

## مدل پایه محاسبه دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی و مقایسه با دمای برانگیختگی الکترونی به روش بیناب‌نمایی برای مشعل قوسی غیرانتقالی با جریان مستقیم

نادر مرشدیان<sup>۱\*</sup>، رقیه بدرلی<sup>۲</sup>، و پروین یورتچی<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

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

پست الکترونیکی: nmorshed@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴)

### چکیده

روش بیناب‌نمایی به عنوان روش تشخیصی برای پلاسماهای آزمایشگاهی بسیار متداول است. پژوهش حاضر با توجه به روش بیناب‌نمایی از دو منظر قابل توجه و ارزش است. یکی این که دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی مورد نظر با جزییات پایه و دقیق مورد تحلیل قرار گرفته است. در گزارش‌های بین‌المللی نیز نسبت به دمای برانگیختگی الکترونی، بسیار کمتر به آن پرداخته شده، و در گزارش‌های داخلی نیز شاید حتی یافت نشود. این رو بررسی آن قابل توجه و حائز اهمیت است. 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 سامانه منفی اول  $N_2^+(B-X)$  برای مولکول دواتمی نیتروژن غالب در هوا، محاسبه شده است. با انتخاب دقیق اعداد کوانتمی ترازهای چرخشی در شدت‌های پیشینه بیناب مربوطه، دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی مشعل، به ترتیب در حدود  $2000$  ( $0.17eV$ ) و  $6400$  ( $0.52eV$ ) کلوین به دست آمده است. نتایج دمایی این نمونه مشعل حرارتی با گزارش‌های معتبر بین‌المللی 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 ۴۰۰۰ هزار کلوین) فاصله داریم. بنابراین، برای طراحی دقیق یک مشعل حرارتی با الکترودها و پارامترهای مناسب برای رسیدن به دمای ماکروسکوپیک در گستره ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ کلوین، این طراحی در کمترین دما یا کمترین بهره دمای برای طرح آینده (با هدف ساخت مشعل زیاله سوز) قرار دارد و این نتایج مهم و ضروری به شمار می‌آیند.

**واژه‌های کلیدی:** دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی، مشعل پلاسمایی با جریان مستقیم غیرانتقالی، دمای برانگیختگی الکترونی، بیناب‌نمایی

نوری

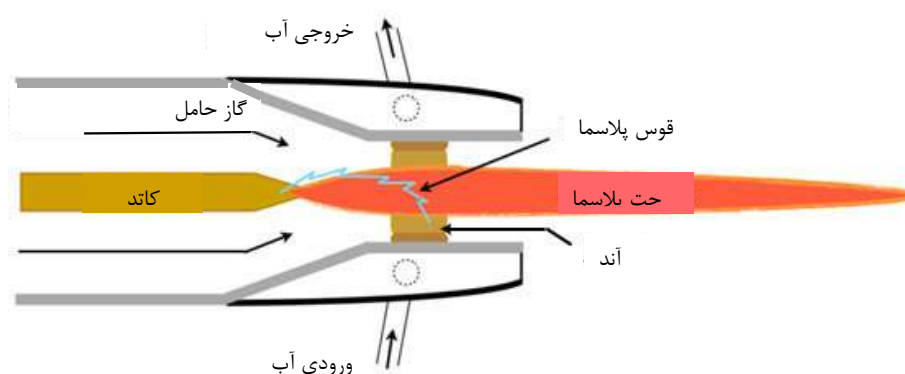
هستند که شعله پلاسمایی با شارش گاز یونیده به بیرون از

سامانه الکترودهای تخلیه، هدایت می‌شوند. این شعله پلاسمایی

از نظر دمایی به دو دسته پلاسمای حرارتی (تعادلی) مانند مشعل

### ۱. مقدمه

مشعل‌های پلاسمایی و فواره‌های پلاسمایی اساساً پلاسماهایی



شکل ۱. طرحواره‌ای از مشعل پلاسمایی DC.

دارند و استفاده از آنها به شرایط کاری بستگی دارد. از مشعل‌های پلاسمایی RF از نوع ICP (مولد پلاسمای القایی با دمای پایین) برای پاشش پلاسمایی و تحلیل مواد استفاده می‌شود. یک نمونه از این مشعل، هم در فشار اتمسفری و هم در خلأ در پژوهش داخل کشور طراحی و ساخته شده است و اندازه‌گیری دما و بررسی گذار مد E به H به خوبی و با تحلیل دقیق شرح داده شده است [۱۵].

مشعل‌های DC خود به دو گونه انتقالی و غیر انتقالی تقسیم‌بندی می‌شوند. در گونه انتقالی، یک الکتروود (معمولاً کاتد) درون ساختار خود سالمند و الکتروود آند در خارج از سامانه مثلاً روی قطعه کاری یا هدف سوختنی قرار می‌گیرد که شعله پلاسمای بین کاتد و آند به شکل قوس الکتریکی شکل می‌گیرد. در روش یا پیکربندی انتقالی، قابلیت گسترش بیشتر شعله روی قطعه کاری نیز فراهم می‌شود. اما در نمونه غیرانتقالی، هر دو الکتروود در پیکربندی واحد خود سالمند، مطابق شکل ۱ جای می‌گیرند. قوس الکتریکی و نهایتاً پلاسما از گازی که با شارش سریع گاز (جت یا فواره) در فضای بین الکتروودها جریان دارد، ایجاد شده و به شکل شعله پلاسمایی با طول مشخص به بیرون مشعل هدایت می‌شود. پلاسما در این حالت یک پلاسمای حرارتی با دمای بالا است و برای کاربردهای گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این گزارش، هدف، تخمین و به‌دست آوردن دمای شعله پلاسمایی و بهره یا کارایی یک مشعل حرارتی با روش

پلاسمایی برای کاربردهای صنعتی و سخت و دسته دیگر پلاسمای سرد (غیر تعادلی) مانند قلم‌ها، شانه‌ها یا آرایه‌های پلاسمایی که برای کاربردهای نرم به عنوان مثال در پزشکی، در ترمیم زخم و مرمت بافت‌های سلولی و تأثیر در فرایندهای زیستی میکروارگانیسم‌ها و پردازش سطوح به کار می‌روند. در پلاسمای سرد، سامانه می‌تواند در فشار پایین اتمسفر هم باشد و دمای الکترون‌ها نیز به ۱۰۰۰۰ کلوین می‌رسد، ولی دمای یون‌ها بسیار پایین‌تر است و ممکن است فقط کمی از دمای محیط بالاتر باشد [۱-۶].

البته پلاسمای حرارتی می‌تواند در همان پلاسمای فشار اتمسفری باشد که آنتالپی بالا و دمای شعله پلاسمایی از ۲۰۰۰ کلوین و بالاتر دارد [۷ و ۸]. کاربرد مشعل‌های پلاسمایی برای برش فلزات سخت، جوش پلاسمایی، زباله سوز پلاسمایی و کاربردهای صنعتی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹ و ۱۰]. دستگاه‌های پلاسمای حرارتی یا مشعل پلاسمایی با الکتروود تخلیه، یک ستون قوس پلاسمایی بین دو الکتروود به وجود می‌آورند. یک مشعل پلاسمایی ساده از دو الکتروود، یک میله فلزی به عنوان کاتد و آندی که به شکل یک سرلوله (نازل) سوزنی است و با هوا خنک می‌شود تشکیل شده است. مشعل‌های پلاسمایی از نظر تخلیه الکتریکی به چند گونه تقسیم می‌شوند. مشعل با تخلیه الکتریکی جریان مستقیم (DC) [۹-۱۲]، جریان متناوب (AC) و تخلیه به وسیله امواج رادیویی (RF) [۱۳ و ۱۴]. هر کدام از این گونه مشعل‌ها مزایایی

وبهینه سازی باید مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. بنابراین شاخص دمای شعله در کارکرد مؤثر طرح آبی مشعل از عوامل مهم به‌شمار می‌آید. در بخش بعد به بیناب‌سنجی پلاسمای مشعل می‌پردازیم. البته یادآور می‌شویم که رهیافت بیناب‌سنجی بر پایه مدل رسم بولتزمن یک رهیافت آماری است و نتیجه‌ها بر اساس نزدیکی و سازگاری با داده‌های تجربی و تأیید شده با مقدار منطقی و آمار دقیق‌تر، قلیل قبول است. گزارش اولیه از طراحی، ساخت و راه‌اندازی این مشعل در قسمت مراجع آمده است [۱۷].

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 گزارش‌های معتبر داخلی و خارجی است.

### ۳. بیناب‌نمایی برای محاسبه دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی

روش بیناب‌نمایی به عنوان روش تشخیصی برای پلاسماهای آزمایشگاهی بسیار متداول است. در روش بیناب‌نمایی گسیلی نوری، پرتوهای نوری از پلاسما نشر یا تابیده و سپس بیناب‌نمایی می‌شود. از طرفی می‌توان با گسیل یک چشمه نوری به هدف و از باز نشر یا پراکندگی آن، بیناب‌نمایی کرد. این روش‌ها به ترتیب بیناب‌نمایی نشری و بیناب‌نمایی ناشی از پراکندگی نامیده می‌شوند. در این گزارش، بیناب نشری به‌وسیله بیناب‌سنج از گونه ۷۹۰۰ محصول شرکت فناوران فیزیک نور، تولید داخل کشور است. قدرت تفکیک‌پذیری یا دقت نوری این بیناب نما ۱/۸ نانومتر است. این اندازه‌گیری در بازه طول موجی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر انجام شده است.

منابع فواره پلاسمای حرارتی، از آنجا که پلاسما در حال شارش دینامیکی است و انرژی آن با منبع تغذیه خارجی تأمین می‌شود، همبستگی دمای برانگیختگی الکترونی با دمای ماکروسکوپیک یا ترمودینامیکی شعله بسیار مورد بحث بوده است. درحقیقت دما در این گونه پلاسماها، با تعریف دما در حالت LTE یا دمای

بیناب‌نمایی گسیل نوری است. این کار در سطح داخل کمتر یا شاید با جزییاتی که اینجا مطرح می‌شود تا به حال کار نشده است. البته بیناب‌نمایی برای تخمین دمای برانگیختگی الکترون‌ها در گزارش‌های متعددی بوده ولی اندازه‌گیری و محاسبه دمای ماکروسکوپیک 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 الکترودها حدود ۷۰۰۰ 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 می‌گیرد، یعنی دمای گاز پلاسمایی و دمای برانگیختگی الکترونی پلاسما در شرایط آرمانی بایستی به تعادل حرارتی رسیده باشند؛ به عارت دیگر دمای ماکروسکوپیک یون‌ها یا گاز پلاسمایی در حد دمای برانگیختگی الکترونی بالا یا نزدیک به آن باشد.

بیناب به‌دست 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 یونیدگی میدانی و سپس آبشاری در فضای بین آند و الکترودهای میانی (سرلوله شناور که بین کاتد و آند قرار می‌گیرد) شکل می‌گیرد. سپس با فاصله زمانی کوتاهی متناسب با رسانش پلاسمای ایجاد شده، ولتاژ و جریان اصلی بین آند و کاتد برقرار می‌شود. در این حالت قوس الکتریکی با توان بالا با توجه به وجود پلاسمای اولیه و تقارن سرلوله و الکترودها 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 پارامترهایی هستند که مشخصه بینابی و دمایی شعله به آنها وابسته است و در طراحی آینده

بولتزمن، دمای برانگیختگی الکترونی محاسبه و با دمای ماکروسکوپی شعله مقایسه خواهد شد.

### ۳.۱. محاسبه دمای ماکروسکوپی شعله گاز پلاسمایی

تعیین دمای ماکروسکوپی 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 به‌ندرت به این موضوع پرداختند، با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیل علمی بیناب به‌دست آمده از پلازما به این موضوع پرداخته شده است. در این پژوهش، بیناب به‌دست آمده از گسیل نثری پلاسمای شعله با بیناب سنج ذکر شده در فاصله حدودی ۲۰ سانتی‌متر از شعله، مطابق شکل ۲ به‌دست آمده است. در اینجا از روش مدل ترازهای چرخشی مولکول‌های دو اتمی نیتروژن که تشکیل‌دهنده عمده مولکول‌های گازی هواست استفاده می‌شود. مولکول دو اتمی نیتروژن، پیرامون طول پیوند تعادلی مربوط به هر پیکربندی الکترونی ارتعاش می‌کند و همزمان پیرامون محور عمود بر محور پیوند می‌چرخد. بنابراین هر حالت الکترونی، شامل طیفی از ترازهای ارتعاشی با اعداد کوانتومی  $J = 0, 1, 2, \dots$  و هر تراز ارتعاشی، شامل ساختار دقیق ترازهای انرژی چرخشی با اعداد کوانتومی  $J = 0, 1, 2, \dots$  است. بنابراین گذارهای اتمی یا مولکولی مورد نظر در ترازهای ارتعاشی - چرخشی حالت بالاتر انرژی به حالت پایین‌تر با تابش فوتونی همراه است (شکل ۳).

شدت خطوط بینایی  $I_{em}$  در بیناب گسیلی متناسب با جمعیت  $N_{J'}$  حالت‌های الکترونی بالایی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

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

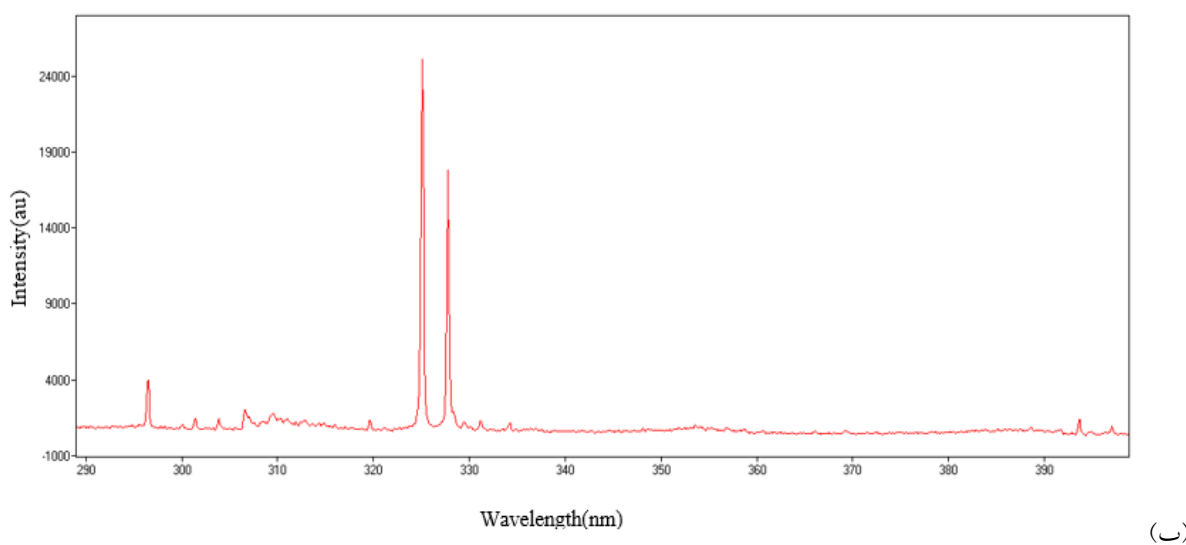
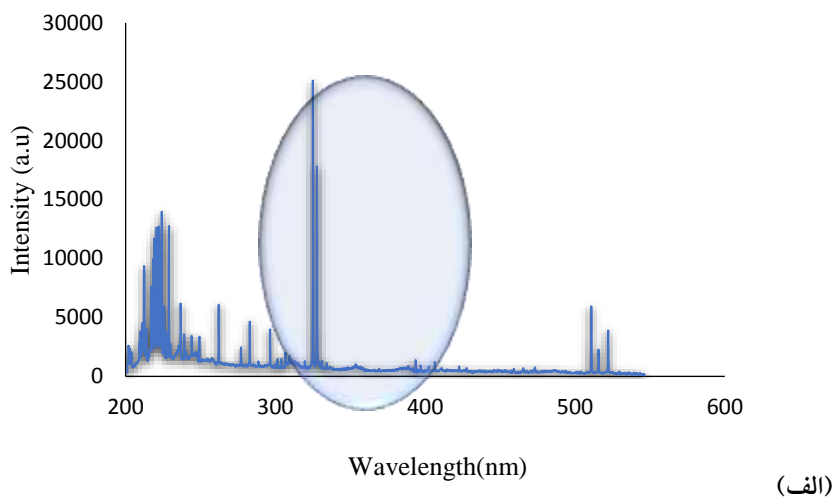
که در آن  $g_{J'}$  وزن آماری حالت‌های الکترونی بالایی و  $A_{J'J''}$  احتمال گذار است [۲۳]. اساساً ثابت چرخشی مولکول‌های نیتروژن، نه تنها برای حالت پایه  $X^1\Sigma_g^+$  بلکه برای حالت‌های برانگیخته  $C^2\Pi_u$  و  $B^3\Pi_g$  هم بسیار کوچک است. بنابراین ترازهای برانگیخته چرخشی می‌توانند اغلب انرژی جنبشی را با انرژی انتقالی حرکت مولکول‌های نیتروژن خنثی مبادله کنند. از این‌رو دمای چرخشی مولکول‌های نیتروژن سامانه مثبت دوم  $N_+(C-B)$  و سامانه منفی اول  $N_+(B-X)$  می‌تواند نماینده خوبی برای دمای ذرات سنگین پلازما باشد، یعنی

تعادل موضعی ترمودینامیکی تخمین زده می‌شود. این بدان معنی است که دمای یکسانی برای کل پلازما فرض نمی‌شود و برای هر نقطه از پلازما 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 فوتون‌های تابشی فرض می‌شود (تعادل پلانک - بولتزمن) [۱۸ و ۱۹].

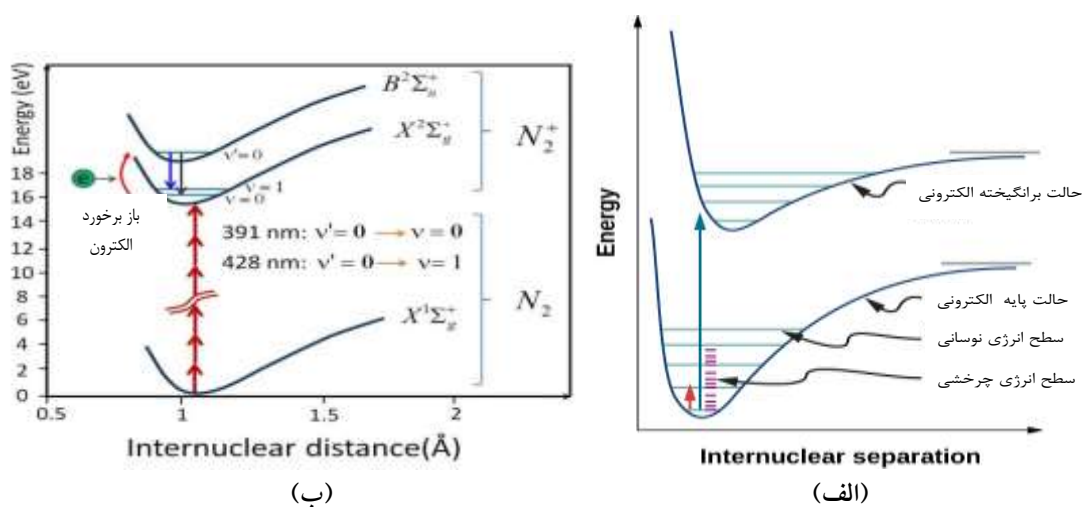
در این گونه پلازماها در شرایط آرمانی کارکرد مشعل، می‌توان گفت که تعادل دمای برانگیختگی الکترونی با دمای ماکروسکوپی شعله پلاسمایی (تعادل پلانک - بولتزمن) برقرار است. اما با دور شدن از شرایط آرمانی در این گونه مشعل‌ها با توجه به گزارش‌های بین‌المللی، دمای برانگیختگی الکترونی معمولاً از ۲۰۰۰ کلوین به بالا (بسته به شرایط مشعل) از دمای ماکروسکوپی شعله بیشتر است. اگر طراحی به گونه‌ای باشد که تعادل خوبی بین دمای ماکروسکوپی شعله و دمای الکترونی فراهم شده باشد، این دو دما به هم نزدیک‌تر خواهند بود و اصطلاحاً پلاسمای گرمایی یا حرارتی خوبی داریم. با استفاده از مدل مگنتوایدرویدینامیک و تعادل ترمودینامیکی، دمای شعله با بیناب‌نمایی از گسیل اتم‌های خنثای آرگون برای چنین مشعل‌هایی استفاده شده است [۲۰].

دمای ماکروسکوپی شعله یا گاز پلاسمایی را می‌توان با روش‌هایی اندازه‌گیری کرد که مستقیماً به حرکت انتقالی ذرات بستگی دارند مانند: پهن‌شدگی داپلر و یا روش‌های دیگر مرتبط با گاز از جمله دمای چرخشی و ارتعاشی به‌دست آمده از بیناب‌سنجی مولکولی، با این شرط که این مقادیر با دمای گاز در تعادل باشند. در حقیقت مولکول‌های گاز (در اینجا نیتروژن) بعد از یونش و برهمکنش‌های برخوردی با الکترون‌ها در حالت‌های برانگیختگی ترازهای چرخشی و ارتعاشی قرار گرفته و سپس فوتون‌هایی گسیل می‌کنند که انرژی آنها متناسب با انرژی فروافت ترازهای برانگیخته و با دمای شعله متناسب است [۱۸، ۲۱، ۲۲].

همچنین برای تعیین دمای برانگیختگی الکترون، نسبت به انرژی ترازهای الکترونی و وزن آماری و احتمال‌گذار آنها، دمای مورد نظر به‌دست می‌آید. در این بخش، با استفاده از نمودار فرتریت و روش رسم بولتزمن، دمای ماکروسکوپی شعله پلاسمایی محاسبه می‌شود. در بخش ۲.۳، نیز به روش متداول رسم



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



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

$$\begin{aligned} N_{\nu}(B, \nu) &\rightarrow N_{\nu}(A, \nu') + h\nu(\nu^+), \\ N_{\nu}(C, \nu) &\rightarrow N_{\nu}(B, \nu') + h\nu(\nu^+), \\ N_{\nu}^+(B, \nu) &\rightarrow N_{\nu}^+(X, \nu') + h\nu(\nu^-), \end{aligned} \quad (4)$$

همچنین مقدار ثابت چرخشی  $B'_\nu$ ، 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  $\nu' = 0$  متناظر با مبدأ تراز پایه، که صفر در نظر گرفته شده است [۳ و ۶]، به صورت زیر به دست 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.

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

با توجه به مقدار ثابت چرخشی  $B'_\nu = 2.063$  و مقادیر ثابت  $hc$  و  $k_B$  معادله (۳) را می توان به صورت زیر نوشت:

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

با استفاده از خطوط بینابی نیتروژن اتمی که درصد غالب مولکول های تشکیل دهنده هواس در بیناب شکل ۲، شدت  $I$  و طول موج  $\lambda$  در جدول داده های ۱ به دست 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 مبدأ (که هیچ خطی در آن مشاهده نمی شود) بیناب های چرخشی ارتعاشی مولکول دو اتمی، در طرف راست و چپ مبدأ قرار می گیرند. به هر سری از خطوط چرخشی یک شاخه نسبت داده می شود که نسبت به مقدار  $\Delta J$ ، با یک حرف نامگذاری می شود. بدین ترتیب خط مبدأ با گذار  $\Delta J = 0$  شاخه Q، خطوط سمت راست مبدأ با گذار  $\Delta J = 1$ ، شاخه R و خطوط سمت چپ مبدأ 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 [۲۳]. برای تجزیه و تحلیل بیناب، خطوط طیفی شاخه P، طبق قواعد گزینش  $\Delta J = -1$  انتخاب شدند. توجه داشته باشید که خطوط شاخه های P و R از نمودار

حرکت چرخشی گونه های مولکولی به عنوان مقدار تقریبی دمای شعله پلاسمایی در نظر گرفته می شود [۱۸، ۲۰ و ۲۳]. X نشانگر تراز پایه و B و C، نماد ترازهای تحریکی چرخشی هستند. منظور از سامانه 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].

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

$$E_{J'} = B'_\nu hc J'(J' + 1),$$

روش معمول تعیین دما در کل باند چرخشی با بازاری معادله بالا به صورت رابطه (۳) به دست می آید.

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

که در آن C یک ثابت (برای باند منفرد J فرد یا زوج در دمای ثابت)،  $J'$  و  $J''$  به ترتیب اعداد کوانتومی چرخشی تراز های بالا و پایین،  $B'_\nu$  ثابت چرخشی مولکول در تراز بالایی،  $h$  ثابت پلانک، c سرعت نور و  $k_B$  ثابت بولتزمن است و پارامتر  $\lambda$  نیز اضافه شده است [۳ و ۸]. اگر نمودار

$$\text{Ln} \left( \frac{I_{em} \lambda^4}{J' + J'' + 1} \right) \text{ نسبت به } J'(J' + 1) \text{ رسم شود، شیب خط حاصل برابر } - \frac{B'_\nu hc}{k_B T}$$

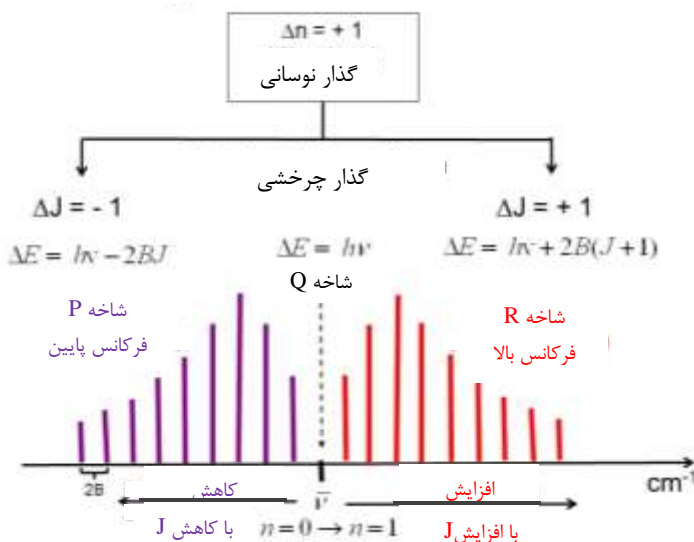
است و بدین ترتیب دمای چرخشی مولکول به دست می آید. اغلب از شبیه سازی باند چرخشی سامانه مثبت دوم با گذار  $N_{\nu}(C - B)$  برای تعیین دمای چرخشی استفاده می شود. همچنین اولین بلند مثبت  $N_{\nu}(B - A)$  نیز می تواند برای تعیین دمای چرخشی استفاده شود. البته مطالعات نشان می دهد این گذار برای دماهای بالا دقت پایینی دارد [۳]. بنابراین، باند سامانه منفی اول  $N_{\nu}^+(B - X)$  در محدوده طول موجی ۳۹۰ تا ۳۹۲ نانومتر برای تعیین دمای چرخشی انتخاب می شود.

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

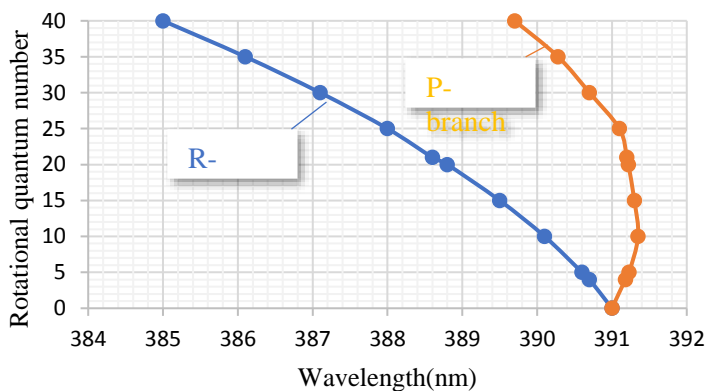
جدول ۱. داده‌های به‌دست آمده از خطوط بینایی و مقادیر ثابت از بانک داده‌های استاندارد NIST.

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

بیناب نوسانی- چرخشی در نمایش فرتریت



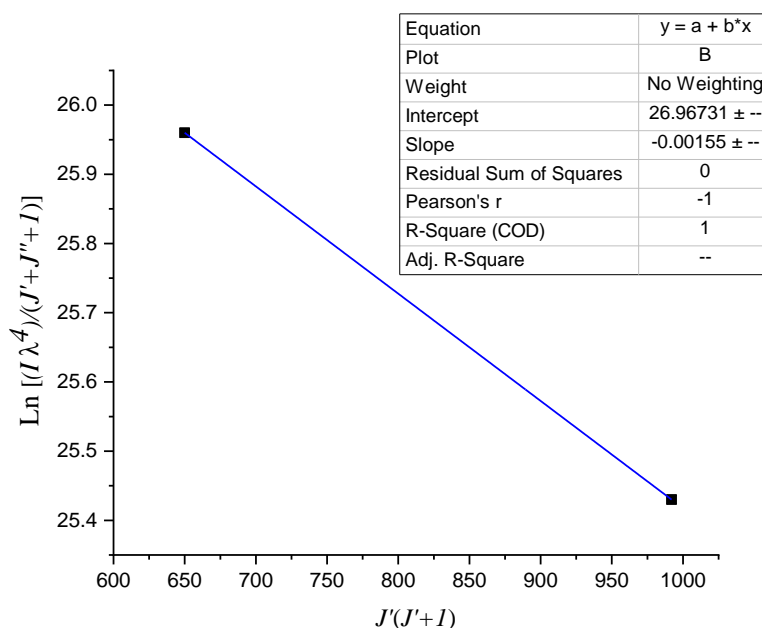
شکل ۴. گذارهای شاخه P و R در ترازهای چرخشی [۱۳].



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

داده‌های 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 می‌شود. با استفاده از رابطه (۵) و مقدار شیب خط به‌دست آمده از نمودار بولتزمن در شکل ۶، دمای شعله حدود ۱۹۲۴/۵ یا تقریباً ۲۰۰۰

فرتریت شکل ۵ به‌دست می‌آیند که از داده‌های 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



شکل ۶. خط برازش شده به داده‌های به‌دست آمده از جدول ۱.

نسبت و الگوی قله‌های تابش، تکرارپذیر خواهند بود و تغییر چندانی در محاسبه دما نخواهیم داشت. تنها اعمال زمان ثبت و ضبط بیناب از روی نرم‌افزار بیناب‌نماست که میزان شدت یا قله تابش به شکل اتفاقی ذخیره می‌شود.

دمای به‌دست آمده ۲۰۰۰ کلوین با در نظر گرفتن تقریب LTE و موضعی بودن دمای شعله در کمینه گستره دمایی بزرگ مقیاس شعله با گزارش‌های دیگر در شرایط مشابه است [۳ و ۶]. البته تغییرات دمایی با تقریب‌های اندازه‌گیری شده در بیناب‌نمایی، برای مشعل‌های حرارتی گاهی اجتناب‌ناپذیر است. چون با کوچک‌ترین تغییر در توان الکتریکی ورودی، فشار گاز، فاصله الکترودها و سرلوله شناور از یکدیگر و دیگر عوامل، بیناب به شکل قابل ملاحظه‌ای تغییر و بنابراین میزان تغییر در تخمین دمای شعله از مرتبه ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کلوین می‌تواند متغیر باشد، ولی نکته مهم از دمای به‌دست آمده، بیناب مربوط به شعله پایدار (حدود ده دقیقه) است.

همچنین دمای بزرگ مقیاس به‌دست آمده با دمای الکترونی در بخش ۲.۳ تا حدودی سازگاری دارد ولی مقدار ۲۰۰۰ کلوین در واقع کمترین دمای قابل قبول شعله در مقابل ۶۰۰۰ کلوین از دمای برانگیختگی الکترون‌ها در بخش بعدی خواهد بود. لازم به یادآوری است، قله شدت‌های مورد نظر با توجه به قدرت

کلوین (۱۷/۰ الکترون ولت) تخمین زده می‌شود. 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 دمایی قرار می‌گیرد ولی برای طرح اولیه و آزمایشی مشعل، مقدار قابل قبولی است. با دقت نرم افزار پردازش دستگاه بیناب‌نما حدود چهار یا پنج نقطه وجود داشت و در آن صورت دما تا ۴۰۰۰ کلوین تخمین زده می‌شد. اما چون مقدار دما موضعی است و دمای میانگین شعله طبعاً از آن کمتر است، مقدار دمای به‌دست آمده با دقت تفکیک نوری دستگاه (۲۰۰۰ کلوین) درست و منطقی است.

نکته قابل توجه در کار تجربی اندازه‌گیری بیناب در این است که الگوی قله‌های شدت بیناب به‌دست آمده در گستره طول موجی با توجه به پایداری شعله پلاسمایی تغییر نمی‌کند؛ اگرچه با توجه به شرایط محیطی (جذب در هوا و نوفه)، میزان شدت تابش رسیده به بیناب‌نما نوسان دارد. افزایش یا کاهش قله یا شدت تابش رسیده به بیناب‌نما، تأثیر چندانی روی الگو یا نسبت دامنه آنها و در نتیجه روی شیب خط یا دمای به‌دست 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 پلاسمایی پایدار فراهم کرد،



دمای الکترونی به صورت عکس شیب خط (m) محاسبه و مقدار آن در حدود ۶۴۰۰ کلون و معادل آن ۰/۵۲ الکترون ولت به دست می آید.

$$k_B T_{exc} = -\frac{1}{m} = ۶۳۹۶ K \approx ۰,۵۲ eV$$

این دما نیز در مرتبه منطقی و بالاتر از دمای شعله قرار دارد [۳]. در گزارش‌های آمده تا این محدوده دمایی، دمای برانگیختگی الکترون‌ها برای یک مشعل حرارتی با بهره و کارایی بالا معمولاً راه مناسب و دقیق‌تری در پژوهش علمی را برای طراحی مشعل حرارتی فراهم می‌کند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

از آنجا که تعیین دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمایی برای مشعل‌های پلاسمای حرارتی با روش بیناب‌نمایی در داخل کشور تاکنون به دست نیامده، در این پژوهش علمی با توجه به مراجع معدود بین‌المللی در این زمینه، مدل پایه روش محاسبه دمای ماکروسکوپیک شعله و دمای برانگیختگی الکترونی بر تا ۲۰۰۰ کلون بیشتر از دمای ماکروسکوپیک شعله گزارش شده است و از این رو نتایج به دست آمده در این دو بخش نقشه اساس بیناب‌نشی از پلاسمای با شرح جزئیات ارائه شده است. بر پایه داده‌های 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 کلون (۰,۱۷ eV) تخمین زده شد. این دما با گزارش‌های بین‌المللی در شرایط مشابه در کمینه مقداری گستره دمای ماکروسکوپیک شعله قرار می‌گیرد. البته همان‌گونه که در بالا گفته شد این یک دمای موضعی از پلاسماست و در مقاله‌ای جداگانه از همین نویسنده مسئول با رهیافت ترمودینامیکی، دمای قوس الکتریکی مولد شعله پلاسمایی ۷۰۰۰ کلون به دست آمده [۱۶] و این بهره دمایی پایین مشعل را نشان می‌دهد. با توجه به دمای برانگیختگی الکترونی در اینجا،

تفکیک‌پذیری نوری بیناب‌نما، اندازه‌گیری شده است. نتایج گواه بر این است که مشعل از نظر تبادل دمایی یون‌ها با الکترون‌ها و داشتن یک پلاسمای برخوردی و رسیدن به شرایط یک مشعل حرارتی با بهره بالا، هنوز فاصله دارد. گفتنی است، با پیش‌بینی و تخمینی که در مقاله دیگر با رهیافت ترمودینامیکی از همین نویسنده مسئول داریم، این دما نسبت به دمای قوس الکتریکی داخل سرلوله و الکترودها (۷۰۰۰ کلون)، کاهش بیش از ۵۰٪ داشته است [۱۶]. هدف از به دست آوردن دمای شعله در این بخش همانا تخمین بهره یا کارایی مشعل بود که با این توصیف می‌توان 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.

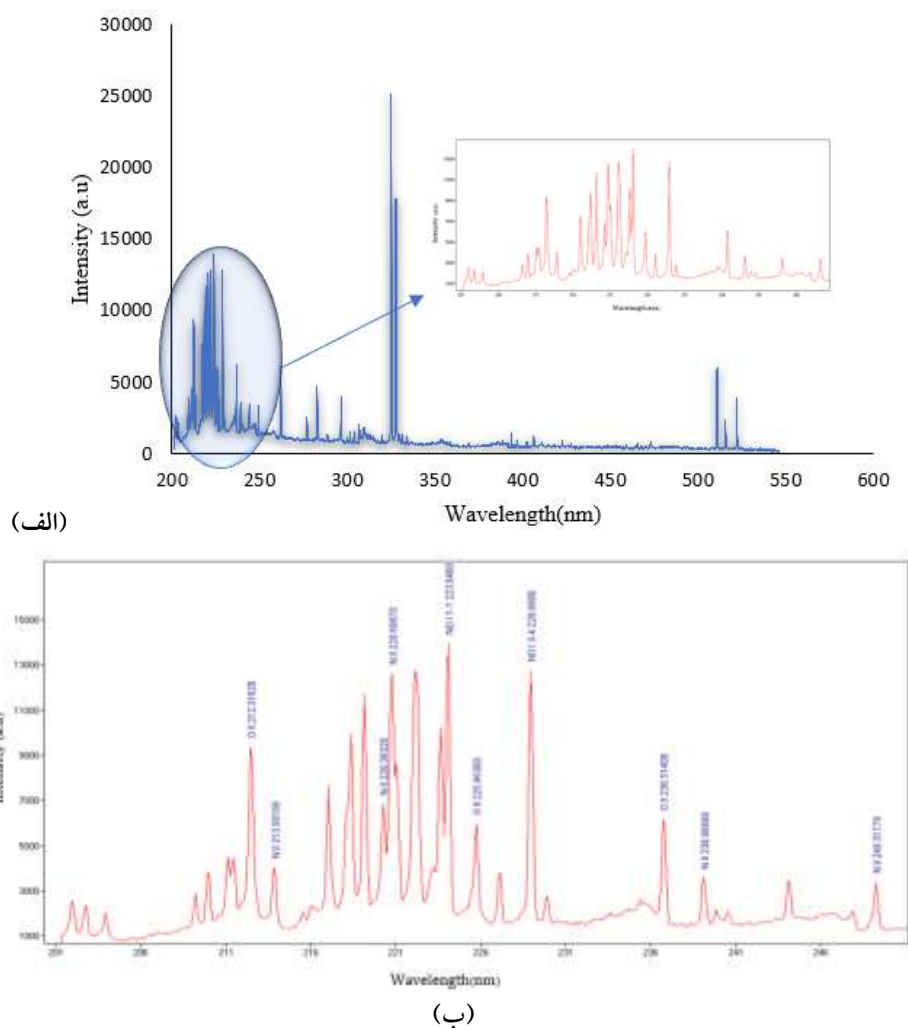
همان‌گونه که در مقدمه آمد و به مراجع مربوطه اشاره شد، با همین روش (نمودار فرتریت)، دمای ماکروسکوپیک شعله پلاسمای سرد نیز با دقت خوبی محاسبه شده است و دقت و درستی این روش و رهیافت را تأیید می‌کند [۵ و ۶].

#### ۳. محاسبه دمای برانگیختگی الکترون‌ها

دمای برانگیختگی الکترونی در واقع دمای تحریک ترازهای الکترونی با فرض برقراری تابع توزیع ماکسولی برای نمونه‌های برانگیخته در محیط پلاسماست. برای محاسبه دمای برانگیختگی الکترونی از محدوده طول موجی ۲۰۰ تا ۲۵۰ نانومتر استفاده می‌کنیم. نمودار بولتزمن در این بخش از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱ و ۲۴-۲۶].

$$\ln \left( \frac{I \lambda_{ki}}{A_{ki} g_k} \right) = -\frac{E_k}{k_B T_{exc}} + \ln C \quad (۶)$$

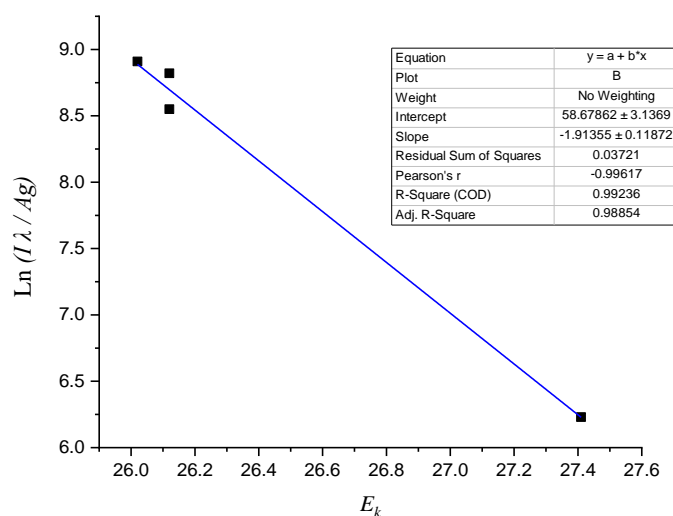
که  $I$  شدت بیناب و  $\lambda_{ki}$  طول موج گذار از تراز  $k$  (بالا) به تراز  $i$  (پایین) در بازه طول موجی مربوط به برانگیختگی ترازهای الکترونی است و هر دوی آنها از شکل ۷ حاصل شده است.  $E_k$  انرژی برانگیختگی تراز بالایی،  $g_k$  وزن آماری (تبهگنی) تراز بالایی و  $A_{ki}$  احتمال گذار از تراز بالا به پایین از بانک داده‌های NIST استخراج می‌شود. مشابه با روش بخش قبل، با به کار بردن معادله (۶) و برازش خط مربوطه مطابق شکل ۸،



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

جدول ۲. داده‌های به‌دست آمده از بیناب گسیلی و بانک داده‌های استاندارد NIST.

$\lambda$ (nm)	$I$	$Ag(10^5s^{-1})$	$E_k$ (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 داده‌های به دست آمده از جدول ۲.

انسانی علمی و مؤثر را برای طرح‌های آتی و مرتبط با طرح‌های قبلی فراهم کنند. همچنین در خصوص لزوم مشخصه‌سنجی از پلازما و طراحی دقیق در ساخت مشعل حرارتی مناسب در راستای طرح زیاله سوز یا دیگر اهداف، چه در سطح مدیریتی و چه در سطح همکاری، مشاوره و اجرا در طرح‌های درون و برون پژوهشگاهی، شایسته و بایسته است تا نیروهای متخصص و با تجربه در طرح‌ها سهیم باشند و این از بدیهی‌ترین وظایف مسئولین پژوهشی پژوهشگاه است. همچنان که می‌دانیم، تسهیم نیروهای انسانی مؤثر در یک پژوهش علمی، از دیدگاه اخلاق علمی نیز بسیار مهم و از الزامات کار به شمار می‌آید.

### 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 مشعل‌های حرارتی از نوع ICP، تشکر ویژه دارم. همچنین از آقایان دکتر داود ایرجی (ریاست محترم پژوهشگاه پلازما و گداخت هسته‌ای) و دکتر چاپار رسولی (مدیر محترم گروه پژوهشی محصورسازی مغناطیسی) برای راهنمایی و حمایت مسئولانه سپاس‌گزاری می‌کنم.

می‌توان 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، سرلوله شناور و دیگر پارامترهای ورودی به مشعل این نکات در مرجع [۱۷] باید با محاسبه دقیق، اصلاح شوند تا دمای بزرگ مقیاس شعله پلاسمایی نزدیک به دمای برانگیختگی الکترونی و تا حدود ۲۰۰۰ کلوین کمتر از آن قرار گیرد.

همچنین دمای برانگیختگی الکترونی محک‌سنجی برای دقت اندازه‌گیری دمای ماکروسکوپیک شعله خواهد بود. کارکرد مؤثر و بهره‌دهایی مشعل حرارتی نیز بدین ترتیب برآورد می‌شود. بر پایه نمودار بولتزمن، دمای برانگیختگی الکترونی نیز حدود ۶۴۰۰ درجه کلوین ( $0.5eV$ ) به دست آمد. این محاسبات و تحلیل‌ها، مبنای یک کار پژوهشی برای بهینه‌سازی طراحی مشعل حرارتی و کاربرد آن در یک سامانه زیاله سوز مورد نظر بوده است.

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

از مسئولین پژوهشی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انتظار می‌رود، زمینه مشارکت علمی و پژوهشی حداکثری نیروهای

## مراجع

1. B B Sahu, S B Jin, and J G Han, *J. Anal. At. Spectrom.* **32**, 4 (2017) 782.
2. Bruggeman and C Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 5 (2009) 053001.
3. J Mrotzek and W Viöl, *Appl. Sci.* **12**, 13 (2022) 6814.
4. Z Machala, et al., *J. Mol. Spectrosc.* **243**, 2 (2007) 194.
5. N Morshedian, et al, *AIP Advances* **13** (2023) 115217.
6. R Badrli and N Morshedian, *Iranian annual physics conference*, <https://www.psi.ir/farsi.asp?page=physics1402>.
7. S Sintsov, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 30 (2020) 305203.
8. C J Chen and S Z Li, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 3 (2015) 035017.
9. V Goyal, et al., *Phys. Plasmas* **24**, 3 (2017) 033506.
10. N Tiwari, S Bhandari, and S Ghorui, *Phys. Plasmas* **25**, 7 (2018) 072103.
11. Z Guo, et al., *Int. J. Heat Mass Tran.* **80** (2015) 644.
12. A K Das, K P Sreekumar, and N Venkatramani, *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 1 (1994) 108.
13. D Bernardi, et al., *Eur. Phys. J. D.* **22**, 1 (2003) 119.
14. D Bernardi, et al., *Eur. Phys. J. D.* **28**, 3 (2004) 423.
15. S M Tabatabaei, J Yazdanpanah, and A R Hefzosehhe, *J. Nucl. Sci. Technol.* (2023) (persian).
16. N Morshedian and N Beigmohammadi, *Irana. J. Appl. Phys.* **14**, 36 (2023) 104.
17. Gh Khaleghian, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **45**, 1, 107 (2024) 80.
18. W L Wiese, *Spectrochim. Acta B* **46**, 831(1991) 675.
19. B L Caughlin and M W Blades, *Spectrochim. Acta B*, **39B**, 12 (1984) 1583.
20. D A Scott, P Kovitya, and G N Haddad, *J. Appl. Phys.* **66**, 11 (1989) 5232.
21. B Bayram and M Freamat, *AAPT, Conference Proceedings*, (2015) 8.
22. S D Popa, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29**, 2 (1996) 411.
23. P J. C. a. and V Milosavljevic, *PTEP, Phys. Soc. Jap.* **2015**, 6 (2015) 063J01.
24. Y Wang, et al., *Optik* **164** (2018) 165.
25. B Seesahai, "*Plasma Temperature Measurements in the Context of Spectral Interference* ", University of Central Florida, *UCF Theses and Dissertations*, 2016.
26. A Falahat, et al., *Pramana J. phys.* **90** (2018) 27.