناشی از سرعت سیال به انتهای نازل رسیده است و نقطه الصاق آن بر روی نازل تقریباً ثابت شده است.

### ۳-۳- مشخصه راندمان حرارتی

در شکل ۹ نمودار تغییرات راندمان حرارتی را مشاهده می‌شود، همان گونه که در نمودار واضح است با افزایش جریان الکتریکی در فشار گاز ورودی ثابت ۲ بار راندمان حرارتی مشعل کاهش یافته و بلعکس در جریان الکتریکی ثابت ۱۰۰ آمپر با افزایش فشار گاز ورودی راندمان حرارتی مشعل افزایش یافته است.

فوریه<sup>۱</sup> نمودار ولتاژ- زمان، مشعل در بازه زمانی ۲۰ میلی ثانیه گرفته شده است. با افزایش فشار گاز ورودی شدت هارمونیک‌ها با فرکانس‌های مختلف در قوس الکتریکی افزایش و شدت فرکانس قالب قوس الکتریکی کاهش یافته است. در نمودار ب ۲ که مربوط به جریان ۱۰۰ آمپر و فشار گاز ورودی ۲/۵ بار است به صورت واضح مشاهده شده است که هارمونیک‌ها از ۴۵۰ هرتز تا ۶ کیلو هرتز وجود داشته‌اند. با توجه به نمودار ولتاژ در فشار ۳ بار مشاهده می‌شود که مقدار افت و خیز ولتاژ بسیار کم شده است و همچنین با توجه به نمودار فرکانسی ولتاژ مشاهده می‌شود که فرکانس‌های مختلف به شدت افت کرده‌اند، این پدیده به این دلیل است که قوس الکتریکی به



شکل ۹. نمودار الف، تغییرات راندمان حرارتی به جریان الکتریکی نشان داده شده است و نمودار ب، تغییرات راندمان حرارتی به فشار گاز کاری نشان داده شده است.

Fig. 9. Diagram A, shows the thermal efficiency variation to the electric current and Diagram B, shows the thermal efficiency changes to the working gas pressure.

است. در شکل ۱۱ \_ ب، آنتالپی پلاسما هوا تشکیل شده در جریان الکتریکی ۱۰۰ آمپر را به افزایش فشار گاز کاری از ۲ تا ۳ بار نشان داده شده است، که با افزایش فشار گاز کاری هم ولتاژ کاری مشعل و هم دبی گاز ورودی به مشعل افزایش یافته است، افزایش ولتاژ کاری باعث افزایش توان عملی به مشعل شده است ولی نرخ افزایش دبی گاز ورودی به افزایش توان بیشتر می‌باشد، در نتیجه مقدار آنتالپی پلاسما به افزایش فشار گاز، نزولی شده است.

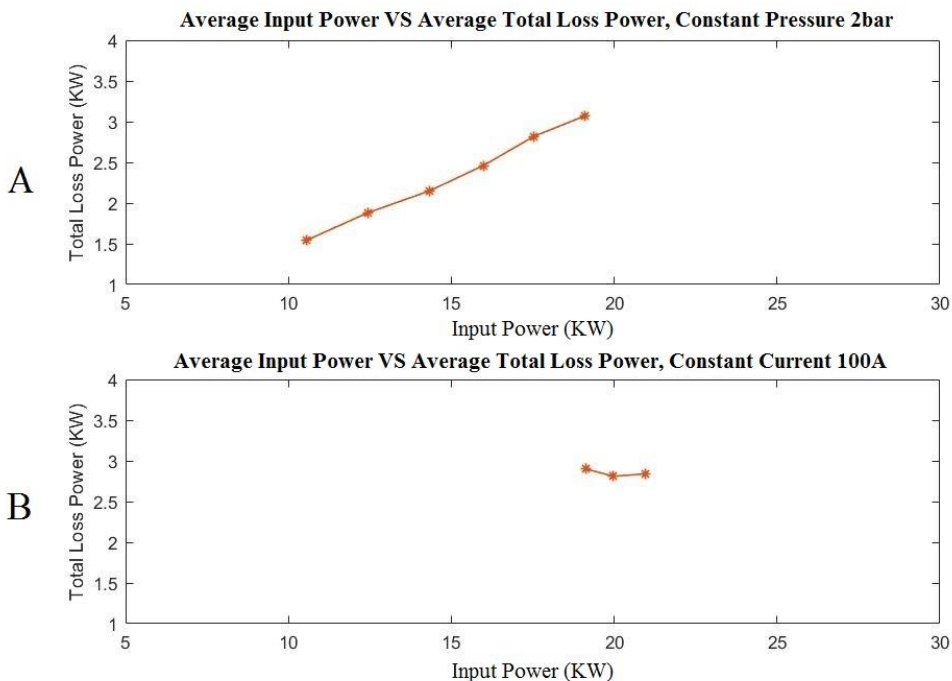
### ۳-۵- مشخصه دمایی بالک پلاسما

برای تخمین دمای جت پلاسما خروجی نازل، از روش طیف سنجی نور گسیلی از بالک پلاسما استفاده شده است. در این روش، گونه‌های فعال اتمی و مولکولی موجود درون پلاسما تشخیص داده می‌شوند. از آنجایی که این اتمها و مولکولها تحت دمای بسیار بالا و میدان الکتریکی هستند، انرژی داده شده به آنها به صورت انرژی داخلی منجر به مدهای برانگیختگی، لرزشی و دورانی می‌شود. بعضی اتمها و مولکولها نیز یونیزه می‌گردند و یک یا چند الکترون از دست داده‌اند. با اندازه‌گیری تابش شعله و آنالیز آن، گونه‌های اتمی و مولکولی که در حالتی از مدهای انرژی داخلی یا یونیزه

بیشترین سهم در اتلاف انرژی مربوط به خنک سازی الکترودها با آب  $Q_{CW}$  بوده است و مقدار دیگر سهمها در اتلاف انرژی یعنی  $Q_{conv}$  و  $Q_{rad}$  بسیار ناچیز است. هر دو حالت مورد بررسی در این تحقیق مقدار انرژی ورودی به مشعل I.V افزایش پیدا کرده است، یعنی افزایش فشار گاز ورودی و افزایش جریان الکتریکی باعث افزایش توان ورودی به مشعل شده است. در شکل ۱۰ به وضوح مشخص شده است که شیب نمودار فشار ثابت (الف) از شیب نمودار جریان ثابت (ب) بزرگ‌تر است و این یعنی در فشار ثابت با افزایش جریان الکتریکی، نرخ توان اتلافی بیشتر شده است و در حالت جریان الکتریکی ثابت با افزایش فشار گاز ورودی نرخ توان اتلافی کمتر شده است. در نتیجه با افزایش جریان الکتریکی راندمان حرارتی افت کرده است.

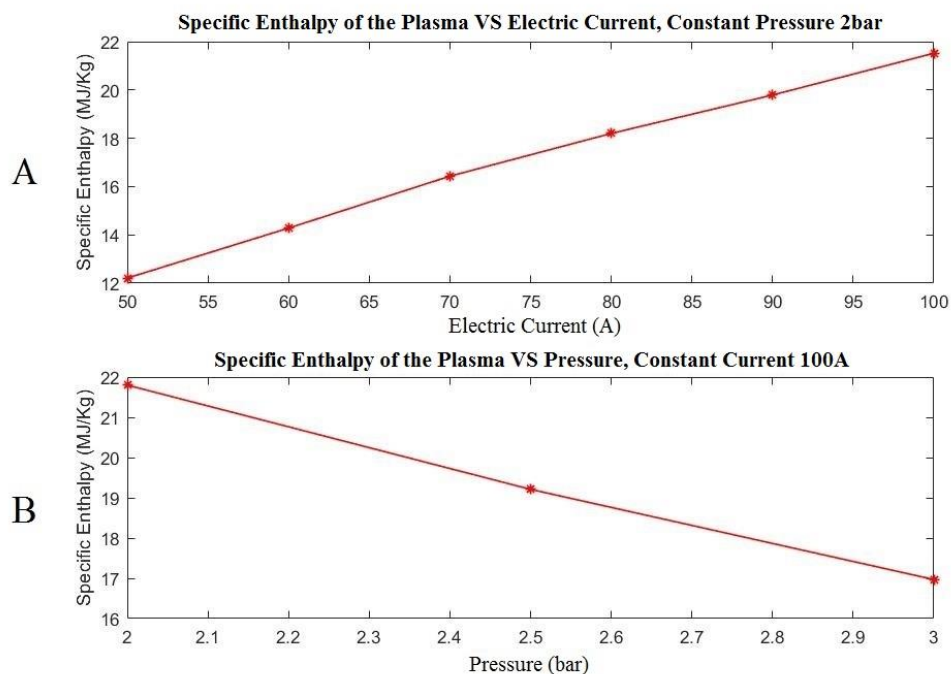
### ۳-۴- مشخصه آنتالپی پلاسما

نمودارهای الف و ب نمایش داده شده در شکل ۱۱، آنتالپی پلاسما هوا تشکیل شده را نشان می‌دهند. شکل ۱۱ \_ الف، آنتالپی پلاسما هوا تشکیل شده در فشار گاز کاری ۲ بار را به افزایش جریان الکتریکی نشان داده است، که با افزایش جریان الکتریکی توان اعمال شده بر پلاسما افزایش یافته و با ثابت بودن دبی گاز ورودی به مشعل، مقدار آنتالپی پلاسما افزایشی بوده



شکل ۱۰. نمودار توان ورودی به توان اتلافی در مشعل پلاسما نشان داده شده است، که بخش الف، برای تغییرات جریان در فشار ثابت و بخش ب، برای تغییرات فشار در جریان الکتریکی ثابت می‌باشند.

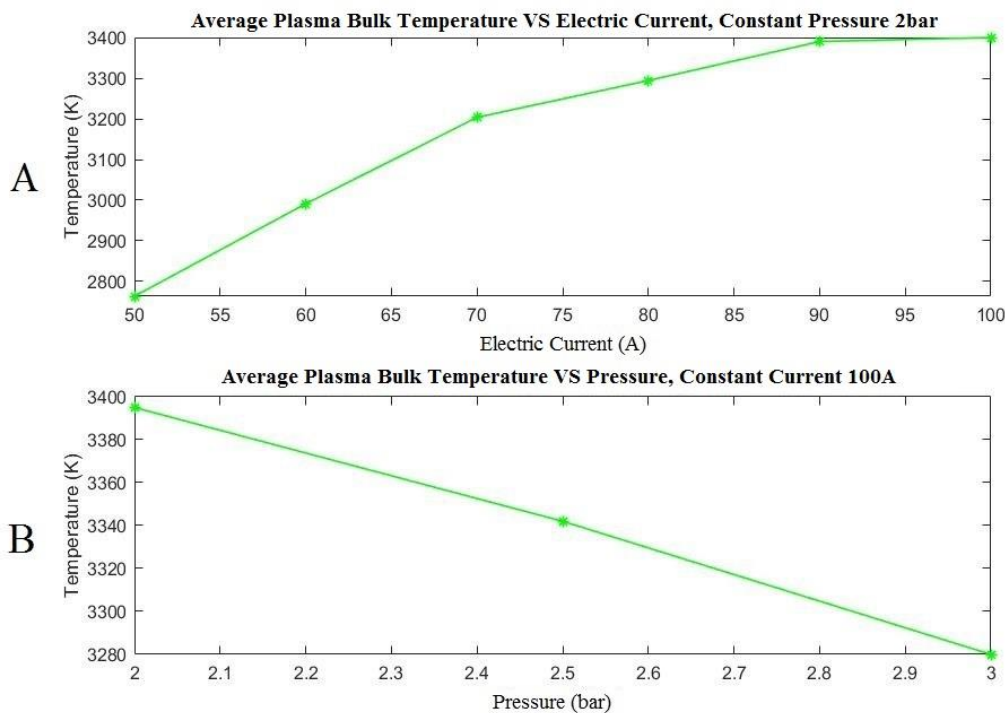
Fig. 10. Diagram shows the input power to the total loss power, that Part A, for constant working gas pressure and Part B, for constant electric current.



شکل ۱۱. نمودار الف، تغییرات انتالپی پلاسما به جریان الکتریکی نشان داده شده است و نمودار ب، تغییرات انتالپی پلاسما به فشار گاز کاری نشان داده شده است.

Fig. 11. Diagram A, shows the Specific enthalpy variation to the electric current and Diagram B, shows the Specific enthalpy changes to the working gas pressure.





شکل ۱۲. نمودار الف، تغییرات دمای میانگین بالک پلاسما به جریان الکتریکی نشان داده شده است و نمودار ب، تغییرات دمای میانگین بالک پلاسما به فشار گاز کاری نشان داده شده است.

Fig. 12. Diagram A, shows the average plasma bulk temperature variation to the electric current and Diagram B, shows the average plasma bulk temperature changes to the working gas pressure.

در نتیجه دمای میانگین بالک پلاسما خروجی از نازل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. دمای ثبت شده از مرکز محور نازل و در فاصله ۲۰ میلی متر از دهانه نازل در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲\_الف، تغییرات دما به افزایش جریان الکتریکی در فشار گاز کاری ۲ بار را مشاهده شده است، که با افزایش جریان الکتریکی، مقدار انرژی اعمال شده به پلاسما افزایش یافته است و دمای میانگین بالک پلاسما در خروجی نازل صعودی شده است. در شکل ۱۲\_ب، تغییرات دما به افزایش فشار گاز کاری از ۲ تا ۳ بار، در جریان الکتریکی ثابت ۱۰۰ آمپر را نشان داده شده است. در نتیجه با افزایش دبی گاز ورودی به مشعل، انرژی انتقال یافته به مولکول‌ها کاهش یافته و دمای میانگین بالک پلاسما در خروجی نازل نزولی شده است.

هستند تشخیص داده شد و همچنین به کمک تکنیک‌های آنالیزی مختلف، دمای الکترونی، دمای یونی و دمای دورانی یا لرزشی گونه‌ها را بررسی گردید. ما در این آزمایش از گازکاری هوا برای تشکیل پلاسما استفاده شده است، که در اتمسفر هوا نیز تشکیل شده است. در نتیجه در پلاسما مورد بررسی مولکول‌های  $OH, NO, N_p, H, H^+, O_p, N_p^+, O, N$  دیده شده‌اند. در هر دمایی با توجه به غلظت عناصر موجود در گاز پلاسما، ما شاهد پیک‌های مختلفی از مولکول‌ها و اتم‌ها هستیم. در مولکول‌ها بسته به شرایط برخی گونه‌ها که دارای محدوده طول موج یکسان هستند دیده می‌شوند و برخی گونه‌ها در شدت تابشی گونه‌های دیگر محو می‌گردند. برخی موارد پیک‌های اتمی روی پیک‌های مولکولی هم‌پوشانی می‌کنند. برای شرایط پلاسما با دما پایین (زیر ۵۰۰۰ کلوین)، از گذار مولکولی  $OH(A-X)$  شاخه R و P برای تعیین دما دورانی استفاده شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

آنچه از آزمایش‌ها و بررسی‌های بالا نتیجه می‌گردد به شرح زیر است، مشعل پلاسما طراحی و ساخته شده در مشخصه‌یابی الکتریکی دارای ولتاژ بیشینه ۲۱۰ ولت، در فشار هوا ۳ بار و جریان الکتریکی ۱۰۰ آمپر بوده است و مقدار ولتاژ کمینه ۱۹۱ ولت در فشار هوا ۲ بار و جریان الکتریکی ۱۰۰ آمپر مشاهده شده است. نوع رفتار قوس الکتریکی در حالت فشار ثابت و جریان الکتریکی ثابت از نوع ضربه‌ای<sup>۱</sup> بوده است، با افزایش جریان الکتریکی، فرکانس قالب مشعل به فرکانس ۳۰۰ هرتز نزدیک و فرکانس‌های دیگر کمینه شده است. با افزایش فشار گاز هوا ورودی، افت و خیز ولتاژ در فرکانس‌های مختلف افزایش یافته است. در مشخصه‌یابی ترموالکتریکی بیشینه راندمان حرارتی مشعل در جریان ۱۰۰ آمپر و فشار کاری ۳ بار برابر با ۸۶/۲ درصد بدست آورده شده است و کمینه راندمان حرارتی در جریان ۱۰۰ آمپر و فشار کاری ۲ بار برابر با ۸۳ درصد بوده است. نرخ اتلاف انرژی با افزایش جریان الکتریکی افزایش یافته است و با افزایش فشار گاز هوا ورودی اتلاف انرژی کاهش یافته است. مقدار بیشینه آنتالپی پلاسما تشکیل شده برابر با ۲۱/۵ مگاژول بر کیلوگرم در جریان ۱۰۰ آمپر و فشار ۲ بار بوده است و مقدار کمینه آنتالپی برابر با ۱۶/۹ مگاژول بر کیلوگرم در جریان ۱۰۰ آمپر و فشار ۳ بار به دست آمده است، همچنین آزمایش‌ها نشان داده‌اند افزایش جریان الکتریکی یا کاهش فشار هوا ورودی به مشعل، آنتالپی پلاسما تشکیل شده را افزایش داده است. بیشینه دمای بالک جت پلاسما در خروجی نازل ۳۴۰۰ کلوین تخمین زده شده است که در جریان الکتریکی ۱۰۰ آمپر و فشار گاز کاری ۲ بار آزمایش شده است. به دلیل استفاده این مشعل در ساختار دستگاه گازی ساز مواد کربن پایه، از بین مشخصه‌های بدست آورده برای مشعل پلاسما، سه مشخصه دما، آنتالپی و پهنای شعله از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، از این جهت با توجه به نتایج بدست آمده، مشعل پلاسما طراحی شده در فاصله ۲۰ میلی‌متری از خروجی نازل دارای دمای بالای ۳۰۰۰ درجه سلسیوس و آنتالپی مناسب ۲۱/۵ مگاژول بر کیلوگرم است، که می‌تواند فرایند گازی‌سازی ترکیبات آلی و کربن پایه را به صورت کامل انجام دهد. پهنای شعله بین ۲ الی ۳ سانتی متر است، در نتیجه مواد کربنی می‌توانند با همپوشانی مناسبی به داخل شعله اسپری شوند.

#### ۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
ولتاژ بیشینه مشعل، V	$V_{max}$
ولتاژ کمینه مشعل، V	$V_{min}$
ولتاژ میانگین مشعل، V	$V_{avr}$
انرژی ورودی به مشعل، J	$E_{input}$
انرژی گرفته شده از مشعل، J	$Q_{cooling}$
انرژی اتلافی به صورت تابشی، J	$Q_{rad}$
انرژی اتلافی به صورت همرفت، J	$Q_{conv}$
انرژی اتلافی به صورت خنک سازی الکترودها با آب، J	$Q_{cw}$
جریان الکتریکی، A	$I$
ولتاژ الکتریکی، V	$V$
دمای آب ورودی، °C	$T_1$
دمای آب خروجی، °C	$T_2$
شار انرژی انتقال یافته از واحد حجم، J/v	$q_{cw}$
ظرفیت گرمای ویژه آب، J/kg.°C	$c_{cw}$
دمای سطح مشعل، °C	$T_s$
دمای محیط، °C	$T_{\infty}$
ضریب انتقال حرارت همرفتی، J/s.m <sup>۲</sup> .°C	$h$
آنتالپی ویژه پلاسما، J/kg	$h_p$
آنتالپی ویژه هوا، J/kg	$h_c$
علائم یونانی	
ثابت استفان بولتزمن، J/s.m <sup>۲</sup> .°C <sup>۴</sup>	$\sigma$
ضریب تابش سطحی مشعل، ۱	$\epsilon$

- P.L. Fauchais, E. Pfender (Eds.) Handbook of Thermal Plasmas, Springer International Publishing, Cham, 2016, pp. 1-55.
- [12] M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, DC Plasma Torch Design and Performance, in: M.I. Boulos, P.L. Fauchais, E. Pfender (Eds.) Handbook of Thermal Plasmas, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 1-63.
- [13] M.F. Zhukov, I.M. Zasytkin, Thermal Plasma Torches: Design, Characteristics, Application, Cambridge International Science Publishing, 2007.
- [14] N.V. Obratsov, A.A. Safronov, D.I. Subbotin, D. Ivanov, J.D. Dudnik, The usage of low-voltage AC plasma torch for polystyrene gasification, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 643 (2019) 012076.
- [15] S.-W. Kim, H.-S. Park, H.-J. Kim, 100kW steam plasma process for treatment of PCBs (polychlorinated biphenyls) waste, Vacuum, 70(1) (2003) 59-66.
- [16] H. Nishikawa, M. Ibe, M. Tanaka, T. Takemoto, M. Ushio, Effect of DC steam plasma on gasifying carbonized waste, Vacuum, 80(11) (2006) 1311-1315.
- [17] G. Ni, P. Zhao, C. Cheng, Y. Song, H. Toyoda, Y. Meng, Characterization of a steam plasma jet at atmospheric pressure, Plasma Sources Science and Technology, 21 (2012) 015009.
- [18] A. Anshakov, A. Aliferov, P. Domarov, Investigation of the characteristics of an electric arc plasma torch with an output step electrode, Journal of Physics: Conference Series, 1661 (2020) 012133.
- [19] S.W. Chau, S.Y. Lu, P.J. Wang, Study on arc and flow characteristics of a non-transferred DC steam torch, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 44(7) (2021) 646-658.
- [20] X. Cao, D. Yu, M. Xiao, J. Miao, Y. Xiang, J. Yao, Design and Characteristics of a Laminar Plasma Torch for Materials Processing, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 36 (2016) 1-18.
- [1] J. Mostaghimi, M.I. Boulos, Thermal Plasma Sources: How Well are They Adopted to Process Needs?, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 35(3) (2015) 421-436.
- [2] A. Vardelle, C. Moreau, N. Themelis, C. Chazelas, A Perspective on Plasma Spray Technology, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 35 (2014).
- [3] M. Shigeta, A.B. Murphy, Thermal plasmas for nanofabrication, Journal of Physics D: Applied Physics, 44(17) (2011) 174025.
- [4] K.S. Kim, T.H. Kim, Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials, Journal of Applied Physics, 125(7) (2019) 070901.
- [5] A.S. Baskoro, S. Supriadi, Dharmanto, Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder, MATEC Web Conf., 269 (2019) 05004.
- [6] A.B. Murphy, A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 35(3) (2015) 471-489.
- [7] F. Fabry, C. Rehmet, V. Rohani, L. Fulcheri, Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review, Waste and Biomass Valorization, 4(3) (2013) 421-439.
- [8] N. Venkatramani, Industrial plasma torches and applications, Current Science, 83(3) (2002) 254-262.
- [9] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, P. Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 61(1) (2006) 2-30.
- [10] M.I. Boulos, P.L. Fauchais, E. Pfender, The Plasma State, in: Handbook of Thermal Plasmas, Springer International Publishing, Cham, 2016, pp. 1-53.
- [11] M.I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, High-Power Plasma Torches and Transferred Arcs, in: M.I. Boulos,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*P.Firoozia, M.Khania, B.shokria , Electrical and Thermodynamic Characteristics of Non-transfer Arc and Electric Direct Current Plasma Torch with Air Working Gas, Amirkabir J. Mech Eng., 54(5) (2022) 1149-1166.*

DOI: 10.22060/mej.2022.20349.7214



