

مدل پایه محاسبه دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی و مقایسه با دمای برانگیختگی الکترونی به روش بیناب نمایی برای مشعل قوسی غیر انتقالی با جریان مستقیم

نادر مرشدیان^{۱*} رقیه بدرلی^۲، پروین یورتچی^۱

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین

پست الکترونیکی: nmorshed@aeoi.org.ir

چکیده

روش بیناب نمایی به عنوان روش تشخیصی برای پلاسماهای آزمایشگاهی بسیار متداول است. پژوهش حاضر با توجه به روش بیناب نمایی از دو منظر قابل توجه و ارزش است؛ یکی اینکه دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی مورد نظر با جزئیات پایه و دقیق مورد تحلیل قرار گرفته و از این حیث که در گزارش های بین المللی نیز نسبت به دمای برانگیختگی الکترونی، بسیار کمتر به آن پرداخته شده، قابل توجه و در گزارش های داخلی نیز شاید حتی یافت نشود، مهم به شمار می آید. در نگاه دوم نیز با توجه به طراحی یک مشعل حرارتی، تخمین دما و مشخصات بینابی مشعل جدید، لازم و هدفمند بوده است. نتایج با استفاده از روش رسم بولتزمن، تحلیل دقیق از نمودار فرتریت و انتخاب شاخه P در گذار، معروف به سیستم منفی اول $N_2^+(B-X)$ برای مولکول دو اتمی نیتروژن غالب در هوا، محاسبه شده است. با انتخاب دقیق اعداد کوانتمی ترازهای چرخشی در شدت های بیشینه بیناب مربوطه، دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی مشعل، به ترتیب در حدود 2000 eV (0.17 eV) و 6400 eV (0.52 eV) درجه کلون بدست آمده است. نتایج دمایی این نمونه مشعل حرارتی با گزارش های معتبر بین المللی مقایسه شده و نیز با رهیافت ترمودینامیکی در همین شرایط در نوار کمترین دمای قابل انتظار قرار دارد. یعنی با یک شعله پلاسمای حرارتی نزدیک به دمای تحریک الکترونی (بیش از 4000 هزار درجه کلون) فاصله داریم. بنابراین، برای طراحی دقیق یک مشعل حرارتی با الکترودها و پارامترهای مناسب برای رسیدن به دمای ماکروسکوپیک در گستره 2000 تا 4000 درجه کلون، این طراحی در کمترین دما یا کمترین بهره دمایی برای طرح آینده (با هدف ساخت مشعل زباله سوز) قرار دارد و این نتایج مهم و ضروری به شمار می آیند.

واژه های کلیدی: دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی، مشعل پلاسمایی با جریان مستقیم غیر انتقالی، دمای برانگیختگی الکترونی، بیناب

نمایی نوری

۱. مقدمه

از نظر دمایی به دو دسته پلاسمای حرارتی (تعادلی) مانند مشعل پلاسمایی برای کاربردهای صنعتی و سخت و دسته دیگر پلاسمای سرد (غیر تعادلی) مانند قلم ها، شانه ها یا آرایه های پلاسمایی که برای کاربردهای نرم به عنوان مثال در پزشکی، در

مشعل های پلاسمایی و پلاسما جت ها اساسا پلاسماهایی هستند که شعله پلاسمایی با شارش گاز یونیزه به بیرون از سامانه الکترودهای تخلیه، هدایت می شوند. این شعله پلاسمایی

ترمیم زخم و مرمت بافت های سلولی و تاثیر در فرآیندهای زیستی میکرو ارگانیسم ها و پردازش سطوح به کار می روند. در پلاسمای سرد، سامانه می تواند در فشار پایین اتمسفر هم باشد و دمای الکترون ها نیز به ۱۰۰۰۰ درجه کلون می رسد ولی دمای یون ها بسیار پایین تر و ممکن است فقط کمی از دمای محیط بالاتر باشد [۶-۱].

اما پلاسمای حرارتی می تواند در همان پلاسمای فشار اتمسفری باشد که دارای آنتالپی بالا و دمای شعله پلاسمایی از ۲۰۰۰ درجه کلون و بالاتر است [۷, ۸]. کاربرد مشعل های پلاسمایی برای برش فلزات سخت، جوش پلاسمایی، زباله سوز پلاسمایی و کاربردهای صنعتی دیگر مورد استفاده قرار می گیرند [9, 10]. دستگاه های پلاسمای حرارتی یا مشعل های پلاسمایی با الکتروود تخلیه، یک ستون قوس پلاسمایی بین دو الکتروود بوجود می آورند. یک مشعل پلاسمایی ساده از دو الکتروود، یک میله فلزی به عنوان کاتد و آندی که به شکل یک نازل سوزنی ست و با هوا خنک می شود تشکیل شده است. مشعل های پلاسمایی از نظر تخلیه الکتریکی به چند گونه تقسیم می شوند. مشعل با تخلیه الکتریکی جریان مستقیم (DC) [۹-۱۲]، جریان متناوب (AC) و تخلیه بوسیله امواج رادیویی (RF) [۱۳, ۱۴]. هر کدام از این گونه مشعل ها دارای مزایایی هستند و استفاده از آنها به شرایط کاری بستگی دارد.

از مشعل های پلاسمایی RF از نوع ICP (مولد پلاسمای القایی با دمای پایین) برای پاشش پلاسمایی و آنالیز مواد استفاده می شود. یک نمونه از این مشعل، هم در فشار اتمسفری و هم در خلأ در پژوهش داخل کشور طراحی و ساخته شده است و اندازه گیری دما و بررسی گذار مد E به H به خوبی و یا تحلیل دقیق شرح داده شده است [۱۵].

مشعل های DC خود به دو گونه انتقالی و غیر انتقالی تقسیم بندی می شوند. در گونه انتقالی یک الکتروود (معمولا کاتد) درون ساختار خود ساهلنه و الکتروود آند در خارج از سامانه مثلا روی قطعه کاری یا هدف سوختنی قرار می گیرد که شعله پلاسمای بین کاتد و آند به شکل قوس الکتریکی شکل می گیرد. در روش یا پیکربندی انتقالی قابلیت گسترش بیشتر شعله روی قطعه کار نیز فراهم می شود. اما در نمونه غیر انتقالی

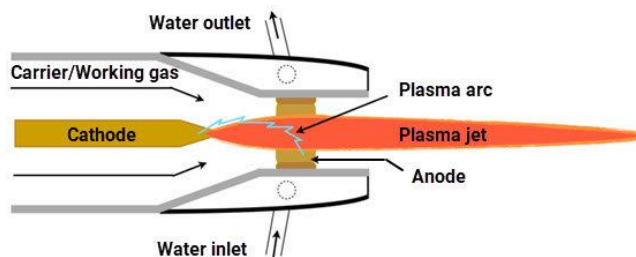
هر دو الکتروود در پیکربندی واحد خود سامانه، مطابق شکل ۱ جای می گیرند. قوس الکتریکی و نهایتا پلاسمای از گازی که با شارش سریع گاز (جت) در فضای بین الکتروودها جریان دارد، ایجاد شده و به شکل شعله پلاسمایی با طول مشخص به بیرون مشعل هدایت می شود. پلاسمای در این حالت یک پلاسمای حرارتی با دمای بالا است و برای کاربردهای گوناگون متفاوت می باشد.

در این گزارش، هدف، تخمین و بدست آوردن دمای شعله پلاسمایی و بهره یا کارایی یک مشعل حرارتی با روش بیناب نمایی گسیل نوری است. این کار در سطح داخل کم تر یا شاید با جزئیاتی که اینجا مطرح می شود تا به حال کار نشده است. البته بیناب نمایی برای تخمین دمای برانگیختگی الکترون ها در گزارشات متعددی بوده ولی اندازه گیری و محاسبه دمای ماکروسکوپی شعله پلاسمایی و مقایسه همزمان آن با دمای برانگیختگی الکترونی در این پژوهش انجام شده است. در شرایط مشابه آزمایشگاهی، دمای قوس الکتریکی در فضای بین الکتروودها حدود ۷۰۰۰ درجه کلون به روش تحلیل ترمودینامیکی تخمین زده شده است که با دمای شعله پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی در این گزارش قابل قیاس و سازگار است [۱۶].

۲. مشخصات کلی مشعل پلاسمایی

همانگونه که در بالا یادآور شدیم، پلاسمای مشعل در دسته پلاسمای حرارتی قرار می گیرد یعنی دمای گاز پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی پلاسمای در شرایط ایده آل بایستی به تعادل حرارتی رسیده باشند، یعنی دمای ماکروسکوپی یون ها یا گاز پلاسمایی در حد دمای برانگیختگی الکترونی بالا یا نزدیک به آن باشد.

بیناب بدست آمده در این آزمایش، با توان الکتریکی ورودی به مشعل در حدود ۲ کیلو وات، مورد نظر است. ولتاژ کاری در بازه ۱۲۰ تا ۱۲۵ ولت و جریان الکتریکی نیز در گستره ۱۵ تا ۲۰ آمپر است [۱۷]. یک پلاسمای اولیه در نتیجه یونیزاسیون میدانی و سپس آبخاری در فضای بین آند و الکتروود میانی (نازل



شکل ۱. طرح واره ای از مشعل پلاسمایی DC

۳. بیناب نمایی برای محاسبه دمای ماکروسکوپیک

شعله پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی

روش بیناب نمایی به عنوان روش تشخیصی برای پلاسماهای آزمایشگاهی بسیار متداول است. در روش بیناب نمایی گسیلی نوری پرتوهای نوری از پلاسما نشر یا تابیده و سپس بیناب نمایی می شود. از طرفی می توان با گسیل یک چشمه نوری به هدف و از باز نشر یا پراکندگی آن، بیناب نمایی کرد. این روش ها به ترتیب بیناب نمایی نشری و بیناب نمایی ناشی از پراکندگی نامیده می شوند. در این گزارش بیناب نشری بوسیله بیناب سنج از گونه V900 محصول شرکت فناوران فیزیک نور، تولید داخل کشور است. قدرت تفکیک پذیری یا دقت نوری این بیناب نما 1.8 نانومتر است. این اندازه گیری در بازه طول موجی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر انجام شده است.

منابع جت پلاسمای حرارتی، از آنجا که پلاسما در حال شارش دینامیکی ست و انرژی آن با منبع تغذیه خارجی تامین می شود، همبستگی دمای برانگیختگی الکترونی با دمای ماکروسکوپیک یا ترمودینامیکی شعله بسیار مورد بحث بوده است. در حقیقت دما در این گونه پلاسماها، با تعریف دما در حالت LTE یا دمای تعادل موضعی ترمودینامیکی تخمین زده می شود. این بدان معنی است که دمای یکسانی برای کل پلاسما فرض نمی شود و برای هر نقطه از پلاسما و بخشی از توده پلاسمایی در همسایگی این نقطه، شامل ذرات باردار الکترونها و یونها و نیز ذرات خنثی، تعادل دمایی با خود و با فوتون های تابشی فرض می شود (تعادل پلانک - بولتزمن) [۱۸ و ۱۹].

در این گونه پلاسماها در شرایط ایده آل کارکرد مشعل، می توان گفت که تعادل دمای برانگیختگی الکترونی با دمای

شناور که بین کاتد و آند قرار می گیرد) شکل می گیرد. سپس با فاصله زمانی کوتاهی متناسب با رسانش پلاسمای ایجاد شده، ولتاژ و جریان اصلی بین آند و کاتد برقرار می شود. در این حالت قوس الکتریکی با توان بالا با توجه به وجود پلاسمای اولیه و تقارن نازل و الکترونها و جریان یکنواخت گاز، بایستی یک شعله پلاسمایی همگن و یکنواخت با دمای بالا در خروجی آند تولید کند. طول و دمای شعله متناسب با توان الکتریکی اعمالی، فشار یا دبی جریان گاز یا حتی نوع گاز پلاسمایی ست و پارامترهای هستند که مشخصه بینایی و دمایی شعله به آنها وابسته است و در طراحی آینده و بهینه سازی باید مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. بنابراین شاخص دمای شعله در کارکرد موثر طرح آبی مشعل از عوامل مهم به شمار می آید. در بخش بعد به بیناب سنجی پلاسمای مشعل می پردازیم. البته یادآور می شویم که رهیافت بیناب سنجی بر پایه مدل رسم بولتزمن یک رهیافت آماری است و نتیجه ها بر اساس نزدیکی و سازگاری با داده های تجربی و تایید شده با مقدار منطقی و آمار دقیق تر، قابل قبول است. گزارش اولیه از طراحی، ساخت و راه اندازی این مشعل در قسمت مراجع آمده است [۱۸].

لازم به ذکر است، نوآوری مقاله حاضر در محاسبه دمای بزرگ مقیاس شعله پلاسمایی و مقایسه سازگار آن با دمای برانگیختگی الکترونی از همان شعله پلاسمایی و نیز همخوانی با دیگر رهیافت تحلیل دمایی از همین مشعل و نیز مقایسه با گزارش های معتبر داخلی و خارجی است.

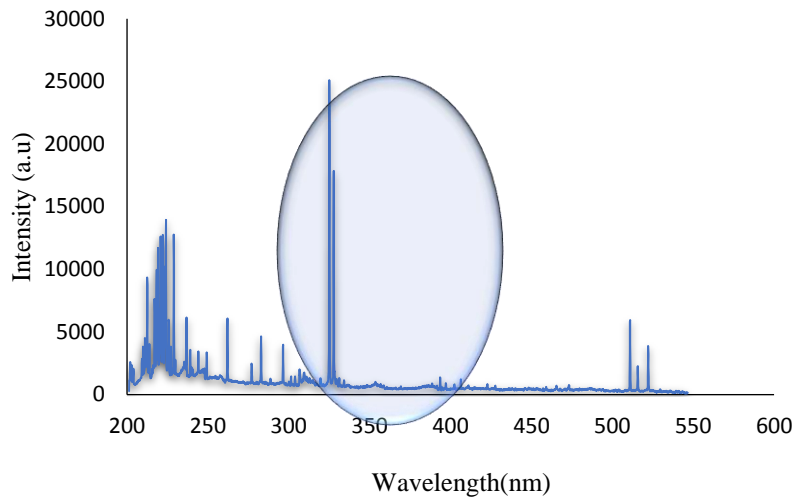
ماکروسکوپییک شعله پلاسمایی (تعادل پلانک - بولتزمن) برقرار است. اما با دور شدن از شرایط ایده آل در این گونه مشعل ها با توجه به گزارش های بین المللی دمای برانگیختگی الکترونی معمولا از ۲۰۰۰ درجه کلون و نسبت بالاتری (بسته به شرایط مشعل) از دمای ماکروسکوپییک شعله بیشتر است. اگر طراحی به گونه ایی باشد که تعادل خوبی بین دمای ماکروسکوپییک شعله و دمای الکترونی فراهم شده باشد، این دو دما به هم نزدیکتر خواهند بود و اصطلاحا پلاسمای گرمایی یا حرارتی خوبی داریم. با استفاده از مدل مگنتو هیدرودینامیک و تعادل ترمودینامیکی، دمای شعله با بیناب نمایی از گسیل اتم های خنثی آرگون برای چنین مشعل هایی استفاده شده است [۲۰].

دمای ماکروسکوپییک شعله یا گاز پلاسمایی را می توان با روش هایی اندازه گیری کرد که مستقیما به حرکت انتقالی ذرات بستگی دارند مانند پهن شدگی داپلر، و یا روش های دیگر مرتبط با گاز از جمله دمای چرخشی و ارتعاشی به دست آمده از بیناب سنجی مولکولی، با این شرط که این مقادیر با دمای گاز در تعادل باشند. در حقیقت مولکول های گاز (در اینجا نیتروژن) بعد از یونش و برهمکنش های برخوردی با الکترون ها در حالت های برانگیختگی ترازهای چرخشی و ارتعاشی قرار گرفته و سپس فوتون هایی گسیل می کنند که انرژی آنها متناسب با انرژی فروافت ترازهای برانگیخته هست و با دمای شعله متناسب است [۱۸ و ۲۱ و ۲۳].

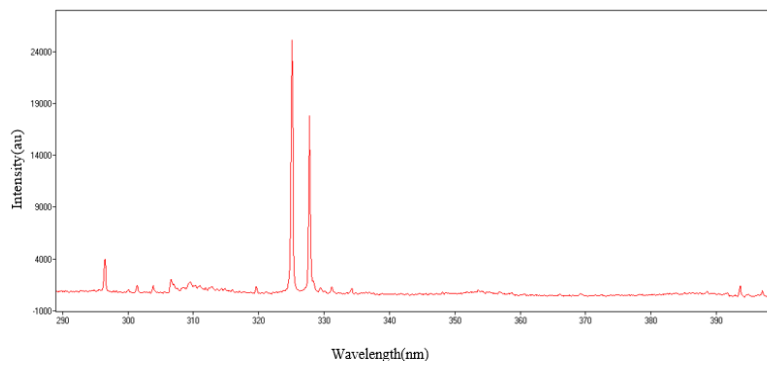
همچنین برای تعیین دمای برانگیختگی الکترون، نسبت به انرژی ترازهای الکترونی و وزن آماری و احتمال گذار آنها، دمای مورد نظر بدست می آید. در بخش ۱.۳، با استفاده از نمودار فتریت و روش رسم بولتزمن، دمای ماکروسکوپییک شعله پلاسمایی محاسبه می شود. در بخش ۲.۳، نیز به روش متداول رسم بولتزمن، دمای برانگیختگی الکترونی محاسبه و با دمای ماکروسکوپییک شعله مقایسه خواهد شد.

۱.۳. محاسبه دمای ماکروسکوپییک شعله گاز پلاسمایی

تعیین دمای ماکروسکوپییک شعله از یک مشعل حرارتی DC غیر انتقالی در داخل کشور تا به حال انجام نشده و در این پژوهش با استفاده از منابع خارجی که آنها هم بندرت به این موضوع پرداختند، با استفاده از روش های تجربی و تحلیل علمی بیناب بدست آمده از پلاسمای به این موضوع پرداخته شده است. در این پژوهش، بیناب بدست آمده از گسیل نشری پلاسمای شعله با بیناب سنج ذکر شده در فاصله حدودی ۲۰ سانتی متر از شعله، مطابق شکل ۲ بدست آمده است. در اینجا از روش مدل ترازهای چرخشی مولکول های دو اتمی نیتروژن که تشکیل دهنده عمده مولکول های گازی هواست استفاده می شود. مولکول دو اتمی نیتروژن، پیرامون طول پیوند تعادلی مربوط به هر پیکر بندی الکترونی

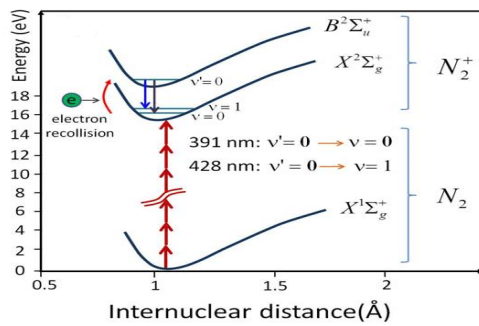


(الف)

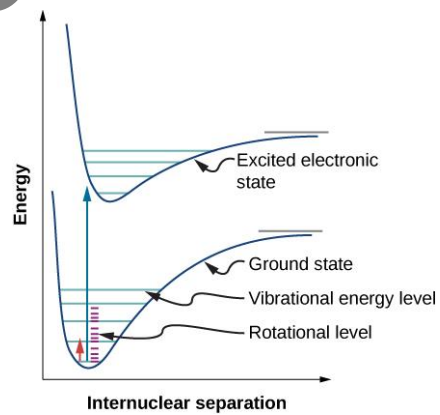


(ب)

شکل ۲. (الف) بیناب گسیلی از شعله پلاسمایی و (ب) بزرگ نمایی بیناب در محدوده ۴۰۰-۳۰۰ nm



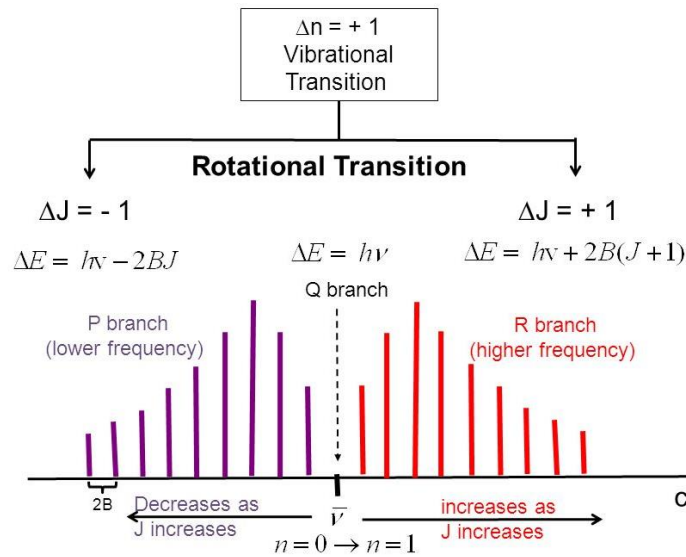
(ب)



(الف)

شکل ۳. منحنی انرژی پتانسیل مولکول دو اتمی و ترازهای انرژی چرخشی - ارتعاشی در دو شکل مختلف الف) و ب) [۲۱]

Rovibrational spectrum



شکل ۴. گذارهای شاخه P و R در ترازهای چرخشی [۱۳]

چرخشی گونه های مولکولی به عنوان مقدار تقریبی دمای شعله پلاسمایی در نظر گرفته می شود [۱۸ و ۲۰ و ۲۳]. X نشانگر تراز پایه و B و C، نماد ترازهای تحریکی چرخشی هستند. منظور از سیستم مثبت یا منفی نیز، همان گذار از ترازهای چرخشی با نسبت جمعیت تراز آنهاست. طبق توزیع بولتزمن شدت بیناب و انرژی ترازهای چرخشی در هر حالت اتمی یا مولکولی با رابطه (۲) داده می شود [۲۱-۲۳].

$$I_{em} = C(J' + J'' + 1) \exp\left(\frac{-E_{J'}}{k_B T}\right) \quad (2)$$

$$E_{J'} = B'_{\nu} h c J'(J' + 1)$$

روش معمول تعیین دما در کل باند چرخشی با بازآرایی معادله بالا به صورت رابطه ۳ بدست می آید.

$$\ln\left(\frac{I_{em} \lambda^4}{J' + J'' + 1}\right) = \frac{B'_{\nu} h c}{k_B T_{rot}} J'(J' + 1) + \ln C \quad (3)$$

که در آن C یک ثابت (برای باند منفرد J فرد یا زوج در دمای ثابت)، J' و J'' به ترتیب اعداد کوانتومی چرخشی ترازهای بالا و پایین، B'_{\nu} ثابت چرخشی مولکول در تراز بالایی، h ثابت پلانک، c سرعت نور و k_B ثابت بولتزمن و پارامتر \lambda نیز اضافه شده است [۳، ۸]. است. اگر نمودار \ln\left(\frac{I_{em} \lambda^4}{J' + J'' + 1}\right) نسبت به J'(J' + 1) رسم شود، شیب خط حاصل برابر -\frac{B'_{\nu} h c}{k_B T} است و بدین ترتیب دمای چرخشی مولکول بدست می آید. اغلب از

ارتعاش می کند و همزمان پیرامون محور عمود بر محور پیوند می چرخد. بنابراین هر حالت الکترونی، شامل طیفی از ترازهای ارتعاشی با اعداد کوانتومی ... و 2 و 1 و 0 = \nu و هر تراز ارتعاشی، شامل ساختار دقیق ترازهای انرژی چرخشی با اعداد کوانتومی ... و 2 و 1 و 0 = J است. بنابراین گذارهای اتمی یا مولکولی مورد نظر در ترازهای ارتعاشی-چرخشی حالت بالاتر انرژی به حالت پایین تر با تابش فوتونی همراه است (شکل ۳).

شدت خطوط بینایی I_{em} در بیناب گسیلی متناسب با جمعیت N_{J'} حالت های الکترونی بالایی از رابطه زیر بدست می آید.

$$I_{em} = g_{J'} N_{J'} A_{J' J''} \quad (1)$$

که در آن g_{J'} وزن آماری حالت های الکترونی بالایی و A_{J' J''} احتمال گذار است [۲۲]. اساساً ثابت چرخشی مولکول های نیتروژن، نه تنها برای حالت پایه X^1\Sigma_g^+ بلکه برای حالت های برانگیخته C^3\Pi_u و B^3\Pi_g هم بسیار کوچک است. بنابراین ترازهای برانگیخته چرخشی می توانند اغلب انرژی جنبشی را با انرژی انتقالی حرکت مولکول های نیتروژن خنثی مبادله کنند. از این رو دمای چرخشی مولکول های نیتروژن سیستم مثبت دوم N_2(B - X) و سیستم منفی اول N_2(C - B) می تواند نماینده خوبی برای دمای ذرات سنگین پلازما باشد، یعنی حرکت

شبییه سازی بلند چرخشی سیستم مثبت دوم با گذار $N_2(C - B)$ برای تعیین دمای چرخشی استفاده می شود، همچنین اولین باند مثبت $N_2(B - A)$ نیز می تواند برای تعیین دمای چرخشی استفاده شود، اما مطالعات نشان می دهد این گذار برای دماهای بالا دقت پایینی دارد [۳]. بنابراین، باند سیستم منفی اول $N_2^+(B - X)$ در محدوده طول موجی 390 تا 392 نانومتر برای تعیین دمای چرخشی انتخاب می شود.

به ترتیب، برهمکنش در هر سیستم، مثبت اول، مثبت دوم و منفی اول به شکل گذارهای زیر فوتون هایی گسیل می کنند [۱۴].

$$N_2(B, v) \rightarrow N_2(A, v') + hv(1^+) \quad (4)$$

$$N_2(C, v) \rightarrow N_2(B, v') + hv(2^+)$$

$$N_2^+(B, v) \rightarrow N_2^+(X, v') + hv(1^-)$$

همچنین مقدار ثابت چرخشی B'_v با مقادیر $B_e = 2.075 \text{ cm}^{-1}$ ثابت تعادلی چرخشی مولکول نیتروژن و $\alpha_e = 0.024 \text{ cm}^{-1}$ ضریب ثابت و $v' = 0$ متناظر با مبدا تراز پایه، که صفر در نظر گرفته شده است [۳، ۶]، به صورت زیر بدست می آید. در واقع ثابت چرخشی در بیناب سنجی مولکولی، ترازهای انرژی چرخشی را به عنوان تابعی از اعداد کوانتومی تکانه زاویه ای بیان می کند.

$$B'_v = B_e - \alpha_e \left(v' + \frac{1}{2} \right) = 2.063$$

با توجه به مقدار ثابت چرخشی $B'_v = 2.063$ و مقادیر ثابت hc و k_B معادله ۳ را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\ln \left(\frac{I\lambda^4}{J'+J''+1} \right) = -\frac{2.983}{T_{rot}} J'(J'+1) + \ln C \quad (5)$$

با استفاده از خطوط بینایی نیتروژن اتمی که درصد غالب مولکول های تشکیل دهنده هواس است در بیناب شکل ۲، شدت I و طول موج λ در جدول داده های ۱ بدست می آید.

قواعد گزینش برای یک جهش چرخشی در مولکول دو اتمی به صورت $\Delta J = \pm 1$ است. با توجه به شکل ۴، خطوط شاخه P و R نسبت به مبدا (که هیچ خطی در آن مشاهده نمی شود) بیناب های چرخشی ارتعاشی مولکول دو اتمی، در طرف راست و چپ

مبدا قرار می گیرند. به هر سری از خطوط چرخشی یک شاخه نسبت داده می شود که نسبت به مقدار ΔJ ، با یک حرف نامگذاری می شود. بدین ترتیب خط مبدا با گذار $\Delta J = 0$ ، شاخه Q، خطوط سمت راست مبدا با گذار $\Delta J = 1$ ، شاخه R و خطوط سمت چپ مبدا با گذار $\Delta J = -1$ ، شاخه P نامیده می شوند. هر کدام از خطوط شاخه R و P به صورت $R(J)$ و $P(J)$ نمایش داده می شود و J ها همان اعداد کوانتومی چرخشی در حالت های مختلف هستند [۲۲]. برای تجزیه و تحلیل بیناب، خطوط طیفی شاخه P، طبق قواعد گزینش $\Delta J = -1$ انتخاب شدند. توجه داشته باشید که خطوط شاخه P و R از نمودار فرتریت شکل ۵ بدست می آید که از داده های مرجع [۱۸] استخراج و در محدوده طول موجی مورد نظر رسم شده است. نمودار فرترت یک کمک گرافیکی مهم در تجزیه و تحلیل و نمایش ساختار چرخشی مولکول هاست. بنابراین اعداد کوانتومی مربوط به هر طول موج از نمودار شکل ۵ حاصل و با تکمیل داده های جدول ۱، دمای چرخشی با استفاده از شیب نمودار $\ln \left(\frac{I\lambda^4}{J'+J''+1} \right)$ نسبت به $J'(J'+1)$ محاسبه می شود.

با استفاده از رابطه ۵ و مقدار شیب خط بدست آمده از نمودار بولتزمن در شکل ۶، دمای شعله در حدود 2000 درجه کلوین (1700 الکترون ولت) تخمین زده شد. البته این مقدار با دقت تفکیک نوری دستگاه تنها دو نقطه طول موجی مناسب قابل رصد دارد و برای تخمین دمای بزرگ مقیاس شعله شرط لازم است. اگرچه در نوار کمینه مقدار همایی قرار می گیرد ولی برای طرح اولیه و آزمایشی مشعل، مقدار قابل قبولی است. با دقت نرم افزار پردازش دستگاه بیناب نما حدود چهار یا پنج نقطه وجود داشت و در آن صورت دما تا 4000 درجه کلوین تخمین زده می شد. اما چون مقدار دما موضعی است و دمای میانگین شعله طبعاً از آن کمتر هست، مقدار دمای بدست آمده با دقت تفکیک نوری دستگاه (2000 درجه کلوین) درست و منطقی است.

نکته قابل توجه در کار تجربی اندازه گیری بیناب در این است که الگوی قله های شدت بیناب بدست آمده در گستره طول موجی با توجه به پایداری شعله پلاسمايي تغییر نمی کند. اگرچه با توجه به شرایط محیطی (جذب در هوا و نوفه)، میزان

شدت تابش رسیده به بیناب نما نوسان دارد. افزایش یا کاهش قله یا شدت تابش رسیده به بیناب نما، تاثیر چندانی روی الگو یا نسبت دامنه آنها و در نتیجه روی شیب خط یا دمای بدست آمده در شکل ۶ نخواهد داشت. بدین ترتیب اگر در هر تکرار آزمایش بتوان شرایط اولیه یکسانی (فشار جریان گاز و توان الکتریکی ورودی و ...) با شعله پلاسمايي پایدار فراهم کرد، نسبت و الگوی قله های تابش، تکرارپذیر خواهند بود و تغییر چندانی در محاسبه دما نخواهیم داشت. تنها اعمال زمان ثبت و ضبط بیناب از روی نرم افزار بیناب ناماست که میزان شدت یا قله تابش رسیده به شکل اتفاقی ذخیره می شود.

دمای بدست آمده ۲۰۰۰ درجه کلونین با در نظر گرفتن تقریب LTE و موضعی بودن دمای شعله در کمینه گستره دمایی بزرگ مقیاس شعله با گزارش های دیگر در شرایط مشابه است [۳، ۶]. البته تغییرات دمایی با تقریب های اندازگیری شده در بیناب نمایی، برای مشعل های حرارتی گاها اجتناب ناپذیر است. چون با کوچکترین تغییر در توان الکتریکی ورودی، فشار گاز، فاصله الکترودها و نازل شناور از یکدیگر و دیگر عوامل، بیناب به شکل قابل ملاحظه ایی تغییر و بنابراین میزان تغییر در تخمین دمای شعله از مرتبه ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه کلونین می تواند متغیر باشد، ولی نکته مهم از دمای بدست آمده، بیناب مربوط به شعله پایدار (حدود ده دقیقه) است.

همچنین دمای بزرگ مقیاس بدست آمده با دمای الکترونی در بخش ۲.۳ تا حدودی سازگاری دارد ولی مقدار ۲۰۰۰ درجه کلونین در واقع کمترین دمای قابل قبول شعله در مقابل ۶۰۰۰ درجه کلونین از دمای برانگیختگی الکترون ها در بخش بعدی خواهد بود.

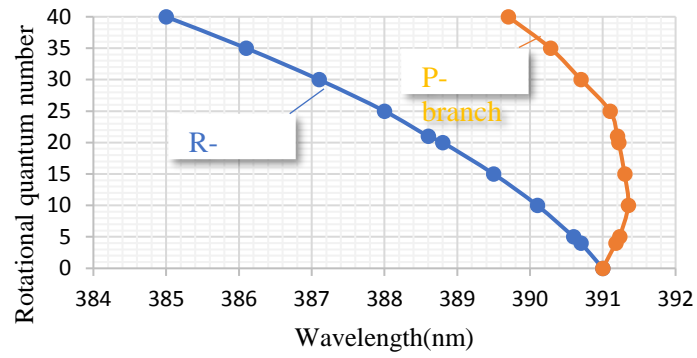
لازم به یادآوری هست، قله شدت های مورد نظر با توجه به قدرت تفکیک پذیری نوری بیناب نما، اندازه گیری شده است.

نتایج گواه براین است که مشعل از نظر تبادل دمایی یون ها با الکترون ها و داشتن یک پلاسماي برخوردی و رسیدن به شرایط یک مشعل حرارتی با بهره بالا، هنوز فاصله دارد. گفتنی است، با پیش بینی و تخمینی که در مقاله دیگر با رهیافت ترمودینامیکی از همین نویسنده مسئول داریم، این دما نسبت به دمای قوس الکتریکی داخل نازل و الکترودها (۷۰۰۰ درجه کلونین)، کاهش بیش از ۵۰٪ داشته است [۱۶]. هدف از بدست آوردن دمای شعله در این بخش همانا تخمین بهره یا کارآرایی مشعل بود که با این توصیف می توان گفت نوع طراحی الکترودها، فشار گاز مشعل و دیگر پارامترهای ورودی به آن نیز باید در گزارش طرح اولیه مرجع [۱۷] مورد مطالعه دقیق و اصلاح اساسی قرار گیرد.

همانگونه که در مقدمه آمد و به مراجع مربوطه اشاره شد، با همین روش (تمودار فرتريت)، دمای ماکروسکوپی شعله پلاسماي سرد نیز با دقت خوبی محاسبه شده است و دقت و درستی این روش و رهیافت را تایید می کند [۵، ۶].

۳.۲. محاسبه دمای برانگیختگی الکترون ها

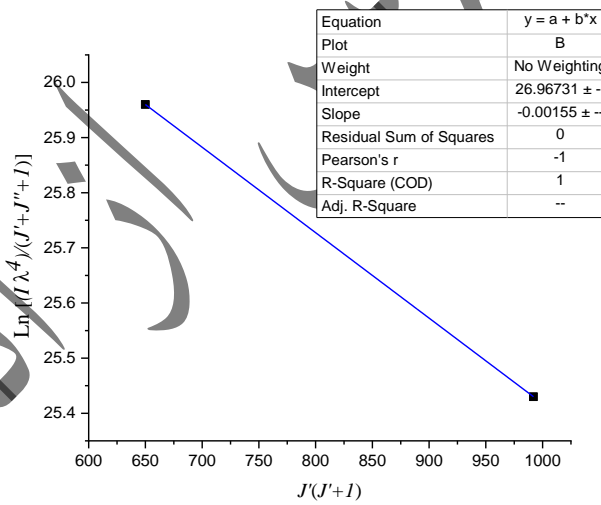
در تعیین دمای برانگیختگی الکترونی در واقع دمای تحریک ترازهای الکترونی است که با فرض برقراری تابع توزیع ماکسولی برای نمونه های برانگیخته در محیط پلاسما می باشد. برای محاسبه دمای برانگیختگی الکترونی از محدوده طول موجی ۲۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر استفاده می کنیم. نمودار بولتزمن در این بخش از رابطه ۶ بدست می آید [۱، ۱۵-۱۷].



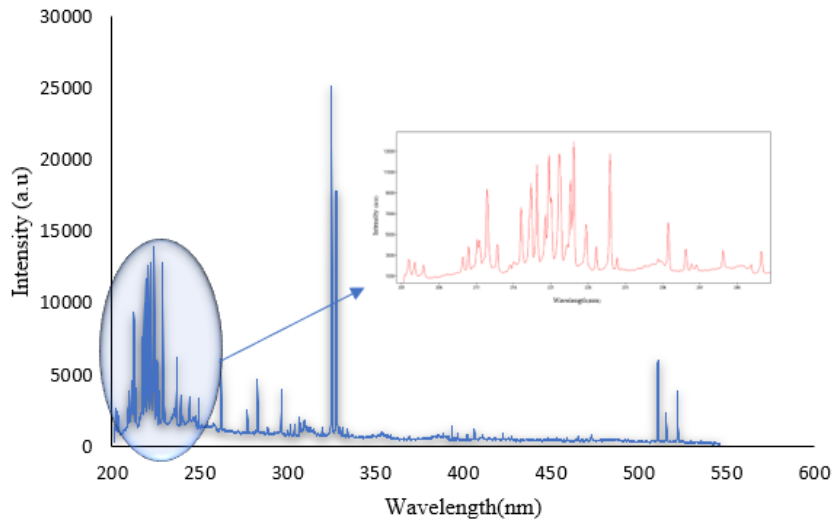
شکل ۵. نمودار فرترت باند $N_2^+(B-X)$ متناظر با خطوط بینایی در شاخه P و R

جدول ۱. داده های بدست آمده از خطوط بینایی و مقادیر ثابت از بانک داده های استاندارد NIST

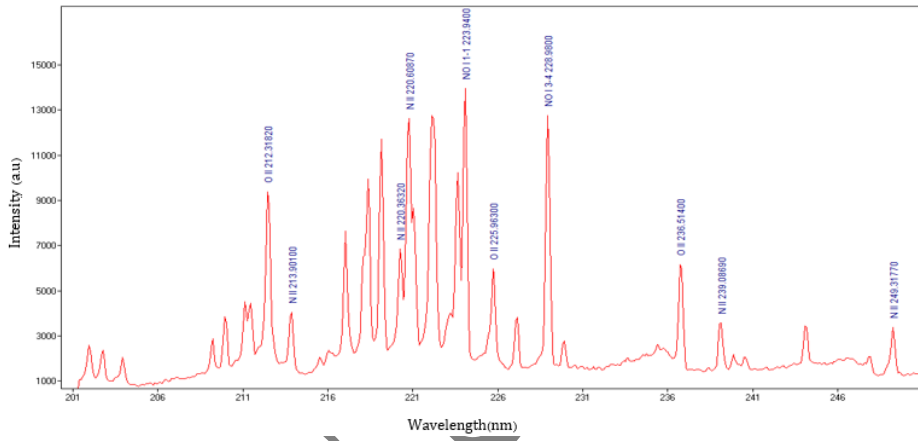
$\lambda(nm)$	I	$J''=J_p$	$J'+J''+1$
۳۹۱/۹۸	۴۱۴/۶۷	۲۶	۵۲
۳۹۰/۵۵	۶۰۵/۸۱	۳۲	۶۴



شکل ۶. خط برازش شده به داده های بدست آمده از جدول ۱



(الف)

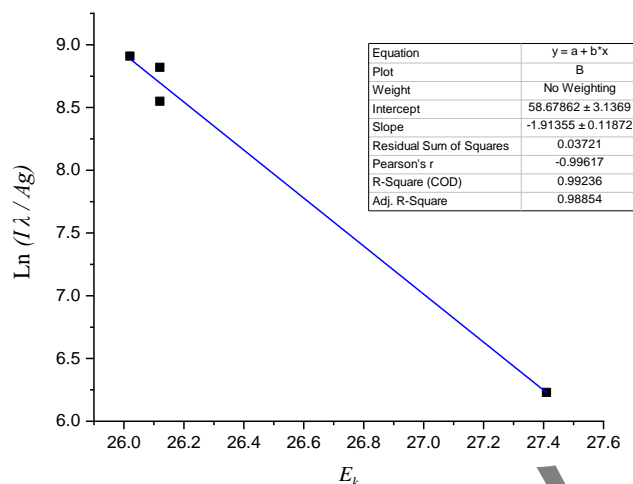


(ب)

شکل ۷. (الف) بیناب گسیلی از شعله پلاسمایی و (ب) بزرگ نمایی بیناب در محدوده ۲۰۰-۲۵۰ nm

جدول ۲. داده های بدست آمده از بیناب گسیلی و بانک داده های استاندارد NIST

$\lambda(\text{nm})$	I	$Ag(10^5 s^{-1})$	$E_k(\text{eV})$
۲۴۹/۲۶	۳۳۶۸/۵	۱۲۴	۲۶/۱۲
۲۳۹/۰۸	۳۵۶۸/۷	۱۶۴	۲۶/۱۲
۲۲۰/۶۸	۱۱۹۱۰/۹	۳۵۲	۲۶/۰۲
۲۱۳/۸۸	۴۰۳۵/۰۷	۱۶۹۰	۲۷/۴۱



شکل ۸. خط برازش شده به داده های بدست آمده از جدول ۲

نتیجه گیری

از آنجا که تعیین دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی برای مشعل های پلاسمای حرارتی با روش بیناب نمایی در داخل کشور تا کنون بدست نیامده، در این پژوهش علمی با توجه به مراجع معدود بین المللی در این زمینه، مدل پایه روش محاسبه دمای ماکروسکوپیک شعله و دمای برانگیختگی الکترونی بر اساس بیناب نشی از پلاسما با شرح جزئیات ارائه شده است. بر پایه داده های بینابی و با استفاده از نمودار فرتریت، شرایط انتخاب درست پارامترها و ضرایب کوانتومی گذارهای تابشی مورد تحلیل قرار گرفته است. انتخاب بازه طول موجی مناسب برای ترازهای چرخشی نیتروژن، برای مشعل گرمایی قوسی DC مذکور، دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی حدود ۲۰۰۰ درجه کلونین (0.17 eV) تخمین زده شد. این دما با گزارش های بین المللی در شرایط مشابه در کمینه مقداری گستره دمای ماکروسکوپیک شعله قرار می گیرد. البته همانگونه که در بالا گفته شد این یک دمای موضعی از پلاسماست و در مقاله ای جداگانه از همین نویسنده مسئول با رهیافت ترمودینامیکی، دمای قوس الکتریکی مولد شعله پلاسمایی ۷۰۰۰ درجه کلونین بدست آمده [۱۶] و این بهره دمایی پایین مشعل را نشان می دهد. با توجه به دمای برانگیختگی الکترونی در اینجا، می توان

$$\ln\left(\frac{I\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k}\right) = -\frac{E_k}{k_B T_{exc}} + \ln C \quad (6)$$

به گونه ایی که I شدت بیناب و λ_{ki} طول موج گذار از تراز k (بالا) به تراز i (پایین) در بازه طول موجی مربوط به برانگیختگی ترازهای الکترونی، هر دوی آنها از شکل ۷ حاصل شده و E_k انرژی برانگیختگی تراز بالایی، g_k وزن آماری (تبهگنی) تراز بالایی، A_{ki} احتمال گذار از تراز بالا به پایین از بانک داده های NIST استخراج می شود. مشابه با روش بخش قبل با به کاربردن معادله ۶ و برازش خط مربوطه مطابق شکل ۸، دمای الکترونی به صورت عکس شیب خط (m) محاسبه و مقدار آن در حدود ۶۴۰۰ درجه کلونین و معادل آن ۰/۵۲ الکترون ولت بدست می آید.

$$k_B T_{exc} = -\frac{1}{m} = 6396 K \approx 0.52 eV$$

این دما نیز در مرتبه منطقی و بالاتر از دمای شعله قرار دارد [۳]. در گزارش های آمده تا این محدوده دمایی، دمای برانگیختگی الکترون ها برای یک مشعل حرارتی با بهره و کارایی بالا معمولا تا ۲۰۰۰ درجه کلونین بیشتر از دمای ماکروسکوپیک شعله گزارش شده است و از این رو نتایج بدست آمده در این دو بخش نقشه راه مناسب و دقیق تری در پژوهش علمی را برای طراحی مشعل حرارتی فراهم می کند.

انسانی علمی و موثر را برای طرح های آتی و مرتبط با طرح های قبلی را فراهم کنند. همچنین در خصوص لزوم مشخصه سنجی از پلاسما و طراحی دقیق در ساخت مشعل حرارتی مناسب در راستای طرح زباله سوز یا دیگر اهداف، چه در سطح مدیریتی و چه در سطح همکاری، مشاوره و اجرا در طرح های درون و برون پژوهشگاهی، شایسته و بایسته است تا نیروهای متخصص مشخصه یابی و با تجربه در طرح ها سهیم باشند و این از بدیهی ترین وظایف مسئولین پژوهشی پژوهشگاه است. همچنان که می دانیم، تسهیم نیروهای انسانی موثر در یک پژوهش علمی، از دیدگاه اخلاق علمی نیز بسیار مهم و از الزامات کار به شمار می آید.

تشکر و قدردانی

از آقایان مهندس سید منصور طباطبائی و دکتر جمال الدین یزدان پناه (اعضای محترم علمی پژوهشگاه) برای کمک علمی و تجربی در باره فیزیک و ساخت مشعل های حرارتی از نوع ICP، تشکر ویژه دارم. همچنین از آقایان دکتر داود ایرجی (ریاست محترم پژوهشگاه پلاسما و گداخت هسته ای) و دکتر چاپار رسولی (مدیر محترم گروه پژوهشی محصورسازی مغناطیسی) برای راهنمایی و حمایت مسئولانه سپاسگزاری می نمایم.

گفت دمای بزرگ مقیاس شعله در کمترین مقدار قابل قبول خود قرار و با مقدار مطلوب فاصله دارد. با اصلاح فنی و مهندسی در طراحی الکترودها، نازل شناور و دیگر پارامترهای ورودی به مشعل این نکات در مرجع [۱۷] باید با محاسبه دقیق، اصلاح گردند تا دمای بزرگ مقیاس شعله پلاسمایی نزدیک به دمای برانگیختگی الکترونی و تا حدود ۲۰۰۰ درجه کلون کمتر از آن قرار گیرد.

همچنین دمای برانگیختگی الکترونی محک سنجشی برای دقت اندازه گیری و مقایسه آن با دمای ماکروسکوپی شعله، برای کارکرد موثر و بهره دمای مشعل حرارتی برآورد شد. بر پایه نمودار بولتزمن دمای برانگیختگی الکترونی نیز حدود ۶۴۰۰ درجه کلون (0.5 eV) بدست آمد. این محاسبات و تحلیل ها مبنای یک کار پژوهشی برای بهینه سازی در طراحی مشعل حرارتی و کاربرد آن در یک سامانه زباله سوز مورد نظر بوده است.

بنابراین، تغییرات و اصلاحات اساسی در مرجع ذکر شده [۱۷] در خصوص طراحی، ساخت و اندازه گیری مشخصات این مشعل مورد توجه نویسنده مسئول یا شخص مسئول طرح قرار می گیرد.

از مسئولین پژوهشی پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای انتظار می رود، زمینه مشارکت علمی و پژوهشی حداکثری نیروهای

مراجع

- [1] B. B. Sahu, S. B. Jin, and J. G. Han, "Development and characterization of a multi-electrode cold atmospheric pressure DBD plasma jet aiming plasma application," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 32, no. 4, pp. 782-795, 2017, doi: 10.1039/c6ja00419a.
- [2] P. Bruggeman and C. Leys, "Non-thermal plasmas in and in contact with liquids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, no. 5, p. 053001, 2009/02/17 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/5/053001.
- [3] J. Mrotzek and W. Viöl, "Spectroscopic Characterization of an Atmospheric Pressure Plasma Jet Used for Cold Plasma Spraying," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 13, doi: 10.3390/app12136814.
- [4] Z. Machala et al., "Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications," *Journal of Molecular Spectroscopy*, vol. 243, no. 2, pp. 194-201, 2007/06/01/ 2007, <https://doi.org/10.1016/j.jms.2007.03.001>.
- [5] N. Morshedian, et al, Analysis of plasma plume parameters in physio-chemical processes of RF plasma jet plume direct in water for the inactivation of Enterococcus bacteria, *AIP Advances* 13, 115217 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0164263>

- [6] Badrli, Roghayeh, et al., Experimental measurement of the macroscopic plume temperature of the plasma RF jet at atmospheric pressure of argon gas 99.98% by spectroscopy method, Iranian annual physics conference, <https://www.psi.ir/farsi.asp?page=physics1402>
- [7] S. Sintsov, K. Tabata, D. Mansfeld, A. Vodopyanov, and K. Komurasaki, "Optical emission spectroscopy of non-equilibrium microwave plasma torch sustained by focused radiation of gyrotron at 24 GHz," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 30, p. 305203, 2020/05/26 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ab8999.
- [8] C. J. Chen and S.-Z. Li, "Spectroscopic measurement of plasma gas temperature of the atmospheric-pressure microwave induced nitrogen plasma torch," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 24, no. 3, p. 035017, 2015/06/01 2015, doi: 10.1088/0963-0252/24/3/035017.
- [9] V. Goyal, G. Ravi, P. Bandyopadhyay, S. Banerjee, V. Yugesh, and S. Mukherjee, "Study of dynamical behaviour of the plasma in a dc non-transferred plasma torch using fast imaging," *Physics of Plasmas*, vol. 24, no. 3, p. 033506, 2017, doi: 10.1063/1.4977914.
- [10] N. Tiwari, S. Bhandari, and S. Ghorui, "Stability and structures in atmospheric pressure DC non-transferred arc plasma jets of argon, nitrogen, and air," *Physics of Plasmas*, vol. 25, no. 7, p. 072103, 2018, doi: 10.1063/1.5034397.
- [11] Z. Guo, S. Yin, H. Liao, and S. Gu, "Three-dimensional simulation of an argon-hydrogen DC non-transferred arc plasma torch," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 80, pp. 644-652, 2015/01/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.059>.
- [12] A. K. Das, K. P. Sreekumar, and N. Venkatramani, "DC plasma torch voltage and current characteristics through heat balance measurements," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 3, no. 1, p. 108, 1994/02/01 1994, doi: 10.1088/0963-0252/3/1/013.
- [13] D. Bernardi, V. Colombo, E. Ghedini, and A. Mentrelli, "Three-dimensional modelling of inductively coupled plasma torches," *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 22, no. 1, pp. 119-125, 2003/01/01 2003, doi: 10.1140/epjd/e2002-00233-9.
- [14] D. Bernardi, V. Colombo, E. Ghedini, A. Mentrelli, and T. Trombetti, "3-D numerical simulation of fully-coupled particle heating in ICPTs," *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 28, no. 3, pp. 423-433, 2004/03/01 2004, doi: 10.1140/epjd/e2004-00012-8.
- [15] S.M. Tabatabaei, J. Yazdanpanah, A.R. Hefzosehhe, "Temperature measurement and examination of E to H transition in vacuum ICP plasma", <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1281.1833>, accepted by *Journal of nuclear science and technology* (2023), (persian)
- [16] N. Morshedian, N. Beigmohammadi, "Analysis of thermodynamics of plasma waste-incinerator chamber, measurement and analysis of chamber temperature and calculation of electrical arc temperature", accepted to the *Iranian Journal of Applied Physics (IJAP)* with code: IJAP-2307-1337, (2023), (persian), doi: 10.22051/IJAP.2023.43972.1337
- [17] Khaleghian Gh., Beigmohammadi N., Morshedian N., Nohekhan M., Rezaeefard B., Design and construction of a laboratory plasma gasification system for municipal solid waste, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45, issue 1, No. 107, April 2024, <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1237.1805>, and (Technical report project with code: PRI-F2-99-003, plasma and fusion research school, NSTRI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran Iran)
- [18] W. L. Wiese, Spectroscopic diagnostics of low temperature plasmas: techniques and required data, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 46, 831(1991).
- [19] B. L. Caughlin and M.W. Blades, An evaluation of ion-atom emission intensity ratios and local thermodynamic equilibrium in an argon inductively coupled plasma, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic*
- [20] D. A. Scott, P. Kovitya, and G. N. Haddad, "Temperatures in the plume of a dc plasma torch," *Journal of Applied Physics*, vol. 66, no. 11, pp. 5232-5239, 1989, doi: 10.1063/1.343709.
- [21] B. Bayram and M. Freamat, Rotational spectra of N₂⁺: An advanced undergraduate laboratory in atomic and molecular spectroscopy, 2015.
- [22] P. J. C. a. V. Milosavljevic, "Spectroscopic characterization of a radio-frequency argon plasma jet discharge in ambient air," by Oxford University Press on behalf of the Physical Society of Japan, 2015.
- [23] S. D. Popa, "Vibrational distributions in a flowing nitrogen glow discharge," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 29, no. 2, pp. 411-415, 1996/02/14 1996, doi: 10.1088/0022-3727/29/2/018.
- [24] Y. Wang, Z. Yin, H. Wang, and Z. Zhao, "Optical investigation of a plasma jet generated by water electrodes at atmospheric pressure," *Optik*, vol. 164, pp. 165-170, 2018/07/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.018>.
- [25] B. Seesahai, "Plasma Temperature Measurements in the Context of Spectra in the Context of Spectral Interference", University of Central Florida, 2016.

- [26] A. Falahat, M. Taraz, M. N. Rostami Ravari and A. Shahedi, "Optical characteristics of a RF DBD plasma jet in various Ar/O₂ mixtures", India academy of science, Pramana, J. phys. (2018), 90, 27

نسخه پیش از انتشار