

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Archive of SID



عنوان طرح: بهینه سازی چشمه پرتو یون پهن  
برای لایه نشانی به کمک پرتو یون

کد طرح: ۵۵-۲۱۵۴

واحد سازمانی مجری: سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

گروه پژوهشی: فناوری خلأ

مسئول اجرای طرح:

علی اصغر زواریان - مریم صالحی

ماه و سال اختتام طرح:

دی ماه ۱۳۹۵

مشخصات مسئول و همکاران طرح مطابق پرسشنامه مصوب:

ردیف	نام و نام خانوادگی	مسئولیت در طرح	تخصص	رتبه	جمع کل نفر ساعت همکاری در طرح
۱	علی اصغر زواریان	پژوهش، آزمایش	اتمی - مولکولی	مربی	۲۶۴۰
۲	مریم صالحی	پژوهش، طراحی، کنترل پروژه، آزمایش	فوتونیک	کارشناس	۲۶۴۰
۳	مصطفی سلحشور	مشاوره و آزمایش	پلازما	کارشناس	۶۸۰
۴	سید محمد جمال قطبی	پژوهش، شبیه سازی چشمه پلازما، پیگیری خرید و ساخت، آزمایش	حالت جامد	کارشناس	۵۲۰
۵	کوروس حمزه	مشاوره	حالت جامد	استادیار	۱۵۶

تقدیر و تشکر:

با سپاس به درگاه خداوند متعال که اینجانبان مسئولان این طرح را در راهبری و پیشبرد آن هدایت فرمود، بدینوسیله ابتدا از معاونت پژوهش و فناوری جهاد دانشگاهی که بودجه طرح را در اختیار این گروه پژوهشی قرار داد سپاسگزاری می‌نماید. همچنین از داوران و ارزیابان محترم که با راهنمایی‌های خود موجبات بهبود طرح و ارتقای کار را فراهم نمودند و از همکاران طرح، بخصوص مدیریت گروه پژوهشی سرکار خانم مهندس حافظی و تمامی دست اندرکارانی که به هر نحو در تکمیل و پیشرفت این طرح پژوهشی موثر بوده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در اینجا از برادر گرامی جناب آقای دکتر مصطفی سلحشور که بدون هیچگونه چشم‌داشتی، فراتر از وظایف محوله در طرح اقدام نموده و تنگناهای کلیدی را برطرف نمودند و نیز جناب آقای سید محمد جمال قطبی که در کلیه آزمایش‌ها، پای ثابت کار بودند بطور ویژه نهایت تشکر و قدردانی ابراز می‌گردد. در انتها برای همگان از درگاه خداوند آرزوی سلامت و توفیق خدمت به نظام مقدس جمهوری اسلامی ایران را داریم.

**چکیده:** این گزارش مشتمل بر شرح فعالیت‌های انجام شده در سه مرحله بهینه‌سازی چشمه پرتو یون پهن با عنوان "بهینه‌سازی چشمه پلاسما"، "بهینه‌سازی سامانه استخراج" و "سایر بهینه‌سازی‌ها و آزمون‌های نهائی" است. در مرحله اول اجزای مختلف چشمه پلاسما شامل کاتد، آند، مگنترون و خنک‌سازی به‌سازی می‌گردند. در بخش سامانه‌استخراج، توری‌ها از نظر ابعاد و اتصالات و تعداد و... مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند و در سومین بخش، سامانه خنثی‌ساز و بدنه و اجزای مربوط مانند پایه‌ها، اتصالات ورود گاز و غیره بررسی و طراحی می‌گردند. در پایان نیز یک نمونه لایه اپتیکی با و بدون استفاده از چشمه یون ساخته‌شده، ایجاد و ضریب عبور نوری آن در طول موج‌های مرئی مقایسه می‌گردد.

**هدف:** بهینه‌سازی یک چشمه یون پهن جریان مستقیم با عملکرد پایدار در سطح آزمایشگاهی با انرژی بیشینه ۲۰۰ الکترون ولت و جریان ۵۰ میلی‌آمپر

**روش:** در این طرح از روش‌های مطالعه کتابخانه‌ای، شبیه‌سازی، تجربی و مهندسی معکوس برای پژوهش استفاده می‌شود. شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از تکنیک اجزای محدود بوسیله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و بر اساس نتایج بررسی نظری اصول و عملکرد چشمه یون انجام می‌گیرد.

**نتایج:** چشمه یون پهن جریان مستقیم با عملکرد پایدار در سطح آزمایشگاهی با انرژی بیشینه ۳۰۰ الکترون ولت و جریان بیشینه ۷۶ میلی-

آمپر با قطر پرتو ۶ سانتی‌متر در پنجره خروجی و زاویه واگرائی ۷/۴ درجه و سامانه استخراج ۳ توری و خنثی‌ساز خطی

**کلیدواژگان:** پرتو یون پهن، چشمه پلاسما، سامانه استخراج، خنثی‌ساز



## شناسنامه گزارش

عنوان فارسی: بهینه سازی چشمه پرتو یون پهن (آزمایشگاهی پایدار) برای لایه نشانی به کمک پرتو یون

عنوان انگلیسی: Broad Beam Ion Source Optimization for Ion Beam Assisted Deposition

کد سند: AM VT IBAD 2154 Rep.1.7 950809 AZ MS MaS

ملحقات: ۱ عدد لوح فشرده گزارش

شماره بازنگری: ۱

شماره ویرایش: ۵

سطح دسترسی به سند: محدود (این گزارش محرمانه تلقی شده و فقط اعضای پروژه دسترسی آزاد به این

گزارش داشته و دسترسی سایرین و تکثیر با موافقت کتبی مدیر طرح مجاز خواهد بود)

حمایت کننده مالی: جهاد دانشگاهی

مجری: گروه پژوهشی فناوری خلأ، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

نگارنده: علی اصغر زواریان، مریم صالحی، مصطفی سلحشور

ویراستار علمی: علی اصغر زواریان

ویراستار شکلی: مریم صالحی

تعداد برگها: ۷۹

آدرس: تهران، خیابان آزادی، بلوار شهید اکبری، خیابان شهید قاسمی، شماره ۷۱، جهاد دانشگاهی صنعتی

شریف، گروه پژوهشی فناوری خلأ

تلفن: ۶۶۰۷۵۶۲۱

نمابر: ۶۶۰۷۵۲۵۰-۶۶۰۱۲۴۹۷

پست الکترونیک: [vactec@jdsharif.ac.ir](mailto:vactec@jdsharif.ac.ir)

## فهرست مطالب

۸	افصل اول: کلیات اصول و عملکرد.....
۹	۱.۱. مقدمه.....
۹	۱.۲. کلیات ساختار چشمه پرتوی پهن یون.....
۱۰	۱.۲.۱. چشمه پلاσμα.....
۱۱	۱.۲.۲. سامانه استخراج.....
۱۲	۱.۲.۳. سامانه خنثی سازی بارفضا.....
۱۵	۲. فصل دوم: منابع و مبانی نظری.....
۱۶	۲.۱. پیشینه پژوهش.....
۱۸	۲.۲. کاستیهای طرح پیشین.....
۲۰	۲.۳. فرآیند بهینه سازی.....
۲۰	۲.۳.۱. بهینه سازی چشمه پلاσμα.....
۲۳	۲.۳.۲. بهینه سازی سامانه استخراج.....
۲۳	۲.۳.۳. بکارگیری و بهینه سازی سامانه خنثی ساز.....
۲۴	۳. فصل سوم: فرآیند پژوهش.....
۲۵	۳.۱. مقدمه.....
۲۵	۳.۲. بهینه سازی چشمه پلاσμα.....
۲۵	۳.۲.۱. رشته کاتد.....
۲۶	۳.۲.۲. میدان مغناطیسی.....
۳۱	۳.۲.۳. آند.....
۳۳	۳.۳. توزیع گاز آرگون.....
۳۳	۳.۴. منابع تغذیه.....
۳۴	۳.۵. سامانه استخراج.....
۳۵	۳.۵.۱. مفاهیم کاربردی.....
۳۸	۳.۵.۲. عوامل موثر در طراحی سامانه استخراج.....
۴۰	۳.۶. شبیه سازی.....
۴۰	۳.۶.۱. معرفی نرم افزار.....
۴۳	۳.۶.۲. مدل اولیه.....



۴۶	۳.۶.۳. نتایج مدل اولیه .....
۵۱	۳.۷. طراحی و ساخت سامانه استخراج.....
۵۱	۳.۷.۱. توریها:.....
۵۲	۳.۷.۲. نصب.....
۵۳	۳.۸. خشتی کننده بارفضا.....
۵۳	۳.۸.۱. طراحی خشتی ساز.....
۵۵	۳.۹. ساخت و نصب.....
۵۵	۳.۹.۱. چشمه پلاسما.....
۵۸	۳.۹.۲. سامانه استخراج.....
۶۱	۳.۹.۳. نصب سامانه استخراج و ختیساز.....
۶۴	۴. فصل چهارم: نتایج آزمونها.....
۶۵	۴.۱. مقدمه:.....
۶۵	۴.۲. آزمون های عملکرد.....
۶۵	۴.۲.۱. آزمون عملکرد چشمه پلاسما.....
۶۶	۴.۲.۲. آزمون عملکرد ختیساز.....
۶۹	۴.۲.۳. آزمایش واگرایی.....
۷۳	۴.۳. آزمون تأثیر تابش پرتوی یون بر لایه نشانی.....
۷۳	۴.۳.۱. آزمون لایه نشانی.....
۷۴	۴.۳.۲. بررسی تغییر خواص اپتیکی لایه تحت تابش پرتوی یون.....
۷۹	۵. فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری.....
۸۰	۵.۱. نتیجه گیری پایانی:.....
۸۱	۵.۲. پیشنهادها:.....
۸۳	۶. منابع:.....



## پیشگفتار

بومی سازی فناوری های مرتبط با خلأ بالا، مأموریت اصلی گروه پژوهشی فناوری خلأ بوده و در این راستا تاکنون فعالیت های تحقیقاتی متعددی را به انجام رسانده است. با توسعه روزافزون فناوری و رشد نیازهای کشور، ضروری است توانمندی های موجود ارتقاء یابد به نحوی که کیفیت محصولات و خدمات از استاندارد بین المللی برخوردار شده و قدرت رقابت با محصولات وارداتی را داشته باشد.

استفاده از چشمه یون در فعالیت های پژوهشی، فناوری و صنعت کاربرد زیادی دارد که عبارتند از: آماده سازی و تمیزکاری زیرآیند، لایه نشانی کندوپاش توسط پرتو یون، لایه نشانی مستقیم پرتو یون، لایه نشانی به کمک پرتو یون<sup>۱</sup>، کاشت یون<sup>۲</sup>، سونش توسط پرتو یون<sup>۳</sup> و غیره. مزیت اصلی استفاده از پرتو یون نسبت به روش های دیگر، توانایی کنترل آسان پارامترهای پرتو یون (چگالی جریان یون و انرژی یون) است. همچنین پهنای توزیع انرژی یون محدود بوده و حالت بار یون و راستای فرود آن مشخص و قابل کنترل است. علاوه بر این، تولید یون از فرآیندهای مربوط به هدف یا زیرلایه مستقل است. بنابراین از یک سو امکان کنترل مستقل پارامترها فراهم می شود و از سوی دیگر مشکلات عملکردی مربوط به سامانه ها کاهش می یابد.

طرح پژوهشی "بهینه سازی چشمه پرتو یون (آزمایشگاهی پایدار) برای لایه نشانی به کمک پرتو یون" با کد ۲۱۵۴-۵۵ در تاریخ ۱۳۹۲/۹/۳۰ توسط شورای بررسی نهائی طرح های دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی با مسئولیت آقای علی اصغر زواریان و خانم مریم صالحی به تصویب رسیده است. این طرح ادامه طرح پیشین با عنوان "طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی چشمه پرتو یون پهن" (کد ۱۹۰۶) بوده و از دانش فنی و تجربیات بدست آمده از آن بهره گرفته شده است.

این گزارش مشتمل بر شرح فعالیت های انجام شده در ۳ مرحله بهینه سازی چشمه پرتو یون پهن با عناوین "بهینه سازی چشمه پلاسما"، "بهینه سازی سامانه استخراج" و "سایر بهینه سازی ها و آزمون های نهائی" است.

گروه پژوهشی فناوری خلأ

تابستان ۱۳۹۵

<sup>1</sup> - Ion Beam Assisted Deposition

<sup>2</sup> - Ion Implantation

<sup>3</sup> - Ion Beam Etching



۱. فصل اول: کلیات اصول و عملکرد

Archive of SID



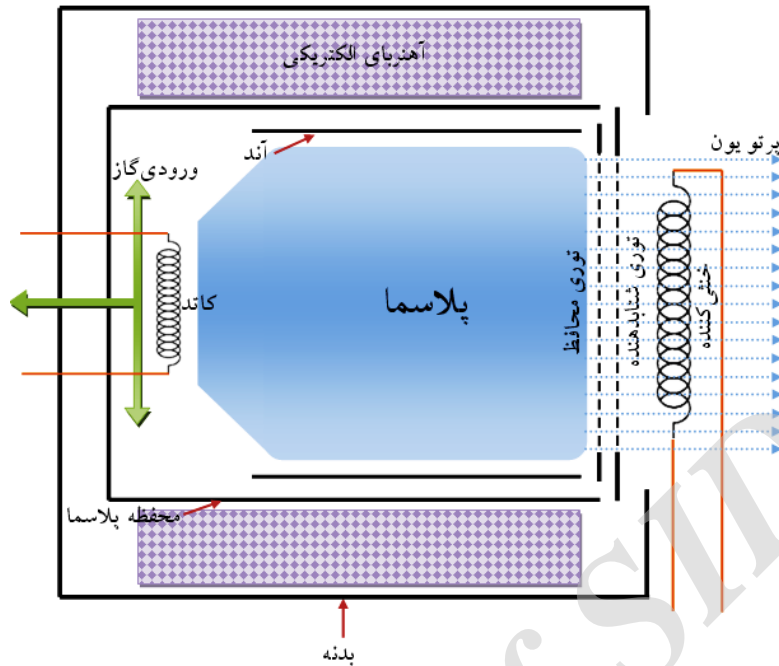
## ۱.۱. مقدمه

در طرح قبلی (۱۹۰۶) تعریف و مبانی نظری و اصول عملکرد چشمه پرتوی پهن یون به تفصیل بیان گردید. در این طرح نیز به اجمال به اهم آن اشاره خواهد شد. در این بخش، به اختصار ساختار کلی چشمه پرتوی پهن یون توضیح داده خواهد شد. استفاده از چشمه‌های پرتوی پهن یون از نیمه دوم دهه ۱۹۵۰ میلادی، زمانی که برنامه‌های پیش‌رانش فضایی، در چند کشور شروع شده بود آغاز گردید [۱،۲]. رشد سریع فناوری اصلاح سطوح توسط پرتوهای یون از آغاز دهه ۱۹۷۰، نتیجه مزایای مهم چشمه‌های یون در مقایسه با روش‌های رایج دیگر بود. این مزایا عبارتند از:

- کنترل مستقل چگالی و انرژی یون
  - کنترل راستای فرود یون نسبت به سطح هدف یا زیرآیند
  - کنترل نوع یون (جرم و بار یون)
  - جدا بودن فرآیند تولید یون از فرآیند مربوط به هدف یا زیرآیند
- طرح حاضر در واقع بهینه سازی طرح ۱۹۰۶ با هدف استفاده از این زیرسامانه در کمک به فرآیند لایه نشانی می باشد. در این بخش، ساختار کلی و عملکرد چشمه یون پهن توضیح داده خواهد شد.

## ۱.۲. کلیات ساختار چشمه پرتوی پهن یون

چشمه پرتوی یون پهن کافمن از سه زیرمجموعه اصلی تشکیل شده است: چشمه پلازما که مسئولیت ایجاد پلازما را بر عهده دارد، سامانه استخراج که برای بیرون کشیدن یون‌ها از محیط پلازما است و سامانه خنثی ساز که برای خنثی کردن الکتریکی پرتو یون بکار می‌رود.



شکل ۱-۱: طرحواره چشمه یون

### ۱.۲.۱. چشمه پلازما

چشمه پلازما از قطعات و اجزای مختلفی تشکیل شده است. برخی از مهم ترین آنها عبارتند از:

- محفظه پلازما
- آند
- کاتد
- آهنربای الکتریکی
- قطعات عایق بندی الکتریکی
- اجزای ساختاری مانند انواع پیچ و مهره ها

محفظه پلازما جایی است که کاتد و آند درون آن قرار دارند. یک منبع تغذیه DC پتانسیل الکتریکی لازم برای تخلیه الکتریکی بین کاتد و آند را در محیط پلازما تأمین می نماید. آند به شکل یک استوانه توخالی و از جنس استیل ضدزنگ است. کاتد یک رشته تنگستن است که با عبور جریان (اغلب AC) از آن گرم شده و به عنوان یک چشمه الکترون عمل می کند.

به منظور جلوگیری از، از بین رفتن پلازما ناشی از تماس آن با دیواره های مجاور، محبوس سازی محوری و شعاعی پلازما توسط یک میدان مغناطیسی یک امر ضروری است. محبوس سازی محوری پلازما، اغلب توسط یک مجموعه آهنربا که حول محفظه پلازما قرار می گیرد انجام می پذیرد. به منظور کنترل میدان مغناطیسی جهت تنظیم چگالی پلازما و یکنواختی آن، از آهنربای الکتریکی برای محبوس سازی محوری پلازما استفاده می شود. محبوس سازی شعاعی پلازما نیز معمولاً توسط یک مجموعه از آهنرباهای دائمی

انجام می‌شود. در هر دو روش آهنرباها طوری قرار می‌گیرند که راستای قطبش آنها به ترتیب برعکس می‌شود بطوری که با جلوگیری از رسیدن ذرات باردار پلاسما به سطح آند، مانع از بین رفتن آنها می‌شوند. این پیکربندی مغناطیسی چندحالی و یا چندقطبی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. ضرورت محبوس‌سازی شعاعی پلاسما، برای چشمه‌های یون با ابعاد بزرگ (بیش از ۱۰ سانتیمتر) مطرح است.

آهنرباها در درون محفظه پلاسما و به سمت پنجره خروجی آن، یک میدان مغناطیسی محوری واگرا ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود اولاً به علت واگرایی خطوط میدان به سمت توری، پلاسما نیز به همان سمت سوق داده شود و ثانیاً با افزایش طول مسیر پویش آزاد الکترون‌ها به علت حرکت دورانی آنها حول خطوط میدان مغناطیسی (با بسامد و شعاع لارمور)، بازدهی یونش گاز افزایش می‌یابد.

به منظور جلوگیری از انتقال حرارت ناشی از پلاسما به قطعات مجاور محفظه آن و به زیرمجموعه‌های دیگر مانند توری‌ها، استفاده از یک آبگرد ضروری است. در اثر انبساط حرارتی توری‌ها، همراهی روزنه‌ها از بین می‌رود و این باعث انحراف پرتو یون و برخورد آن به لبه‌های توری و در نهایت موجب خرابی آن می‌شود.

## ۱.۲.۲. سامانه استخراج

این سامانه، از نظر لزوم دقت در طراحی و ساخت، حساس‌ترین زیرمجموعه چشمه یون است. این سامانه از اجزای مختلفی تشکیل شده و برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از:

توری محافظ<sup>۲</sup>

توری شتاب‌دهنده<sup>۳</sup>

قطعات عایق‌بندی الکتریکی

اجزای ساختاری مانند انواع پیچ و مهره‌ها

اجزای نگهدارنده و تنظیم‌کننده مانند انواع پین‌ها

توری‌ها ورق‌های فلزی دایروی نازک با قطر چند سانتیمتر تا چند سانتیمتر و با ضخامت کمتر از ۲ میلی‌متر هستند که تعداد زیادی روزنه کوچک (با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر) در آنها تعبیه شده است. توری محافظ در تماس با پلاسما و در پتانسیل کاتد قرار می‌گیرد. توری شتاب‌دهنده در مجاورت توری محافظ (با فاصله کمتر از ۳ میلی‌متر) طوری قرار می‌گیرد که روزنه‌های دو توری دقیقاً روبروی هم باشند. این توری که به منظور افزایش انرژی یون‌های خارج‌شده از توری اول (توری محافظ)، بکار می‌رود با یک منبع DC دیگر (پایانه منفی) تغذیه می‌شود. توری سوم توری کاهنده نام دارد و برای استخراج یون‌ها در انرژی‌های کم و جریان بالا استفاده می‌شود و می‌تواند بدون هیچ منبع تغذیه‌ای وظیفه خود را انجام دهد. به منظور تأثیر ناپذیری پرتو یون از میدان الکتریکی بین توری و هدف (ناشی از اختلاف پتانسیل بین توری شتاب‌دهنده با ولتاژ منفی و هدف زمین‌شده) نیز معمولاً از سامانه سه‌توری استفاده می‌شود که توری سوم را در پتانسیل زمین

<sup>۱</sup> - Multicusp

<sup>۲</sup> - Screen Grid

<sup>۳</sup> - Accelerator Grid

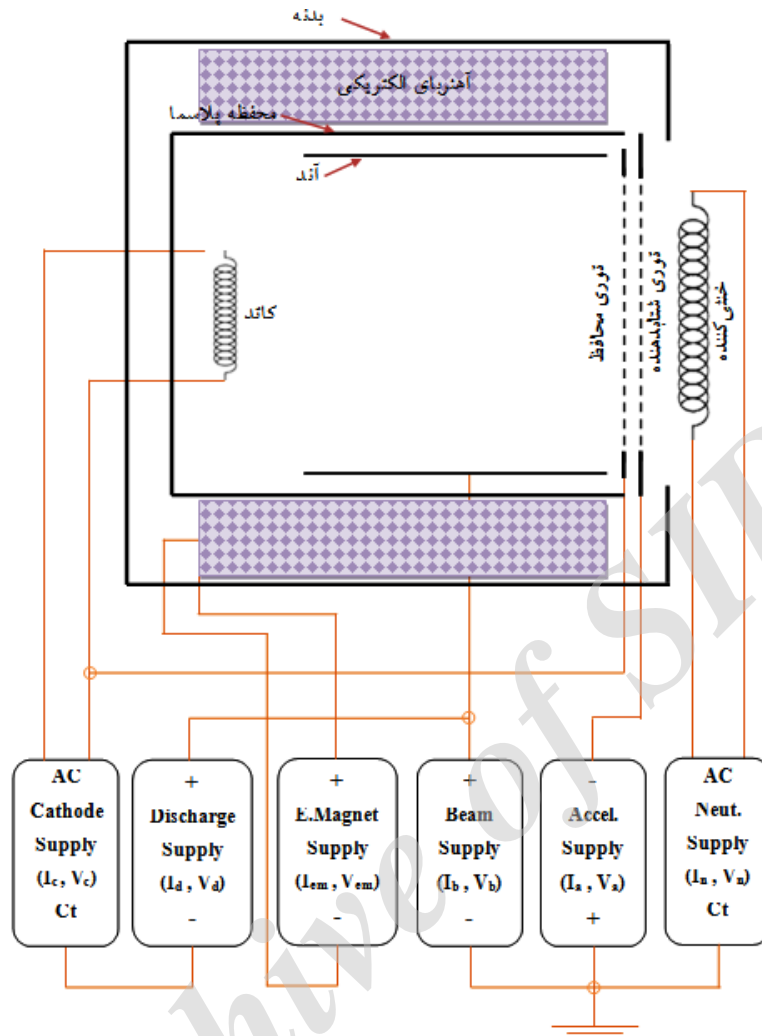


قرار می دهند تا پتانسیل پرتو یون خروجی صفر شود. میدان مغناطیسی ناشی از مگنترون چشمه پلاسما، در محیط بین توری و هدف ناچیز بوده و بر مسیر پرتو یون تأثیری ندارد. از اجزای نگهدارنده برای تثبیت توری-ها و تنظیم موقعیت آنها استفاده می شود.

### ۱.۲.۳. سامانه خنثی سازی بارفضا

خنثی کننده بارفضا یک کاتد مشابه با کاتد چشمه پلاسما است که به یک منبع تغذیه مستقل متصل است. نقش این کاتد تولید الکترون و تزریق آن به پرتو یون خروجی است تا پرتو در کل از لحاظ بار الکتریکی خنثی شود. در این فرآیند یون ها خنثی نمی شوند بلکه به اندازه تعداد یون موجود در پرتو خروجی، الکترون به درون پرتو تزریق می شود. در غیر اینصورت یون ها به علت پدیده بارفضا (حضور بارهای همنام در یک ناحیه) همدیگر را دفع می کنند و پرتو واگرا خواهد شد. ضرورت استفاده از خنثی کننده بارفضا زمانی بیشتر می شود که جنس ماده هدف عایق باشد. چون تجمع بار مثبت در محل هدف و در نتیجه انحراف پرتو یون و واگرایی آن مطرح می شود.

برای هر یک از زیرمجموعه های چشمه یون منابع تغذیه مستقلی لازم است (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: طرحواره یک چشمه یون پهن و اتصالات منابع تغذیه آن

با اعمال ولتاژ به دو سر کاتد و داغ شدن رشته، الکترون‌های لازم برای یونش آنها و مولکول‌های گاز فراهم می‌شود. اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین آند و کاتد که توسط منبع تغذیه تخلیه الکتریکی اعمال می‌شود، باعث شارش الکترون‌های تولیدشده، به سمت آند می‌شود. پایانه مثبت این منبع تغذیه به آند و پایانه منفی آن به کاتد وصل می‌شود. با اعمال یک ولتاژ مستقل دیگر توسط منبع تغذیه پرتو بین آند و بدنه، می‌توان انرژی یون‌ها را کنترل کرد. یک منبع تغذیه دیگر نیز با اعمال میدان مغناطیسی واگرایی محوری از طریق آهنربای الکتریکی، الکترون‌ها را وادار می‌کند تا در مسیر مارپیچی حول خطوط میدان مغناطیسی حرکت کنند. این عمل باعث افزایش بازدهی یونش گاز می‌شود. توری محافظ در پتانسیل منفی کاتد قرار می‌گیرد تا از خروج الکترون‌ها از روزنه‌های توری جلوگیری شود. به کمک یک منبع تغذیه مستقل دیگر و اتصال ترمینال منفی آن به توری شتاب‌دهنده، می‌توان یون‌های مثبت را از پلازما بیرون کشید و آنها را تا سطح انرژی دلخواه شتاب داد. در نهایت با اعمال یک ولتاژ متغیر به دو سر رشته خنثی‌کننده توسط یک منبع



تغذیه دیگر، الکترون‌های لازم جهت خنثی‌سازی بارفضای پرتو یون خروجی از توری شتاب‌دهنده فراهم می‌شود.

پلازما به طور کلی از نظر بار الکتریکی شبه‌خنثی است. اگر یون‌ها با عبور از روزنه‌های توری‌ها از محیط پلازما خارج شوند بار خالص پلازما منفی می‌شود. برای برقراری شرط شبه‌خنثایی باید به همان تعداد یون خارج شده از محیط پلازما، الکترون از پلازما خارج شود. منبع تغذیه پرتو، تعیین‌کننده پتانسیل پلازما نسبت به زمین است و از این رو الکترون‌ها از طریق آن به سمت زمین شارش می‌یابند. بنابراین جریان عبوری از این منبع تغذیه برابر با جریان یونی خارج شده از چشمه یون است.

معمولاً به دلیل بهینه نبودن سامانه استخراج، برخی از یون‌ها به توری دوم برخورد می‌کنند و جریان پرتو یون خروجی از مقدار جریان منبع تغذیه پرتو کمتر خواهد بود. جریان اتلافی از طریق منبع تغذیه شتاب‌دهنده که به توری دوم وصل است قرائت می‌شود. جریان یون‌های استخراج‌شده از پلازما در حالت آرمانی با جریان توری اول برابر است و با احتساب اتلاف در توری دوم، جریان پرتو در محل خروجی توری دوم برابر با اختلاف جریان‌های دو توری است [۱-۳].





## ۲. فصل دوم: منابع و مبانی نظری

Archive of SID

## ۲.۱. پیشینه پژوهش

فناوری چشمه پرتو یون پهن، از دهه ۱۹۵۰ و اساساً برای پیشرانس الکتریکی فضایی توسعه یافت. از دهه ۱۹۷۰ تکنولوژی اصلاح سطوح و فرآوری مواد توسط پرتو یون پهن به سرعت رشد کرد. تجاری سازی چشمه پرتو یون پهن برای استفاده در سامانه های لایه نشانی در سال های اخیر در خارج از کشور توسعه و تکامل یافته است.

دو شرکت Plasma Process Group و Veeco Instruments، Kaufman & Robinson Inc معروف ترین سازندگان چشمه پرتو یون پهن هستند. همچنین شرکت های زیادی در زمینه ساخت سامانه های لایه نشانی، از این فناوری در محصولات خود استفاده می کنند. برخی از این شرکت ها عبارتند از: ۱- Denton Vacuum ، ۲- Oxford Instruments Plasma Technology ، ۳- INTLVAC ، ۴- wave Inc ، ۵- Kurt J. Lesker ، ۶- LEYBOLD OPTICS ، ۷- EDWARDS .

نمونه آزمایشگاهی چشمه پرتو یون پهن برای استفاده در لایه نشانی توسط پرتو یون برای اولین بار در کشور توسط گروه پژوهشی فناوری خلأ و با انجام یک طرح پژوهشی طراحی و ساخته شد. چشمه یون ساخته شده، قادر به تولید پرتو یون با قطر ۵ سانتیمتر، انرژی ۷۰۰ الکترون ولت و جریان ۹۰ میلی آمپر است. چشمه پلاسمای این چشمه یون از نوع کاتد داغ و فشار کاری آن تقریباً ۱ میکروبار است.

گروه پژوهشی فناوری خلأ، قبل از این یک نمونه چشمه یون سوزنی برای کاربرد در لایه نشانی ساخته است. این چشمه پرتو یون دارای قطر کم (چند میلی متر) و انرژی پایین (حدود ۱۰۰ الکترون ولت) است. از این پژوهش یک مقاله با عنوان زیر به چاپ رسیده است.

- "طراحی و ساخت منبع یونساز به منظور افزایش کیفیت لایه های نازک تحت خلأ بالا"، داوود کلهر، فرهاد ایمانی، وحید مساحتی، مقاله نامه دومین کنفرانس ملی خلأ ایران، صص ۲۷-۲۹، ۱۳۷۹.

نتیجه جستجوی منابع مختلف فارسی و غیرفارسی شامل پایان نامه ها، طرح های پژوهشی و مقالات، در پایگاه [www.irandoc.ac.ir](http://www.irandoc.ac.ir) ، به کمک تمام کلیدواژه های مرتبط، در زیر فهرست شده است. چکیده ی منابع، ذیل عنوان آنها ذکر شده است.

- "مطالعه پرتو یون تولید شده در پلاسما"، محمود قرآن نویس، مسعود مراد شاهی، مقاله کنفرانس فیزیک ایران، ۱۳۶۸. در این مقاله ابتدا توسط منبع تغذیه RF در داخل یک لوله شیشه ای پلاسما تولید شده و سپس توسط استخراج کننده های مختلف پرتو یون استخراج می شود. قطر پرتو یون ۲ سانتی متر و شدت آن ۱۹ میکرو آمپر است.

- "طراحی و ساخت چشمه پرتوی یونی AC، ۲۵kV برای کاشت یون"، مسعود مرادشاهی، علی اکبر دبیرزاده، ایراندخت سیوشانسی، مرصده مخبری، کامبیز رحیمیان، نخستین همایش پژوهش های کاربردی در فیزیک و نقش آن در صنعت کشور، ۱۳۷۶. این چشمه یون می تواند یون انواع گازهای CH<sub>4</sub>، H<sub>2</sub>، Ar، N<sub>2</sub> و ... را ایجاد نماید. میدان مغناطیسی به شدت ۸۰۰ گوس برای تولید پلاسما استفاده می شود. و پرتو یون تولید شده دارای انرژی ۲۵ کیلوولت و جریان ۸ میلی آمپر است. سامانه استخراج این چشمه از الکترودهای تک-

روزنه‌ای ساخته شده است و قطر پرتو خروجی از چشمه بسیار باریک (حدود میلیمتر) است. تأثیر کاشت یون N2 بر افزایش سختی استیل بررسی شده است.

- "طراحی و ساخت یک چشمه یون برای یک سیستم اسپکترومتر جرمی"، منصور عثمانی، به راهنمایی: علی موسوی زرنندی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۲. در این پایان‌نامه یک چشمه یون خاص برای کاربرد در طیف سنجی جرمی طراحی و ساخته شده است. - "مطالعه و بررسی چشمه یونی شتابدهنده‌ها"، حسن نوروزعلیائی، به راهنمایی: صمد فرخی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، ۱۳۷۳. در این پایان‌نامه ضمن بازبینی چشمه‌های یون و عملکرد آنها، چشمه یون RF واندوگراف به طور دقیق‌تر بررسی شده است.

- "تولید پرتوهای یون پرنرژی تابشی از یک چشمه یون جدید برای سخت کردن فلزات و ادوات صنعتی"، طرح پژوهشی، مسئول اجرای طرح: محمدخراسانی، محل نگهداری گزارش: دانشگاه شهید بهشتی - معاونت پژوهشی، تاریخ اجرای طرح ۱۳۷۲-۱۳۷۴.

- "طراحی و ساخت چشمه یون از نوع EBIS"، احمد فلاح شیرازی، چکیده مقالات کنفرانس فیزیک ایران، صص ۱۳۴-۱۳۵، ۱۳۷۳. در این پژوهش یک چشمه یون ساخته شده است که با پرتو الکترونی کار می‌کند و در شتابدهنده‌ها کاربرد دارد. پرتو الکترونی به قطر  $0.26$  میلیمتر و انرژی  $20$  کیلوالکترون‌ولت برای یونش گاز آرگون بکار رفته است.

- "طراحی سیستم اپتیکی جهت بالا بردن تفکیک‌پذیری انرژی ذرات خروجی از سیکلوترون"، حسین رهبر، به راهنمایی: حسین آفریده، احمد حاجی‌محمدزاده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۳. در این پایان‌نامه با استفاده از اپتیک ذرات باردار و لنزهای الکترومغناطیسی گستره تغییرات انرژی یون‌های خروجی از شتابدهنده سیکلوترون بهینه‌سازی شده است.

- "طراحی یک سیستم اکروماتیک جهت انتقال باریکه‌ای از ذرات باردار خارج شده از سیکلوترون"، فرشته نژادی، به راهنمایی: حسین آفریده، احمد حاجی‌محمدزاده، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۷۲. در این پایان‌نامه اپتیک یونی و طراحی لنز مغناطیسی برای شتابدهنده سیکلوترون بررسی شده است.

- "ساخت و راه‌اندازی چشمه یونی کاتد سرد"، پویا بختی، به راهنمایی: مسعود مهجور شفیعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸. در این پایان‌نامه یک منبع یون کاتد سرد برای کاربرد کاشت یون طراحی و ساخته شده است. در منبع کاتد سرد تخلیه الکتریکی با اعمال پتانسیل الکتریکی توسط الکترودهایی ایجاد می‌شود که سبب یونیزه شدن مولکول‌های گاز می‌گردد. پس از یونش گاز در منبع پلاسما به وسیله سیستم استخراج که شامل یک سری لنز می‌باشد، یون‌ها استخراج می‌شوند.

- "شبیه‌سازی دینامیک باریکه چشمه یونی"، مهدی اخلاقی، به راهنمایی: مسعود مهجور شفیعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸. یکی از مهمترین قسمت‌های یک چشمه یونی سیستم استخراج یون می‌باشد که به شدت بر خواص باریکه استخراجی اثر می‌گذارد. این قسمت از یک چشمه یونی معمولاً با اتکا به شبیه‌سازی وسیعی و خطای تجربی بهینه می‌شود. در حال حاضر یک چشمه یونی کاتد سرد از نوع پنینگ دردانشکده فیزیک دانشگاه ساخته شده و به بهره‌برداری رسیده است. سیستم استخراج این چشمه با

سعی و خطای تجربی ساخته شده است. پژوهش انجام شده در این پایان نامه دو هدف عمده را تعقیب می کند: الف) مطالعه دینامیک باریکه خروجی از چشمه یونی ساخته شده در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، ب) طراحی سیستم استخراج جدید جهت بهبود کیفیت باریکه خروجی. این مطالعه با استفاده از شبیه ساز سیمیون و بدون در نظر گرفتن دینامیک غلاف پلاسما انجام شده است.

نتیجه بررسی منابع مذکور بیانگر آن است که چشمه پرتو یون پهن با مشخصات یک محصول تجاری و با ویژگی های خاص آن (شامل مکانیسم بمباران الکترونی برای تخلیه، استفاده از توری ها برای استخراج یون و تولید پرتو یون با قطر چند سانتی متر و انرژی حدود چند صد الکترون ولت)، که به عنوان ابزار کمکی در کنترل خواص لایه در فرآیند لایه نشانی کاربرد دارد، برای اولین بار در کشور طراحی و ساخته می شود.

## ۲.۲. کاستی های طرح پیشین

نمونه آزمایشگاهی چشمه پرتو یون پهن در طرح پژوهشی ۲۱-۱۹۰۶ طراحی و ساخته شد و بر اساس شناخت حاصل از آزمایش های متعددی که انجام گرفت، محدودیت ها و مشکلات آن شناسایی گردید. شکل ظاهری رشته تنگستن که به شکل کاسه زنگی با دهانه بسته طراحی شده بود باعث گرم شدن تمام نقاط آن می گردید و تمامی الکترون های ایجاد شده را در فضای ناهمگن میدان مغناطیسی پخش نموده و در تشکیل پلاسما ایجاد مشکل می کرد. همچنین فاصله کم آند تا توری محافظ باعث ایجاد جرقه می گردید. از طرفی ضعیف بودن میدان مغناطیسی مگنترون موجود، نمی توانست از فرار الکترون های تولید شده جلوگیری نماید و بنابراین کاهش چگالی پلاسما را در پی داشت که خود افزایش بیشتر جریان کاتد را برای ایجاد پلاسما لازم می نمود.

یکی از مهمترین نواقص چشمه یون پیشین، فقدان سامانه خنثی ساز است. استفاده از خنثی ساز بارفضا، موجب حفظ توازی پرتو یون و حتی کنترل همگرایی آن خواهد شد و از تجمع بار مثبت روی هدف های عایق جلوگیری خواهد نمود.

همچنین دو محدودیت اصلی برای دستیابی به مقادیر بالاتر جریان و انرژی پرتو یون وجود داشت. عدم دستیابی به مقدار جریان بالاتر برای پرتو یون، ناشی از محدودیت در دستیابی به چگالی پلاسمای بالاتر است. جبران این مشکل مستلزم بکارگیری میدان های مغناطیسی قوی تر برای محبوس سازی بیشتر پلاسما و نیز استفاده از رشته تنگستن با الکترون دهی بسیار بالاتر است.

محاسبات نشان می دهد، چگالی پلاسما در دمای  $2200^\circ$  در شرایط یکسان به میزان  $27\%$  درصد افزایش می یابد که با احتساب افزایش قدرت میدان مگنترون به نسبت ۲ تا ۳ برابر، این مقدار با فرض خطی بودن، به حدود  $30\%$  میرسد که در این صورت چگالی پلاسما در دمای  $2200^\circ$  سانتیگراد در حضور مگنترون در درون آند، برابر  $10^{11}$  تا  $10^{12}$  ذره باردار بر سانتی متر مکعب در فشار  $10^{-3}$  میلی بار (نقطه شروع تشکیل پلاسما) خواهد بود که بیش از ۱۰ برابر چگالی آن در همین فشار در دمای  $2800^\circ$  سانتیگراد و بدون مگنترون است. عدم دستیابی به مقدار انرژی بالاتر برای پرتو یون، ناشی از محدودیت در اعمال ولتاژهای بالاتر است. در ولتاژهای بالاتر جرقه های زیاد بین توری ها موجب خرابی آنها می شود. این مشکل خود ناشی از ۱- بهینه

نبودن سامانه توری‌ها و ۲- کار در فشار نسبتاً بالا است. راه حل اساسی برای بهینه‌سازی سامانه توری‌ها، اولاً طراحی بهینه توری‌ها (برای مثال به روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری) و ثانیاً بکارگیری ابزارها و روش‌های بسیار دقیق در مراحل ساخت و مونتاژ اجزای سامانه است. یک سامانه توری بهینه نیازمند دقت بسیار زیادی (کمتر از دهم میلیمتر) در هم‌محور بودن روزنه‌های توری‌ها است. از سوی دیگر، کار در فشارهای پایین‌تر نیز موجب کاهش چگالی پلاسما و در نتیجه کاهش جریان پرتو یون می‌گردد. ورود مستقیم گاز آرگون به محفظه پلاسما (آند)، توزیع یکنواختی برای آن در این محفظه ایجاد نمی‌نمود که این خود باعث تأخیر در تشکیل پلاسما و ناهمگنی در چگالی آن می‌گردد.

علاوه بر موارد ذکر شده مشکل دیگری نیز حین آزمایش‌ها مشاهده شد که خرابی قطعات تفلونی در اثر گرمای زیاد ایجاد شده توسط رشته تنگستن و پلاسما بوده است. این گرما که در جریان‌های بالای ۲۵ آمپر، الکترون‌های لازم برای تولید پلاسما در فشار پائین را ایجاد می‌نمود، باعث تخریب قطعه تفلونی پایه کاتد، کاهش عمر رشته و پایه تفلون، کاهش چگالی پلاسما، ایجاد اغتشاش در محیط پلاسما و تغییر برخی خواص آند و اجزای پیرامونی آن می‌گردد. ذرات کوچک تفلون در اثر حرارت زیاد از سطح تماس کلاهک مرکزی با پلاسما کنده شده و ضمن باردار شدن در محیط پلاسما توسط میدان الکتریکی محیط شتاب گرفته و با عبور از روزنه توری‌ها به بیرون از چشمه یون پرتاب می‌شدند. به نظر می‌رسد این پدیده نشان‌دهنده تشکیل پلاسمای غباری<sup>۱</sup> داخل محفظه آند است. گرمای زیادی که در جریان‌های بالای ۲۵ آمپر، الکترون‌های لازم برای تولید پلاسما در فشار پائین را ایجاد می‌نمود، باعث تخریب قطعه تفلونی پایه کاتد، کاهش عمر رشته و پایه تفلون، کاهش چگالی پلاسما، ایجاد اغتشاش در محیط پلاسما و تغییر برخی خواص آند و اجزای پیرامونی آن می‌گردد. این جریان در رشته کاتد تنگستن، دمای آن را به محدوده ۲۸۰۰ کلوین می‌رساند، در حالیکه بیشینه دمای کار این رشته‌ها، ۲۵۰۰ کلوین است. بنابراین، عمر این رشته‌ها در دمای پیش‌گفته، به شدت کاهش می‌یابد.

طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، دمای آند با قطر داخلی ۵ سانتی‌متر، در این شرایط و در حضور پلاسما به  $550^{\circ}$  می‌رسد. این دما، باعث مهاجرت اتم‌های کربن در داخل استیل و تغییر خواص آند می‌گردد، که آلودگی داخل آند را افزایش داده و علاوه بر آن که چگالی پلاسما را کاهش می‌دهد، آن را معشوش نموده از تعادل خارج می‌سازد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بیشینه دمای آند را برای دمای کاتد برابر  $2200^{\circ}$  کلوین، کمتر از  $350^{\circ}$  پیش‌بینی می‌نماید.

سامانه استخراج این چشمه یون، یک سامانه دوتوری است و بنابراین نمی‌تواند در انرژی‌های پائین، جریان‌های یونی بالا استخراج نماید. طبق نتایج آزمایش‌های گزارش شده، چشمه یون ساخته شده قادر به تولید پرتو یون با قطر ۵ سانتیمتر، و جریان ۶۰ میلی‌آمپر در انرژی ۷۱۰ الکترون‌ولت است. درحالیکه این جریان را باید بتوان در انرژی کمتر از ۳۰۰ الکترون‌ولت نیز بدست آورد که این با افزودن توری سوم در سامانه استخراج امکان‌پذیر خواهد بود.

<sup>۱</sup> Dusty Plasma

فشار کار این چشمه یون نیز حدود ۱ میکروبار است که در مقایسه با چشمه‌های یون استاندارد تقریباً ۲ برابر بیشتر است و لازم است کاهش یابد.

با توجه به محدودیت در اعمال ولتاژهای بالاتر و نیز محدودیت در دستیابی به چگالی پلاسمای بالاتر، امکان دستیابی به مقادیر بالاتر جریان و انرژی پرتو یون وجود ندارد. رفع این محدودیت‌ها نیازمند بهینه‌سازی‌های متعدد شامل بهینه‌سازی چشمه پلازما و سامانه استخراج است.

از آنجایی که این چشمه پرتو یون پهن یک نمونه آزمایشگاهی است؛ بدیهی است که نمونه حاضر از لحاظ مشخصه‌های یک محصول تجاری مانند ایمنی، پایداری، تکرارپذیری، آسانی کاربری، سهولت مونتاژ و دموونتاژ، طول عمر و ... قابل مقایسه با نمونه‌های خارجی آن نیست. اما مشخصات دیگر این نمونه شامل پارامترهای پرتو یون خروجی نزدیک به پارامترهای پرتو یون چشمه‌های یون تجاری است. داده‌های مربوط به پارامترهای پرتو یون خروجی نمونه ساخته شده که در فصل‌های ۷ و ۹ گزارش نهائی چشمه یون پیشین آمده است مؤید این مطلب است.

تولید نمونه مناسب و پایدار چشمه پرتو یون پهن، مستلزم انجام طرح‌های بهینه‌سازی متعدد روی نمونه آزمایشگاهی آن است. در این بخش با توجه به آزمایش‌های متعددی که روی چیدمان آزمایشگاهی و نمونه ساخته شده انجام گرفته است، چند طرح بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. این بهینه‌سازی‌ها به دو گروه اصلی بهینه‌سازی چشمه پلازما و بهینه‌سازی سامانه استخراج تقسیم می‌شود که در آنها از روش‌های شبیه‌سازی نرم‌افزاری و تجربی استفاده می‌گردد.

## ۲.۳. فرآیند بهینه‌سازی

### ۲.۳.۱. بهینه‌سازی چشمه پلازما

در این طرح از روش‌های مطالعه کتابخانه‌ای، شبیه‌سازی، تجربی و مهندسی معکوس برای پژوهش استفاده می‌شود. مراحل مختلف اجرای طرح به صورت زیر است:

مراحل زیر برای بهینه‌سازی چشمه پلازما در نظر گرفته شده است. در هر مرحله ابتدا مطالعات تکمیلی انجام و سپس نسبت به اجرای فعالیت‌ها اقدام خواهد شد.

**کاتد:** میزان الکترون دهی یک ماده، خود به متغیرهایی مانند تابع کار، مساحت سطح، جنس، شکل و میزان جریان اعمال شده به آن بستگی دارد. شکل رشته کاتد در تشکیل پلازما نیز موثر است. بنابراین یافتن بهترین شرایط برای رشته ای که به عنوان کاتد بکار می‌رود امری ضروری خواهد بود. افزایش الکترون دهی رشته کاتد لازم است در حدی باشد که جریان عبوری از آن تعداد الکترون‌های لازم برای ایجاد یک پلاسمای با درصد یونش بالا را تولید نماید و از طرفی گرمای ایجاد شده در کاتد در کمترین مقدار ممکن باشد که این امر باعث افزایش عمر رشته و به سبب آن کاهش آلودگی و آسیب دیدگی محیط پیرامون کاتد و همچنین کاهش تغییرات چگالی پلازما بر اثر افزایش دما می‌شود.

شاخص‌ها و محدوده آنها که در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته خواهند شد عبارتند از:

قطر رشته: ۰/۱ تا ۱ میلی متر

طول: ۱۰٪ تا ۳۰٪ درصد ارتفاع آند

جنس: تنگستن یا یکی از مواد مناسب و در دسترس

**آند:** طراحی و ساخت این قسمت مستلزم در نظر گرفتن تمهیداتی خاص است بطوریکه در طرح پیشین این قطعه ۵ بار بازطراحی و ساخته شد. ابعاد این قطعه بستگی تام به شکل و ابعاد کاتد و خواص پلاسمای مورد استفاده در فشار کاری آن برای جریان و شار یون مورد نظر دارد.

شاخص‌ها و محدوده آنها که در فرایند بهینه‌سازی اعمال خواهند شد عبارتند از:

قطر آند: ۲.۵ تا ۶ سانتی متر

طول: ۵ تا ۱۰ سانتی متر

جنس: استیل نگیر یا یکی از مواد در دسترس

**مگنترون:** در طرح‌نامه پیشین دو روش استفاده از آهنرباهای دائمی و الکتریکی پیشنهاد شده بود که در زیر به مزایا و معایب هریک و روشی که برای طرح حاضر انتخاب شده به اجمال اشاره می‌شود.

آهنربای الکتریکی: این روش، نسبت به آهنرباهای دائمی پژوهش پذیرتر است، زیرا میدان مغناطیسی را به عنوان یک متغیر در آزمایش وارد می‌کند. در چشمه‌های یون با ابعاد بزرگ استفاده از این روش گریز ناپذیر است. اما اشکالات عمده در استفاده از این روش، گرمای تولید شده در خود سیم‌پیچ، آسیب پذیر بودن سیم‌پیچ‌ها در محیط‌های گرم و نیز انتشار گاز سیم‌های روکش‌دار در محیط خلأ است. از دیگر معایب این روش، حجیم بودن سیم‌پیچ در مقایسه با آهنربای دائمی برای تولید مقدار مشخص میدان است. روش ساخت آهنربای الکتریکی نیز نیازمند تمهیداتی برای حذف یا کاهش گازدهی<sup>۱</sup> از سیم‌پیچ است که طراحی روشی برای ماشینکاری و جوشکاری و درزبندی کامل قطعات از جمله این موارد است.

آهنربای دائمی: استفاده این نوع آهنربا، حجم محفظه مورد نیاز برای تولید میدان را کاهش خواهد داد و در ظاهر ساده‌ترین کار برای ایجاد میدان مغناطیسی محسوب می‌شود. ولی در عمل استفاده از این آهنرباها نیاز به طراحی بسیار دقیق محیط پلاسمایی و تعیین پارامترهای ایجاد آن دارد که با صرف وقت زیادی برای شبیه‌سازی همراه خواهد بود. از دیگر معایب این آهنرباها، تضعیف در مواجهه با محیط‌های با گرمای زیاد است. همچنین ساخت نگهدارنده آهنرباها بطوریکه میدان را تضعیف نکند با مشکلاتی مانند تعیین جنس مناسب و روش ساخت آن مواجه است. دیگر از معایب استفاده از آهنربای دائمی، ضعف بازار داخلی به‌لحاظ تنوع جنس و پایداری آن از نظر وجود و قیمت است.

در این طرح با توجه به مزایا و معایب روش‌های فوق برای تولید میدان مغناطیسی و با تمهیداتی که برای ساخت کاتد و خنک‌کننده آبگرد در نظر گرفته شده است، از آهنرباهای دائمی برای ایجاد میدان استفاده خواهد شد.

شاخص‌ها و محدوده آنها که در فرایند بهینه‌سازی مورد نظر قرار خواهند گرفت عبارتند از:

میدان مغناطیسی ۲۰۰ تا ۵۰۰ گاوس

<sup>۱</sup>Out gas

**آبگرد:** به دلیل گرمازا بودن محیط پلاسما و همچنین منتقل نشدن این گرما با سرعت مناسب به بیرون از سامانه، وجود آبگرد ضروری خواهد بود.

شاخص‌ها و محدوده آنها که در فرایند بهینه سازی مورد استفاده قرار خواهند گرفت شامل: میزان شارش آب: ۰ تا ۴ لیتر بر دقیقه  
عایق‌های الکتریکی: پایه کاتد و نگهدارنده آهنرباها از جمله قطعاتی هستند که ساخت آنها مستلزم طراحی دقیقی می‌باشد.

پایه کاتد خود از چند قسمت تشکیل شده که پایه رشته و عایق محافظ آن، مهمترین بخش هستند. این قطعه از دو ناحیه رشته کاتد و ناحیه پلاسما انرژی گرمائی جذب نموده و دمایش بالا می‌رود. جنس آن باید طوری باشد که در دماهای بالا از لحاظ هدایت گرمائی و نیز هدایت الکتریکی پایدار باشد و علاوه بر آن در این دماها آلودگی ایجاد ننماید. نگهدارنده آهنربا نیز همانطور که در فوق اشاره شد باید میدان مغناطیسی را تضعیف نکند و در دمای بالا گاز متصاعد ننماید.

برای عایق‌بندی‌های بخش‌های درونی چشمه پلاسما استفاده از موادی که از مقاومت الکتریکی و گرمائی بالایی برخوردار باشند ضروری است. با توجه به شکل و اندازه خاص این عایق‌ها که لزوماً از نوعی سرامیک خواهد بود، یافتن آنها در بازار غیر محتمل است و لذا برای ساخت آنها باید روش مناسب انتخاب شود.

با توجه به توضیحات فوق، روش اجرایی برای ساخت چشمه پلاسما بصورت زیر خواهد بود:  
برای بدست آوردن پارامترهای بهینه، استفاده از روش‌های متداول بهینه سازی آزمایش (DOE)<sup>۱</sup> و انجام شبیه‌سازی‌های مورد نیاز برای هر یک از قسمت‌های فوق ضرورت خواهد داشت. لذا مراحل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند هر بخش بطور مجزا انجام و سپس نسبت به طراحی و اجرای آزمایش‌های عملی برای تکمیل فرآیند اقدام خواهد شد.

بررسی فرایند کامل تشکیل پلاسما در حضور یک منبع گسیل گرمایی و با تأثیر میدان مغناطیسی، توسط نرم افزارهای موجود مانند COMSOL نیز از دیگر مراحل بهینه‌سازی خواهد بود.

سپس با انجام آزمایش‌های مختلف، پارامترهای عملکردی بهینه چشمه پلاسما (شامل فشار کار، جریان رشته و جریان تخلیه الکتریکی) بدست می‌آید. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، در صورت لزوم مراحل بازطراحی و ساخت مجدد قطعات تا حصول نتایج مورد نظر تکرار خواهد شد. آزمون مواد مختلف در رشته کاتد، استوانه آند و عایق پایه محافظ رشته در محیط پلاسما و دمای بالا و سپس نمونه برداری و تعیین مشخصات این اجزا بعد از آزمون‌ها در تعیین نوع ماده نهائی آنها راه‌گشا خواهد بود.

<sup>۱</sup> Design Of Experiment



### ۲.۳.۲. بهینه سازی سامانه استخراج

این بهینه سازی شامل موارد زیر است:

تعیین مشخصات توری‌ها (شامل ضخامت، کسر شفافیت، قطر و شکل روزنه‌ها، فاصله توری‌ها و ...) به منظور افزایش جریان یون استخراج شده از آن‌ها، کاهش برخورد یون‌ها به توری‌ها و کاهش میزان واگرایی پرتو یون، به کمک شبیه سازی توسط نرم افزار CST و یا SIMION تعیین فاصله توری‌های محافظ و آند و نیز مشخصات بهینه محافظ کندوپاش<sup>۱</sup>، جلوگیری از اتلاف پلاسما و حفظ یکنواختی چگالی آن در نزدیکی توری محافظ شناسایی و بکارگیری روش ساخت و بستن توری‌ها با دقت بالا

### ۲.۳.۳. بکارگیری و بهینه سازی سامانه خنثی ساز

استفاده از خنثی ساز بارفضا، موجب حفظ توازی پرتو یون و کنترل همگرایی آن خواهد شد و از تجمع بار مثبت روی هدف‌های عایق جلوگیری خواهد نمود. استفاده از شکل‌های مختلف هندسی با ابعاد متفاوت برای کاتد خنثی ساز و نیز اعمال جریان‌های الکتریکی گوناگون در آزمون‌ها، شناسایی بهترین وضعیت و شکل را برای این سامانه ممکن می‌سازد. بهینه سازی‌های فوق، ضمن بهبود عملکرد، موجب دستیابی به بازه وسیع تری از مشخصه‌های پرتو یون خروجی خواهد شد و در عین حال، تکرارپذیری و کنترل پذیری آسان تر آنها را فراهم می‌کند. علاوه بر این، به منظور دستیابی به سایر مشخصه‌های بهینه، لازم است تا موارد زیر نیز انجام پذیرد:

- بهینه سازی طراحی قطعات جهت سهولت در سوار و پیاده کردن اجزا برای تعمیرات و ...
- طراحی و ساخت پایه نگهدارنده چشمه یون با قابلیت تنظیم ارتفاع و زاویه
- بهینه سازی منابع تغذیه چشمه یون با بکارگیری فن آوری کلیدزنی<sup>۲</sup>
- تدوین راهنمای ویژه مربوط به نحوه راه اندازی و کنترل منابع تغذیه

<sup>۱</sup> Sputter Shield

<sup>۲</sup> Switching



### ۳. فصل سوم: فرآیند پژوهش

Archive of SID

### ۳.۱. مقدمه

با مشاهده کاستی‌های طرح قبلی، بازدید از سامانه چشمه یون پهن دانشگاه شیراز و مرکز ملی لیزر و نیز بررسی کاتالوگ شرکت‌های مختلف مانند ویکو و *Plasma Proseses Group* انجام و اطلاعات جمع‌آوری شده دسته‌بندی گردید. با استفاده از این اطلاعات و نیز اطلاعات مواد موجود در بازار، بهینه‌سازی در سه حوزه کاتد، آند و میدان مغناطیسی پیش‌بینی و انجام گردید.

اولین و مهم‌ترین مرحله بهینه‌سازی چشمه یون مربوط به چشمه پلاسما است. در این فصل پارامترهای بهینه شده مربوط به اجزای مختلف این سامانه، مانند پیکربندی مغناطیسی، جنس و اجزای کاتد و اتصالات و دیگر اجزا، توصیف خواهد گردید.

### ۳.۲. بهینه سازی چشمه پلاسما

#### ۳.۲.۱. رشته کاتد

• جنس: رشته کاتد قبلی از جنس ترکیبات تنگستن (نوعی سیلیکات تنگستن با چگالی  $9/2$  تا  $9/8$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) دارای عمر کوتاه و نقطه ذوب پائین تری نسبت به تنگستن خالص بود. مهم‌ترین نقطه ضعف آن بالابودن تابع کار این فلز بود که برای ایجاد الکترون مورد نیاز برای تولید پلاسما با چگالی مناسب، لازم بود که جریان الکتریکی بالایی از آن عبور داده شود. این جریان الکتریکی بالا، باعث افزایش دما و تخریب سریعتر رشته کاتد بر اثر ترکیب با مولکول‌های پراکنده در محیط بود. بعلاوه با ایجاد دمای اضافه در محیط، باعث آسیب دیدن قطعات عایق و ایجاد اختلال در پایداری پلاسما نیز می‌شد.

در این طرح از یک نوع تنگستن موجود در بازار استفاده گردید. خلوص بالای  $95$  درصد و چگالی نزدیک به چگالی تنگستن خالص ( $19\#$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) از مشخصات آن است. تغییر جنس همزمان با کاهش ضخامت رشته (از  $0.8$  م.م. به  $0.3$  م.م.)، باعث شد جریان الکتریکی مورد نیاز برای گرم کردن رشته تا دمای الکترون دهی از  $25$  آمپر به  $8$  آمپر کاهش یابد.

• شکل و ابعاد هندسی: در طرح قبلی رشته از نظر شکل ظاهری بصورت کاسه زنگی با دهانه بسته طراحی شده بود که بر روی دو پیچ کوتاه بسته می‌شد. این هندسه فرار الکترون‌های ایجاد شده از میدان مغناطیسی را تسهیل می‌کرد و در نتیجه چگالی پلاسما کاهش می‌یافت. بعلاوه با توزیع ناهمگن الکترون در فضا، تشکیل پلاسما را با مشکل مواجه می‌کرد.

در این طرح، هندسه کاتد بصورت یک فنر به قطر  $5$  میلی‌متر با  $6$  تا  $9$  حلقه به فاصله تقریبی  $1$  میلی‌متر تغییر داده شد که بر روی دو پیچ بلند بسته می‌شد. این شکل ظاهری باعث می‌شود با تزریق الکترون با تقارن بیشتر در فضای چشمه پلاسما، تشکیل پلاسما تسهیل شود. بعلاوه در این هندسه جریان عبوری فقط ناحیه مشخصی از فضا را گرم می‌کند و این امکان فراهم می‌شود که فاصله نقاط داغ رشته تنگستن از نقاط حساس داخلی مانند پایه کاتد زیاد شده و آلودگی و دیگر عوارض ناشی از نقاط گرم رشته بر روی آن‌ها کاهش یابد (شکل ۱-۳).



شکل ۳-۱: رشته کاتد و پایه های اتصال آن

- محل قرارگیری: برای تعیین مکان ناحیه فوریج رشته در داخل آند با هدف یافتن ناحیه‌ای از فضای داخل آند که مولفه محوری میدان مغناطیسی در آن بیشینه است، شبیه سازی انجام شد. با فرض انتخاب جوشن پایینی یکپارچه (در بخش بعدی علت این انتخاب شرح داده خواهد شد)، نتایج شبیه سازی با نرم افزار کامسول نشان داد که مولفه عمودی میدان مغناطیسی، روی محور استوانه آند در نیمه پایینی آن افزایش می یابد. بنابراین ارتفاع پیچ های نگهدارنده کاتد به حدی در نظر گرفته شد که کاتد فوری شکل در نیمه پایینی استوانه آند قرار گیرد. این کار باعث می شود احتمال فرار الکترون ها کاهش یافته و در نتیجه چگالی پلاسما افزایش یابد. البته به دلیل آنکه در نزدیکی سطح جوشن یکپارچه، خطوط میدان مغناطیسی بر سطح آن عمود می گردند، بدیهی است که محل قرارگیری کاتد نباید خیلی به این جوشن نزدیک باشد.

- طول عمر: طول عمر این نوع کاتد بستگی به شرایط استفاده از آن دارد. در جریان های پائین (کمتر از ۷ آمپر) طول عمر به مقدار زیادی افزایش می یابد. در چگالی های بالای پلاسما ( $10^{13}$  یون بر سانتی متر مکعب به بالا) طول عمر کاهش می یابد. طول عمر رشته کاتد تحت سه فرآیند کاهش می یابد: تبخیر سطحی در دمای بالا، خوردگی در محیط پلاسما و کندو پاش در ولتاژ بالای پرتو که بین آند و کاتد اعمال می شود. در صورتیکه تنها فرآیند تبخیر اثر گذار باشد، طول عمر این رشته ۴۵ تا ۵۰ ساعت خواهد بود. فرآیند خوردگی از نظر زمانی تاثیر کمتری نسبت به دو فرآیند دیگر دارد. بنابر این محاسبات نشان می دهد که بیشینه عمر رشته کاتد در چشمه پلاسما که هر سه فرآیند را متحمل می شود ۸ تا ۱۲ ساعت خواهد بود.

### ۳.۲.۲. میدان مغناطیسی

برای طراحی میدان مغناطیسی بهینه باید به شدت و آرایش خطوط میدان مغناطیسی در داخل آند توجه کرد. قدرت میدان مغناطیسی در نواحی محوری آند مهم ترین تاثیر را در تشکیل پلاسما در خلأ بالا دارد. آرایش خطوط میدان مغناطیسی در داخل آند در نزدیکی جوشن ها نیز باید نامتقارن باشد تا ضریب انعکاس الکترون ها در دوطرف آند متفاوت باشد. زیرا در یک طرف آند باید بیشینه الکترون ها منعکس و در طرف دیگر جذب آند گردند. هرچه همگرایی خطوط میدان مغناطیسی بیشتر و قدرت میدان بالاتر باشد ضریب انعکاس الکترونی بیشتر بوده و الکترون ها مسیر طولانی تری را در محیط گازی طی کرده باعث افزایش یونش گاز



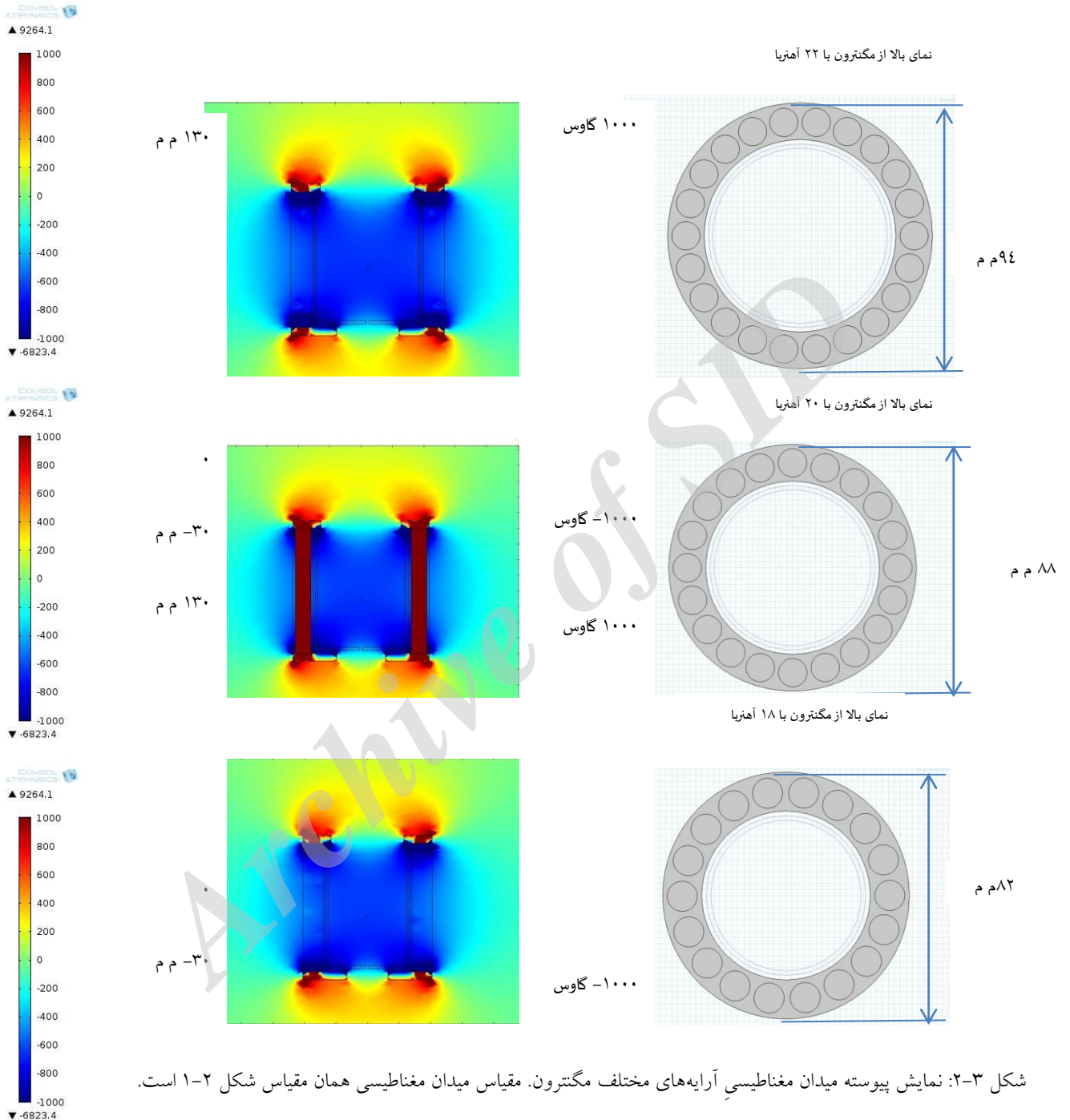
می شوند<sup>۱</sup>. شبیه سازی های انجام شده توسط نرم افزار کامسول، برای بررسی تاثیر شرایط مختلف آهنرباهای مگنترون، با وارد کردن آهنرباهای دارای گرید ۳۵ (پائین ترین گرید موجود در کتابخانه کامسول) انجام گردید (شکل ۳-۲). با هدف یافتن بیشترین میدان مغناطیسی در نواحی مرکزی استوانه آند (روی محور استوانه) با زیاد کردن همزمان تعداد آهنرباها و به ناچار قطر قاب مگنترون (جوشن ها)، سه حالت بررسی شد. با مقایسه نتایج آرایه ۱۸، ۲۰ و ۲۲ تایی آهنرباها بهترین گزینه برای میدان مغناطیسی پیشنهاد می شود. نتایج با استفاده از نمایش رنگین کمائی شبیه سازی که در تصاویر بالا آمده در جدول ۳-۱ ثبت شد ( واحد میدان مغناطیسی در جدول زیر گاوس است).

Archive of SID

---

<sup>۱</sup> البته میدان مغناطیسی نمی تواند از یک حد معین نیز که اصطلاحاً باعث انجماد الکترون ها می گردد بیشتر باشد.

تحلیل ساده‌ای از موارد ذکر شده در جدول ۳-۱ بصورت زیر است:



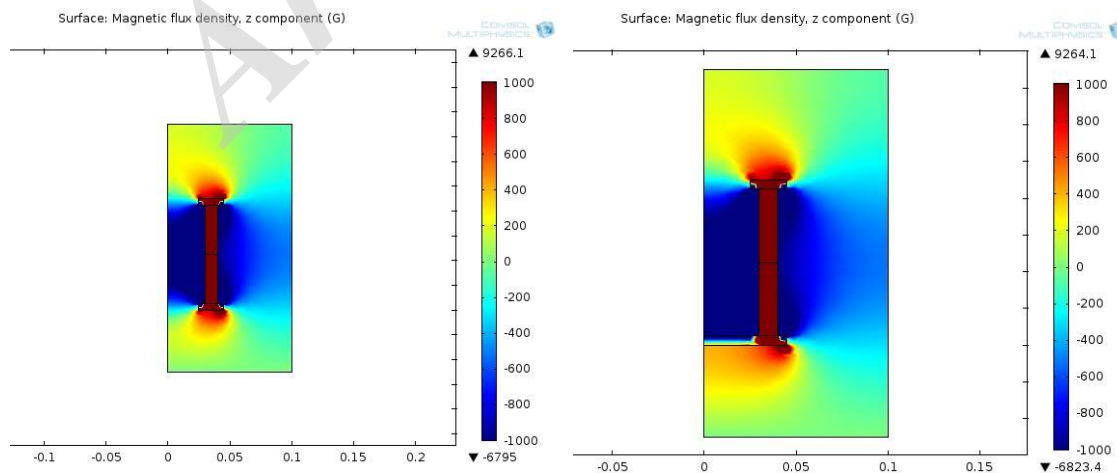
با کاهش تعداد آهنرباها (کاهش قطر قاب مگنترون) مولفه محوری میدان مغناطیسی در مرکز آند تضعیف می‌گردد. با کاهش تعداد آهنرباها (کاهش قطر قاب مگنترون) مولفه محوری میدان مغناطیسی در خارج از نقاط محوری تقویت می‌گردد.

جدول ۳-۱ قدرت میدان مغناطیسی در مرکز آرایه مغناطیسی با ۱۸، ۲۰، و ۲۲ آهنربا				
ردیف	مکان اندازه گیری میدان مغناطیسی	آرایه ۲۲ تایی	آرایه ۲۰ تایی	آرایه ۱۸ تایی
۱	نقطه ۱ (۲۰ میلی متر زیر مرکز استوانه)	-۶۶۸	-۶۸۶	-۶۹۲
۲	نقطه ۲ (مرکز استوانه)	-۶۵۹	-۶۴۳	-۶۴۰
۳	نقطه ۳ (۲۰ میلی متر بالای مرکز)	-۵۸۹	-۶۰۵	-۶۱۶

به این ترتیب مشخص شد در صورتی که از تعداد آهنرباهای بیشتر استفاده شود در حالی که قطر مگنترون کمینه است و رشته کاتد در نزدیکی میدان بیشینه قرار داده شود، امکان به دام انداختن الکترون ها بیشتر شده و در نهایت تشکیل پلاسما آسان تر می گردد. در انتخاب آرایه بهینه آهنرباها به این نکته نیز باید توجه کرد که میدان مغناطیسی نباید از یک حد معین که اصطلاحاً باعث انجماد الکترون ها می گردد بیشتر باشد. با توجه به موارد بالا آرایه ۲۲ تایی انتخاب شد. اما چون تنها آهنربای موجود در بازار از نوع گرید ۲۷ بود، برای جبران مقدار تضعیف شده میدان مغناطیسی، تعداد این آهنرباها به ۲۵ افزایش داده شد. بدین منظور با توجه به آهنرباهای موجود در بازار، آهنرباهای میله ای از نوع نئودیمیومی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۴۰ و با فاصله ۱/۵ میلی متر بین دو آهنربای مجاور و نیز ۱/۵ میلی متر با دیواره های داخلی و خارجی قاب مگنترون با گرید N۲۷ در نظر گرفته شد.

با بررسی طراحی جوشن های چشمه یون شرکت Plasma Process استفاده از قرص آهنی بجای حلقه به عنوان جوشن پایینی پیشنهاد شد.

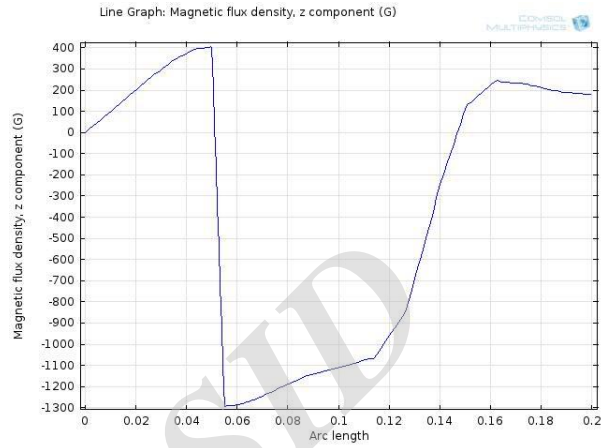
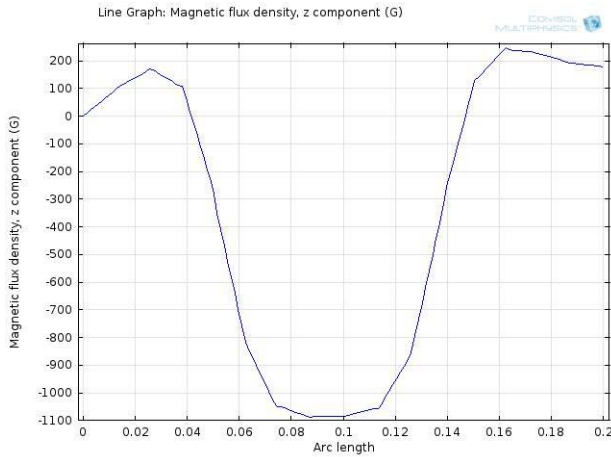
شبیه سازی جوشن یکپارچه به صورت دو بعدی متقارن بر روی یک ستون آهنربا انجام شد. در سه شکل ۳-۳ تا ۳-۵، به ترتیب توزیع رنگین کمائی، شدت میدان مغناطیسی در طول خط یک دوم شعاع و در خط یک چهارم شعاع نشان داده شده است. در همه این شکل ها، شکل سمت راست مربوط به جوشن پایینی یکپارچه و شکل سمت چپ مربوط به جوشن پایینی حلقوی است.



شکل ۳-۳- توزیع میدان مغناطیسی برای الف- جوشن های یکسان و ب- جوشن یکپارچه در پائین مگنترون (راست)

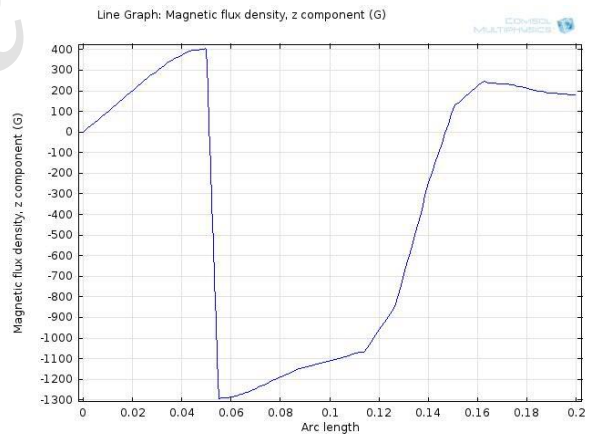
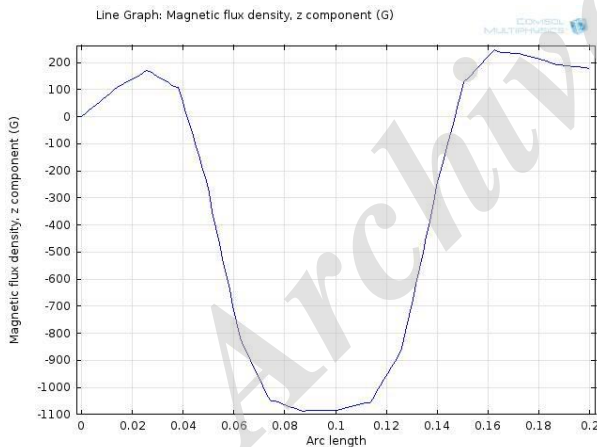
محور افقی در شکل ۳-۳ فاصله از مرکز استوانه و در شکل های ۳-۴ و ۳-۵ فاصله از کف جوشن پایینی در راستای محور استوانه و واحد آن متر است.

محور عمود در شکل های ۳-۴ و ۳-۵ مربوط به مولفه قائم میدان  $B_z$  و واحد آن گاوس است.



شکل ۳-۴ در خط یک دوم شعاع استوانه آند

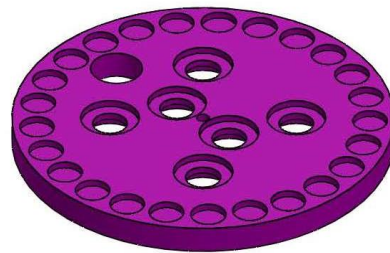
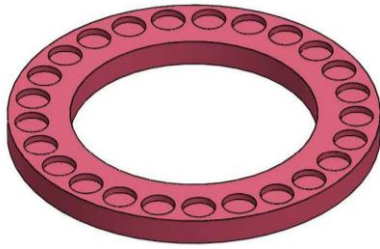
با توجه به نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که یکپارچه بودن جوشن پایینی بیش از ۲۰۰ گاوس میدان را در نیمه پایینی آند بیشتر می کند و در نیمه بالایی آن تأثیر چندانی ندارد.



شکل ۳-۵ در خط سه چهارم شعاع استوانه آند

یکپارچه بودن جوشن پائینی علاوه بر تقویت میدان مغناطیسی امکان ماشینکاری برای جاگذاری مهره های سرامیکی با هدف عبور پیچ های اتصال آند و عبور پایه های کاتد را می دهد. بنابراین از یک سو قطعه بزرگ تفلونی پایه کاتد جای خود را به قطعات سرامیکی کوچک می دهد و از سوی دیگر به دلیل استفاده از سرامیک های موجود در بازار هزینه ماشینکاری تفلون حذف می شود.



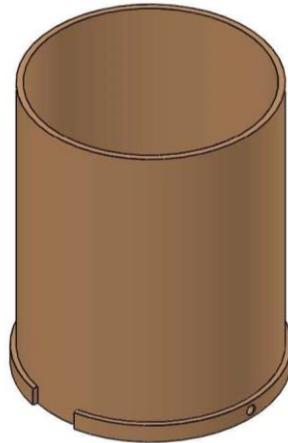


شکل ۳-۶- بالا: نقشه جوشن‌ها؛ پائین: نصب آهنرباها و جوشن‌ها

نظر به نتایج بالا، برای ساخت جوشن پایینی از یک قرص آهنی ضخیم‌تر به ضخامت ۶ میلی‌متر استفاده شد تا فضاهای خالی ایجاد شده برای بستن و تثبیت سرامیک‌ها، جبران گردد (شکل ۳-۶).

### ۳.۲.۳. آند

با توجه به آرایه انتخاب شده برای آهنرباها و قطر ناحیه مشبک توری‌ها (۵ س.م)، قطر داخلی استوانه آند ۶۳ میلی‌متر انتخاب گردید. با این انتخاب، علاوه بر ایجاد یکنواختی در پلاسمای ایجاد شده، امکان افزایش قطر توری تا ۶ سانتی‌متر نیز فراهم می‌شود. ضخامت استوانه آند برابر ۱/۵ میلی‌متر انتخاب گردید. طول استوانه آند نیز طوری انتخاب شد که لبه بالایی آن با عبور از یوغ بالائی مانع از دید آهنرباها توسط پلاسمای گردد. از آنجائی که آند باید رسانا بوده و در مقابل خوردگی حاصل از پلاسمای مقاوم باشد، جنس آن استیل غیرمغناطیسی ضد زنگ انتخاب شد (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷- بدنه اصلی آند

به منظور مهار کردن آند روی نگهدارنده، از یک قطعه به نام توپی استفاده شده است (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸- توپی کف آند

محل های گوه شکل دور توپی آند، برای قرارگیری سر پیچ های تثبیت کننده آن روی استوانه آند در نظر گرفته شده است. در حالتی که محور این ناحیه با محور پیچ های تثبیت کننده آند هم راستا باشد، آند توسط دو پیچ مهار شده و تثبیت می گردد. دو عدد پیچ آلن مغزی ۳ (تثبیت کننده)، درون سوراخ قطعه توپی درونی جازده می شود تا پیچ ها بطور کامل داخل سوراخ قرار گیرند و تزاممی از جهت گل پیچ بین آند و قطعات بیرون آن وجود نداشته باشد.

مسأله دیگر در طراحی آند، طراحی آبگرد برای خنک کاری آن است. آند علاوه بر اینکه در تماس با پلاسماست و از این طریق گرم می شود، در مجاورت رشته کاتد نیز قرار دارد و در اثر تابش گرمایی رشته، دمای آن بالا می رود. بالا رفتن دمای آند باعث گرم شدن جوشن و در نتیجه آهنرباها می شود. بیشینه دمای قابل تحمل آهنرباهای نئودیمیوم ۱۳۰ درجه سانتیگراد است. در دماهای بیشتر، مغناطیدگی آهنرباها کاهش یافته و باعث تضعیف میدان مغناطیسی کلی می شود.

برای اینکه خنک سازی آند بصورت کامل صورت گیرد، می بایست تماس فیزیکی خوبی بین لوله های آبگرد با آند برقرار باشد. برای برآوردن این هدف، لوله مسی با تعداد دور مناسب به دور بدنه بیرونی آند جوش داده می شود. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، هم پتانسیل بودن لوله آبگرد و آند است. بنابراین عبور

لوله آبگرد از جوشن پایینی باید با در نظر گرفتن عایق‌بندی الکتریکی صورت گیرد و در فاصله مناسب از آهنرباها باشد.

آبگرد از یک لوله مسی به قطر بیرونی ۵ میلی‌متر تشکیل شده که از بالای آند، بر روی بدنه بیرونی آن پیچیده و بر روی آن جوش شده است (شکل ۳-۹). دو انتهای این لوله به ورودی و خروجی آب متصل می‌شوند و از داخل یک لوله تفلونی به خارج از جوشن پایینی.



شکل ۳-۹- آند و آبگرد

### ۳.۳. توزیع گاز آرگون

در سامانه قبلی، گاز آرگون بطور مستقیم از ناحیه پایه کاتد وارد محفظه چشمه یون شده و با عبور از محفظه آند مستقیماً از توری‌ها خارج می‌گردید. تلفات گاز خنثی با این شرایط نسبتاً بالا بود و بنابراین بازده پلاسما پائین می‌آمد. برای دستیابی به پلاسما چگال‌تر ناچار باید شار گاز افزایش داده شود. اما این کار باعث می‌شد تلفات گاز بیشتر شده و فشار منطقه پشتیبان بالا رود. بنابراین برای جلوگیری از آسیب دیدن پمپ نفوذی، امکان افزایش شار ورودی بیشتر از یک حد معین، میسر نیست. برای حل این مشکل، از یک توری استیل با سوراخ‌های میکرونی در مقابل سوراخ ورودی گاز آرگون در ناحیه جوشن یکپارچه استفاده گردید. این توری با پخش گاز ورودی بازده پلاسما را بالا برده و باعث تشکیل پلاسما چگال‌تر می‌شود.

### ۳.۴. منابع تغذیه

در این چشمه یون که در آن از یک مگنترون با آهنرباهای دائمی استفاده شده، چشمه پلاسما نیاز به ۵ منبع تغذیه جریان مستقیم با مشخصات ذکر شده در جدول ۳-۱ دارد.

جدول ۳-۱- مشخصات منابع تغذیه مورد نیاز چشمه پلاسما

ردیف	منبع تغذیه	ولتاژ (ولت)	جریان (آمپر)	توان (وات)
۱	کاتد	۸۰-۵۰	۱۵-۲۰	۱۰۰۰
۲	تخلیه الکتریکی	۱۲۰	۵	۶۰۰
۳	پرتو	۱۵۰۰	۰/۳۰۰	۴۵۰

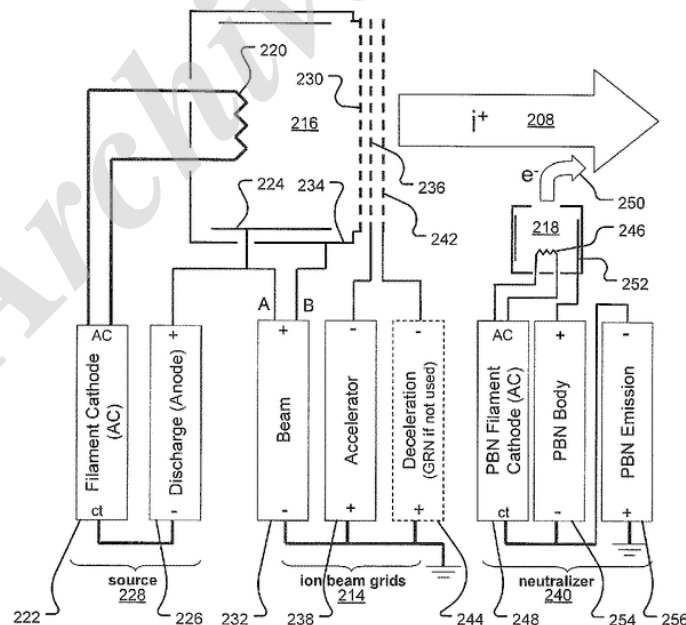
۴	شتاب دهنده	۱۵۰۰	۰/۳۰۰	۴۵۰
۵	خشتی ساز	۸۰-۵۰	۱۵-۲۰	۱۰۰۰

مقادیر ردیف‌های ۱ تا ۳ بر اساس بررسی اطلاعات مربوط به کاتولگ‌ها و پتنت‌ها (پیوست‌های ۳ و ۴) به ویژه منبع تغذیه ۲ نمونه چشمه یون تجاری شرکت‌های (Plasma Process Group و Veeco) بدست آمده است.

### ۳.۵. سامانه استخراج

اگرچه سامانه استخراج در چشمه یون جریان مستقیم، به لحاظ تعداد قطعات و مواد بکاررفته، وزن چندانی ندارد، اما پیچیدگی طراحی این سامانه برای داشتن بهره عبور بالا، شفافیت مناسب، دمای بالای ذوب، عدم میل ترکیبی و استحکام مکانیکی و سایر کمیت‌ها، زمان و هزینه بالایی را دربر داشته است [4]. ازینرو این مرحله از طرح، مطالعه کتابخانه‌ای و شبیه سازی وسیعی را به خود اختصاص داده که اهم مطالب آن به اجمال در این بخش بیان می‌گردد.

سامانه استخراج چشمه یون در این طرح از دو یا چند صفحه الکتروود چندروزنه‌ای (توری) تشکیل شده‌اند (شکل ۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰- کلی‌ترین مدار الکتریکی چشمه پرتو یون پهن جریان مستقیم

در هر الکتروود، صدها روزنه‌ی کوچک با قطر چند میلی‌متر وجود دارد. شکل‌های مختلف و الگوهای توزیع متنوعی برای روزنه‌ها وجود دارد. کسر شفافیت که به صورت نسبت مساحت روزنه‌ها به مساحت کل قسمت مشبک توری تعریف می‌شود با محدودیت‌های ساخت و تغییر شکل ناشی از توزیع حرارتی غیریکنواخت محدود می‌شود. این سامانه از اجزای مختلفی تشکیل شده که برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- توری محافظ<sup>۱</sup>
- توری شتاب‌دهنده<sup>۲</sup>
- توری کاهنده<sup>۳</sup>
- قطعات عایق‌بندی الکتریکی
- اجزای ساختاری مانند انواع پیچ و مهره‌ها
- اجزای نگهدارنده و تنظیم‌کننده مانند انواع پین‌ها
- منابع تغذیه و کابل‌های ارتباطی

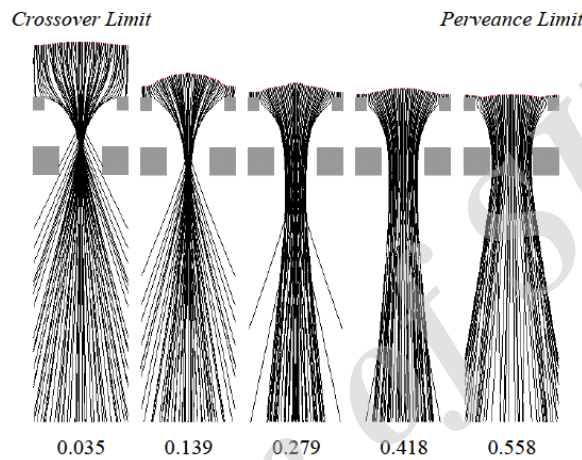
ساده‌ترین سامانه استخراج یک چشمه پرتو یون پهن، متشکل از دو توری است. توری‌ها، ورق‌های فلزی گرد نازک با قطر چند سانتی‌متر تا چند ده سانتی‌متر و با ضخامت کمتر از ۲ میلی‌متر هستند. توری‌ها با فاصله کمتر از ۲ م.م. در مجاورت یکدیگر طوری قرار می‌گیرند که روزنه توری‌ها هم‌مرکز باشند. توری اول، که در معرض پلازما است، توری محافظ و توری دوم توری شتاب‌دهنده نام دارد. توری شتاب‌دهنده همواره به پایانه منفی یک منبع تغذیه جریان مستقیم متصل است. منفی بودن توری شتاب‌دهنده باید در حدی باشد که از بازگشت الکترون‌ها به داخل توری محافظ جلوگیری کرده و همچنین باعث شتاب گرفتن یون‌ها گردد. وضعیت الکتریکی توری محافظ به مدار الکتریکی بکار رفته در چشمه یون وابسته است در چشمه یون جریان مستقیم، توری محافظ می‌تواند، در پتانسیل کاتد، آند و یا شناور (در پتانسیل پلازما) باشد. در صورتی که توری محافظ به آند متصل باشد آنگاه پتانسیل این توری با ولتاژ اعمالی به آند (که تعیین‌کننده سطح انرژی یون‌های پرتو است) برابر خواهد بود [5-6].

### ۳.۵.۱. مفاهیم کاربردی

– محدوده مجاز چگالی جریان یون  
معمولاً توری شتاب‌دهنده در اثر برخورد پرتوی یون، دچار خوردگی شده و آسیب می‌بیند. این آسیب، با چگالی جریان یونی رابطه دارد. برای کاهش این آسیب یک محدوده مجاز برای چگالی جریان یون تعریف می‌شود که توسط حد پایین (حد تقاطعی<sup>۴</sup>) و حد بالا (حد پروینس<sup>۵</sup>) محدود می‌شود. حد پائین، عبارت از کمترین چگالی جریانی است که پرتوی یون خارج شده از توری محافظ (توری اول) بدون برخورد (یا کمترین برخورد)

<sup>1</sup> -Screen Grid  
<sup>2</sup> -Accelerator Grid  
<sup>3</sup> -Deceleration  
<sup>4</sup> -Crossover Limit  
<sup>5</sup> -Perveance Limit

از توری دوم عبور می کند. در کمتر از این چگالی جریان به علت همگرا شدن زود هنگام ریز پرتوها<sup>۱</sup> و سپس واگرا شدن آنها، پرتوی یون به توری دوم (شتاب دهنده) آسیب می رساند. حد بالا، بیشترین چگالی جریانی است که پرتو یون خارج شده از توری محافظ، بدون برخورد (یا با کمترین برخورد) از توری شتاب دهنده عبور می کند. در بیشتر از این چگالی جریان، پرتوی یون به علت واگرا شدن زود هنگام ریز پرتوها، به توری دوم آسیب می رساند (شکل ۳-۱۱). این محدوده عملاً جائیست که در آن همواره  $\frac{I_a}{I_b} \leq 0.1$  است.  $I_a$  و  $I_b$  به ترتیب، جریان منابع تغذیه شتاب دهنده و پرتو هستند [4].



شکل ۳-۱۱- مسیر یون های پرتاب شده از غلاف

- کسر پروینس

این تابع بر اساس قانون چاید- لانگمیر<sup>۲</sup> که بیشینه جریان قابل عبور بین دو سطح با پتانسیل مختلف را بیان می کند، بصورت نسبت جریان واقعی استخراج شده در هر ریز پرتو، به بیشینه جریانی که در صورت آرمانی بودن شرایط، می توانست استخراج شود تعریف می گردد (معادله ۳-۱).

$$f_p = j \frac{1}{P_{Max}} \frac{I_e^2}{V_T^{3/2}} \quad \{Dimensionless\}$$

$$P_{Max} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \left\{ \frac{A}{V^{3/2}} \right\}$$

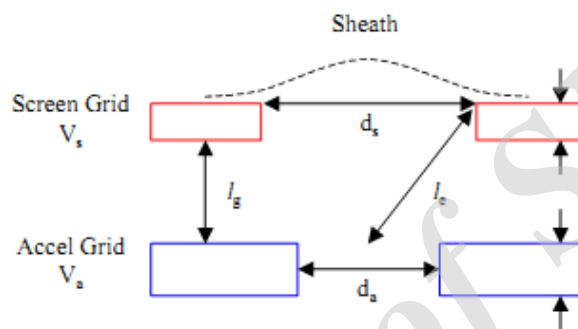
$$l_e = \sqrt{(l_g + t_s)^2 + \frac{d_s^2}{4}} \quad \{m\}$$

۱-۳

<sup>۱</sup> -Beamlet

<sup>۲</sup> Child-Langmuir

$j$  چگالی جریان یون،  $P_{Max}$  بیشینه ثابت پروینس،  $V_T$  ولتاژ شتاب دهنده،  $l_e$  طول شتاب مؤثر یون،  $t_s$  ضخامت توری محافظ،  $l_g$  فاصله دو توری و  $d_s$  قطر سوراخ‌های توری محافظ است. طول شتاب مؤثر را می‌توان فاصله‌ای از غلاف دانست که در پتانسیلی برابر ولتاژ خالص شتاب دهنده قرار دارد. غلاف (شکل ۳-۱۲) به عنوان مثال نزدیک لبه‌های سوراخ‌ها نزدیک توری محافظ و در وسط سوراخ‌ها به سمت چشمه پلازما خمیده است. طول شتاب مؤثر در سراسر غلاف کمابیش ثابت است [4-5]



شکل ۳-۱۲ - غلاف و کمیت‌های کسر پروینس

- کسر شفافیت توری‌ها

دو نوع کسر شفافیت برای توری‌ها قابل تعریف است.

تعریف اول کسر شفافیت فیزیکی توری‌هاست و نسبت قسمت شفاف توری به کل سطح آن را نشان می‌دهد و از رابطه ۲-۳ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\text{Open Area}}{\text{Total Area}} = \frac{\frac{\pi d_s^2}{4}}{\frac{\sqrt{3} l_{cc}^2}{2}} = \frac{\pi d_s^2}{2\sqrt{3} l_{cc}^2} \quad 2-3$$

کمیت  $l_{cc}$  در مخرج کسر، تعریف فاصله بین مراکز دو سوراخ مجاور هم در توری است. ضریب  $\sqrt{3}/2$  نیز مربوط به محاسبه مساحت ۶ ضلعی محاصره کننده هر سوراخ است، زیرا ایجاد سوراخ‌های توری به نحوی انجام می‌شود که مجموعه تمام سوراخ‌ها در یک ۶ ضلعی ایجاد می‌گردد که متشکل از ۶ ضلعی‌های محاصره کننده هر سوراخ است. این کمیت بیشتر برای توری محافظ تعریف می‌شود.

تعریف دوم، کسر شفافیت توری نسبت به یون است که میزان عبوردهی یون از توری‌ها را نشان می‌دهد. این کمیت، برابرنسبت جریان یون استخراج شده به جریان کل تولید شده (جریان استخراج شده + جریان اتلافی) است. کسر شفافیت توری نسبت به یون با افزایش چگالی جریان یون کاهش می‌یابد. این کمیت برابر یا کمی بزرگتر از کسر شفافیت فیزیکی توری‌هاست و از رابطه زیر (۳-۳) تعریف می‌شود.

$$\phi = [I_b / (I_a + I_b + I_s)] \times 100 \quad 3-3$$

در چشمه یون پهن جریان مستقیم، جریان اتلافی برابر مجموع جریان دو توری است. در حالیکه در چشمه یون بسامد رادیویی، جریان اتلافی فقط به جریان عبوری از توری شتاب‌دهنده اطلاق می‌شود. کمیت  $I_s$  جریان توری محافظ است [4]

### - پتانسیل لازم برای جلوگیری از بازگشت الکترون

برای جلوگیری از بازگشت الکترون به داخل فضای دو توری و خنثی شدن یون‌ها، لازم است پتانسیل منفی توری شتاب‌دهنده به قدر کافی بزرگ باشد. بزرگ کردن بیش از اندازه ولتاژ توری شتاب‌دهنده، باعث برخورد بیشتر یون‌ها و کاهش طول عمر آن می‌شود. شکل ۳-۴ تغییر پتانسیل در طول محور عمود بر توری‌ها را نشان می‌دهد. ولتاژ نقطه عطف<sup>۱</sup>، پتانسیل بازگشت الکترون‌ها به سمت توری شتاب‌دهنده را تعیین می‌کند. این پتانسیل متأثر از عوامل زیادی مثل ولتاژ و قطر سوراخ‌های توری شتاب‌دهنده، جریان پرتو، و فاصله بین توری‌ها است. با افزایش چگالی جریان ریزپرتو تا  $0.2$  میلی‌آمپر، بزرگی پتانسیل نقطه عطف کاهش و بعد از آن ثابت می‌ماند [7-10].

### ۳.۵.۲. عوامل موثر در طراحی سامانه استخراج

برای طراحی یک سامانه استخراج بهینه به پارامترهای بسیاری باید توجه کرد که از آن جمله می‌توان به قطر روزنه‌ها، کسر شفافیت و ضخامت توری‌ها، فاصله توری‌ها از هم و مشخصات منابع تغذیه سامانه استخراج اشاره کرد.

#### - فاصله دو توری ( $l_g$ )

تغییر فاصله دو توری، تاثیر مستقیم بر پارامترهای مختلف پرتوی یون خواهد داشت. با کاهش فاصله دو توری، محدوده مجاز چگالی جریان افزایش می‌یابد بعلاوه باعث افزایش شفافیت توری‌ها نسبت به یون می‌شود. این دو عامل امکان دستیابی به جریان‌های یونی بالاتر را میسر می‌سازند. در این شرایط میزان گاز مصرفی برای تولید یک جریان یونی مشخص، کاهش می‌یابد. این رفتار، ناشی از افزایش جریان هر ریزپرتو با کاهش فاصله است. از طرفی با این کاهش فاصله، قدر مطلق ولتاژ توری شتاب‌دهنده که برای برگرداندن الکترون‌ها کافی باشد نیز، افزایش می‌یابد که باعث کاهش طول عمر توری دوم می‌شود.

#### - قطر سوراخ‌های توری شتاب‌دهنده ( $d_g$ )

افزایش قطر سوراخ‌های توری شتاب‌دهنده، باعث افزایش جریان یونی و افزایش محدوده مجاز جریان (یعنی جریان بین حدهای بالا و پائین) می‌شود ولی واگرایی پرتو یونی را کاهش می‌دهد. بزرگ کردن قطر سوراخ‌های توری شتاب‌دهنده بازگشت الکترون‌ها به داخل چشمه یون را آسان می‌کند، برای ممانعت از بازگشت آنها باید پتانسیل الکتریکی توری را افزایش داد، این امر باعث کاهش طول عمر توری

<sup>1</sup>  $V_{saddle\ point}$



شتابدهنده می شود اما جریان یونی برخورد کننده به این توری (جریان اتلافی) را کاهش می دهد. بعلاوه خروج گازهای غیر یونیده از داخل چشمه پلاسما و بنابراین مصرف گاز نیز افزایش می یابد. با ایجاد تعادل بین پارامترهای مختلف مورد نظر در یک چشمه یونی و با در نظر گرفتن اثر تغییر قطر سوراخ بر این پارامترها، قطر بهینه برای سوراخ های توری شتابدهنده را تعیین می کنیم.

#### - ضخامت توری شتابدهنده ( $t_a$ )

یکی از مزایای افزایش ضخامت توری شتابدهنده، ایجاد پتانسیل منفی تر در محور هر سوراخ است که باعث افزایش مقاومت در مقابل برگشت الکترون در یک  $V_a$  ثابت است. مزیت دیگر، جرم بیشتر توری است که باعث طول عمر بیشتر در برابر یک خوردگی ثابت می شود. اما با افزایش جریان برخورد کننده به توری شتابدهنده (جریان اتلافی)، نرخ خوردگی توری بیشتر شده و طول عمر آن کاهش می یابد. از طرفی با افزایش ضخامت توری شتابدهنده، محدوده مجاز جریان با افزایش ضخامت کاهش می یابد. حد بالای جریان تغییر چندانی ندارد. اما حد پایین آن به طور محسوسی افزایش می یابد. مصرف گاز با افزایش ضخامت این توری افزایش می یابد زیرا، ولتاژ لازم ( $V_a$ ) برای جلوگیری از بازگشت الکترون ها کم می گردد. بنابراین ذرات غیر یونیزه بیشتری هم قادر به عبور از توری ها می شوند (۳-۱۴).

#### - ضخامت توری محافظ ( $t_s$ )

با کم کردن ضخامت توری محافظ، غلاف پلاسما از این توری فاصله می گیرد که باعث کاهش جریان اتلافی در توری محافظ و بالطبع افزایش شفافیت نسبت به یون می شود این امر جریان یونی قابل استخراج را افزایش می دهد. بعلاوه به علت دور شدن غلاف از توری و غیرمسطح تر شدن آن، واگرایی پرتو افزایش می یابد. اما نازک کردن بیش از حد این توری، باعث بر همکنش غلاف پلاسما در سوراخ های مجاور و تغییر شکل مقطع پرتوها می شود.

با افزایش ضخامت توری محافظ در محدوده مجاز جریان (بین حد بالا و پایین)، که تقریباً پهنای مشخصی دارد، به جریان های بالاتر منتقل می شود. در یک  $V_a$  ثابت، با افزایش ضخامت توری محافظ، پتانسیل نقطه عطف ( $V_{saddle\ point}$ )، منفی تر می شود که موجب افزایش مقاومت نسبت به بازگشت الکترون ها می گردد. بطور کلی با افزایش جریان یونی، مقاومت نسبت به بازگشت الکترون ها کم می شود.

#### - ولتاژ توری شتابدهنده ( $V_A$ )

ولتاژ منفی توری شتابدهنده، علاوه بر استخراج یون ها نرخ خوردگی را بالا برده، از بازگشت الکترون ها به داخل توری ها نیز جلوگیری می کند. اما بالا بردن این ولتاژ، باعث افزایش نرخ خوردگی توری شتابدهنده می شود. واگرایی پرتو یون نیز، با منفی تر کردن پتانسیل این توری، افزایش می یابد.

#### - جنس توری ها

توری باید از ماده‌ای ساخته شود که بازده کندوپاش کمی داشته باشد. از طرفی هرچه چگالی ماده توری بیشتر باشد با برخورد یک یون به آن درصد کمتری از جرم آن جدا می‌شود. استفاده از کربن پیرولیتیک یا پیروکربن<sup>۱</sup> و کامپوزیت C-C<sup>۲</sup> مناسب‌ترین هستند. مولیدن در مرتبه بعد قرار می‌گیرد زیرا علیرغم چگالی پایین، ضریب کندوپاش بیشتری دارد. اما ماشینکاری و ساخت توری‌های مولیدنی (به علت لایه ای بودن) یا کربنی (به علت شکنندگی) با مشکلاتی همراه است. بنابراین استفاده از استیل ۳۰۴ با توجه به ضریب کندوپاش و چگالی متوسطی که دارد پیشنهاد می‌شود. ساخت توری‌های استیل ۳۰۴ با انواع روش‌های ماشینکاری به سهولت امکان‌پذیر است. بعلاوه اگر جریان اتلافی (جریان یونی برخورد کننده به توری دوم) در حد پایین باشد، تاثیرات منفی ضریب کندوپاش و چگالی متوسط این توری‌ها بسیار ناچیز خواهند بود.

در پایان این بخش یادآور می‌گردد عوامل دیگری نیز در عملکرد توری‌ها موثر است. مانند زاویه‌دار کردن روزنه توری‌ها، هم مرکز بودن روزنه‌ها<sup>۳</sup> که گاهی برای به‌دست‌آوردن کیفیت‌های خاصی از پرتو یون، از غیر هم مرکز کردن آن‌ها بهره می‌گیرند. اما با این حال اهم کمیت‌های مرتبط با سامانه استخراج، در بخش‌های قبل بیان گردیده است [6-8].

### ۳.۶. شبیه سازی

در این بخش با هدف تأیید نتایج مطالعات انجام شده و برای بدست آوردن نتایج کمی‌تر، شبیه‌سازی رفتار پرتو با تغییر برخی پارامترهای مهم طراحی انجام می‌شود.

در شبیه‌سازی رفتار پرتو باید مراحل سه‌گانه تشکیل آن (شامل گسیل یون‌ها از پلاسما، شتاب‌گیری یون‌ها در سامانه استخراج و نهایتاً برهم‌نهی ریزپرتوها) و پدیده‌های فیزیکی مانند محدودیت جریان استخراجی و واگرایی ذاتی پرتو به علت اثر بار-فضا در نظر گرفته شود. شکل و مکان این سطح گسیل که مرز بین پلاسما و خلأ است با استفاده از نظریه غلاف و به صورت حل یک مسأله خودسازگار بدست می‌آید [9].

در این پژوهش، از نرم‌افزار CST استفاده شده است، زیرا از همه قابلیت‌های مذکور بجز تعیین مشخصات هلال پلاسما، برخوردار است. با این حال، می‌توان در اجزای مختلف شکل‌ها و مکان‌های متفاوتی برای هلال پلاسما در نظر گرفت و تأثیر آن را بر رفتار پرتو بررسی کرد.

در این مرحله، رفتار یک ریزپرتو در یک سامانه استخراج با دو الکتروود تک‌روزنه‌ای شبیه‌سازی و تأثیر کیفی و کمی پارامترهای مختلف بر مشخصات ریزپرتو بررسی گردیده است.

#### ۳.۶.۱. معرفی نرم‌افزار

نرم‌افزار CST Particle Studio، یک نرم‌افزار تجاری برای شبیه‌سازی حرکت ذرات باردار در میدان‌های الکترومغناطیسی است. ردیابی ذره در حالت ایستا یکی از رهیافت‌های اصلی این نرم‌افزار برای حل مسائل الکترومغناطیسی است که در آن مسیر حرکت ذرات باردار در میدان‌های الکتروستاتیک، مغناطوستاتیک و

<sup>۱</sup> Pyrolytic Carbon

<sup>۲</sup> نوعی کربن با ساختاری شبیه گرافیت که ورق‌های گرافن (گرافیت با یک لایه اتمی) آن با پیوند کووالنت متصل شده‌اند

<sup>۳</sup> Alignment

ویژه مد بدست می آید. این رهیافت قادر به بکارگیری اثر بارفضا و مدل های گسیلی مختلف مانند گسیل گرمایونی و گسیل ثانویه می باشد.

### - فراسنج ها<sup>۱</sup>

#### • فراسنج های متغیر

فراسنج های متغیر بهینه سازی، فراسنج های مؤثر بر اپتیک یونی هستند که به دو گروه فراسنج های هندسی (ابعاد روزنه ها، ضخامت الکترودها، فاصله میان الکترودها) و فراسنج های کنترلی (ولتاژ الکترودها، شکل و مکان هلال پلازما) تقسیم می شوند. شکل و مکان هلال پلازما<sup>۲</sup> با تنظیم چگالی پلازما کنترل می شود. با افزایش چگالی پلازما، شعاع انحنای هلال افزایش می یابد و برعکس. در شبیه سازی انجام شده، تأثیر شکل هلال پلازما (و در نتیجه، به طور غیرمستقیم، تأثیر چگالی پلازما)، نیز بررسی می گردد.

#### - فراسنج های هدف

نرم افزار CST، برخی از مهم ترین فراسنج ها در پرتو ذرات باردار را به صورت خودکار محاسبه می کند. جریان گسیلی، پروینس، ضریب گسیل<sup>۳</sup> و قطر پرتو، چهار نمونه از این پارامترها هستند. جریان گسیلی همان جریان ریزپرتو است. منظور از قطر پرتو، قطر مؤثر ریزپرتو است که درصد مشخصی (اغلب، ۹۵ درصد) از جریان آن درون این قطر قرار می گیرد. پروینس که به مشخصات هندسی سامانه استخراج بستگی دارد همان ضریب تناسب در قانون چایلد-لانگمیر است:

$$J = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2q}{m}} \frac{(\Delta V)^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad \text{معادله ۳-۴}$$

ضریب گسیل  $\epsilon_x$  که یک کمیت آماری است، معرف گستردگی توزیع ذرات در فضای مکان-سرعت است. این ضریب با معادله زیر تعریف می شود:

$$x' = \frac{v_x}{v_{normal}}, \langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

معادلات ۳-۵

$$\epsilon_x = \sqrt{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle \langle (x' - \langle x' \rangle)^2 \rangle} - \langle (x - \langle x \rangle)$$

<sup>1</sup> Parameters  
<sup>2</sup> Plasma Cusp  
<sup>3</sup> Emittance

منظور از زاویه واگرایی پرتو، نیم‌زاویه مخروط ریزپرتو با قطر موثر است. بنابراین، اگر پارامترهای  $r_1$  و  $r_2$  معرف شعاع مقطع ریزپرتو در دو مکان مختلف با فاصله  $Z$  باشد زاویه واگرایی آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta = \text{Arctan} \left( \frac{r_1 - r_2}{Z} \right) \quad \text{معادله ۳-۶}$$

جدول ۳-۲ معرف فهرست فراسنج‌های شبیه‌سازی و مقادیر آنها در مدل اولیه است.

جدول ۳-۲- فراسنج‌های شبیه‌سازی توری‌ها			
مقدار اولیه	نماد	نام فراسنج	نوع فراسنج
۱.م.م	$t_s$	ضخامت الکتروود محافظ	پارامترهای هندسی:
۱.م.م	$t_a$	ضخامت الکتروود شتابدهنده	
۲.م.م	$l_g$	فاصله میان دو الکتروود	
۲.م.م	$d_s$	قطر روزنه الکتروود محافظ	
۲.م.م	$d_a$	قطر روزنه الکتروود شتابدهنده	
۲.۵.م.م	$l_{cc}$	فاصله مراکز دو روزنه مجاور در توری	پارامترهای کنترلی:
۴۰۰ ولت	$V_s$	ولتاژ توری محافظ	
۱۰۰- ولت	$V_a$	ولتاژ توری شتابدهنده	
-	$I$	جریان پرتو	پارامترهای هدف:
-	$R$	قطر موثر پرتو	
-	$\theta$	زاویه واگرایی	

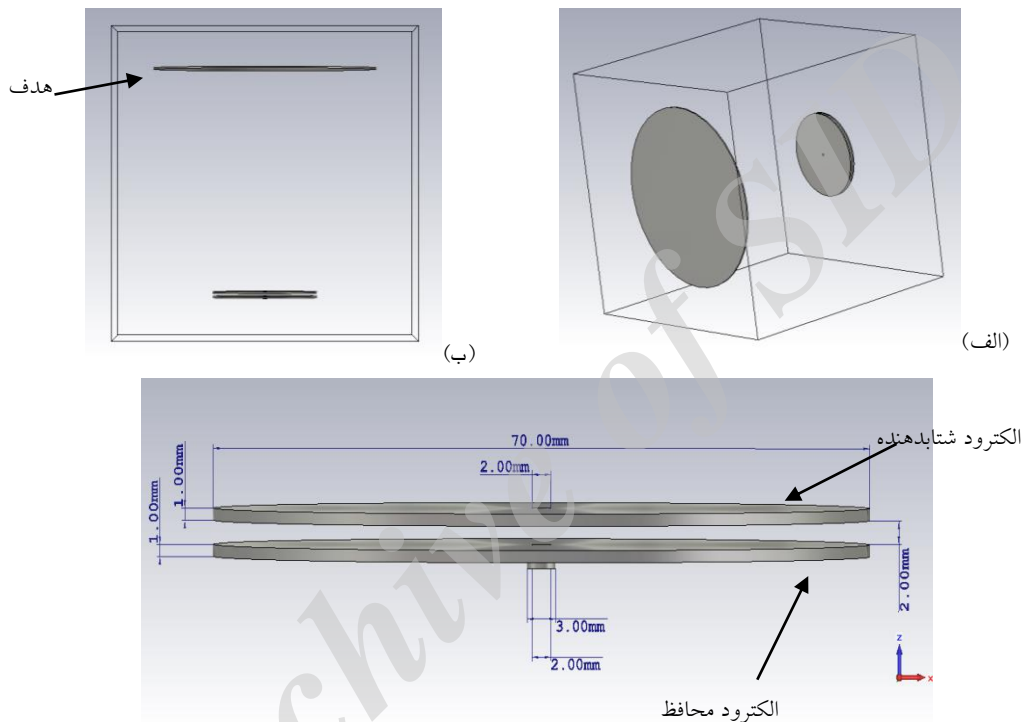
کمیت  $l_e$  فاصله مؤثر دو الکتروود است که از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$l_e = \sqrt{(l_g^2 + t_s^2)^{1/2} + \frac{d_s^2}{4}} \quad \text{معادله ۳-۷}$$

نیز در این جدول، ولتاژ توری محافظ برابر با  $T_e - V_{anode}$  است که  $V_{anode}$  ولتاژ آند و  $T_e$  دمای الکترون (برحسب ولت) است. مقدار پیش‌فرض ولتاژ آند و دمای الکترون به ترتیب برابر ۴۱۰ و ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است.

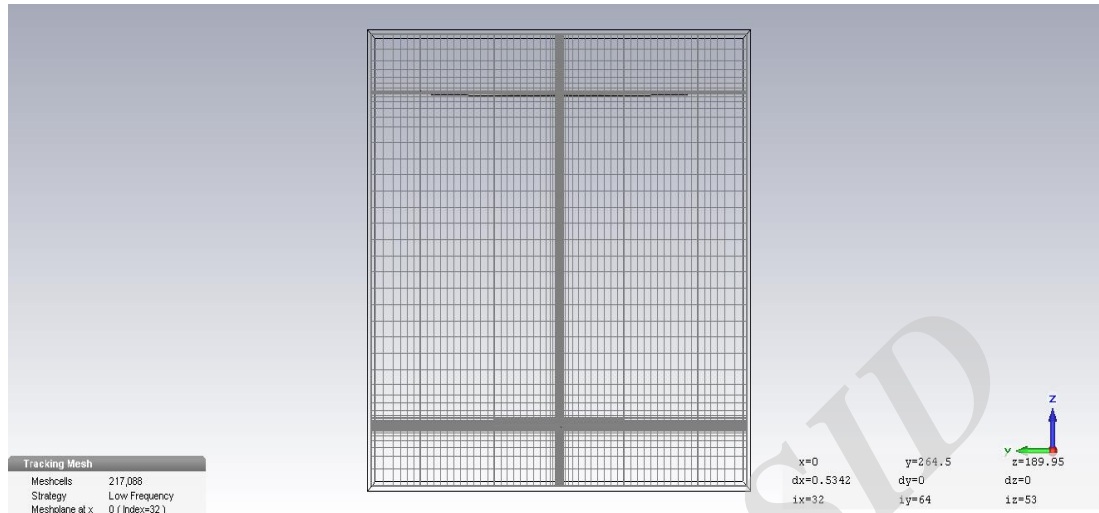
### ۳.۶.۲. مدل اولیه

سامانه استخراج مورد بررسی، متشکل از دو الکتروود (توری محافظ و توری شتابدهنده) است. الکتروودها تک-روزنه‌ای و از جنس رسانای کامل و روزنه‌ها به شکل استوانه گرد هستند. در همه مدل‌های شبیه‌سازی، قطر خارجی الکتروودها ۷۰ میلی‌متر است و یک قرص رسانا به قطر ۱۵۰ م.م. و ضخامت ۱ م.م.، در فاصله ۱۵۰ م.م. از الکتروود شتابدهنده قرار دارد. در شکل ۳-۱۳-الف و ب اجزای مختلف مدل هندسی ۳ بعدی در جعبه شبیه‌سازی در دو نمای مختلف و در شکل ۳-۱۳-ج ابعاد الکتروودها و روزنه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳- نمایش ۲ و ۳ بعدی الکتروودها و هدف (الف و ب)، ابعاد واقعی الکتروودها در شبیه‌سازی

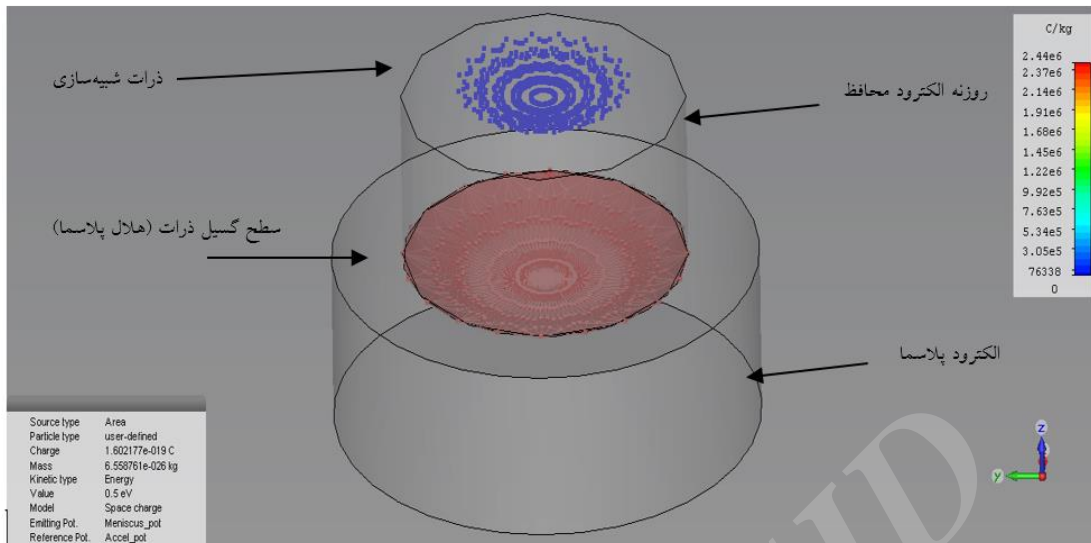
در شکل ۳-۱۴ شبکه‌بندی مدل در مقطع عرضی نشان داده شده است. بیش از ۲۱۷ هزار سلول برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱۴- شبکه بندی مدل در مقطع عرضی

همچنین، انرژی اولیه یون‌های آرگون در ریزپرتو  $0/5$  الکترون‌ولت در نظر گرفته شده است، و برای گسیل یون‌ها از سطح هلال پلاسما<sup>۱</sup> از مدل گسیلی بارفضا استفاده شده است. در شکل ۳-۱۵، مکان مجازی گسیل ذرات شبیه‌سازی که به صورت خودکار توسط نرم‌افزار تعیین می‌گردد نشان داده شده است. در این مدل تعداد ۷۱۶ ذره شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. پتانسیل سطح گسیل ذرات برابر با ولتاژ توری محافظ، و ولتاژ الکتروود شتابدهنده به‌عنوان پتانسیل مرجع در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار، یک پارامتر کنترلی برای تنظیم مکان گسیل مجازی ذرات وجود دارد که با  $d_{VC}$  تعریف و مقدار پیش‌فرض آن، برابر  $d_{VC} = 1/5$  در نظر گرفته شده است.

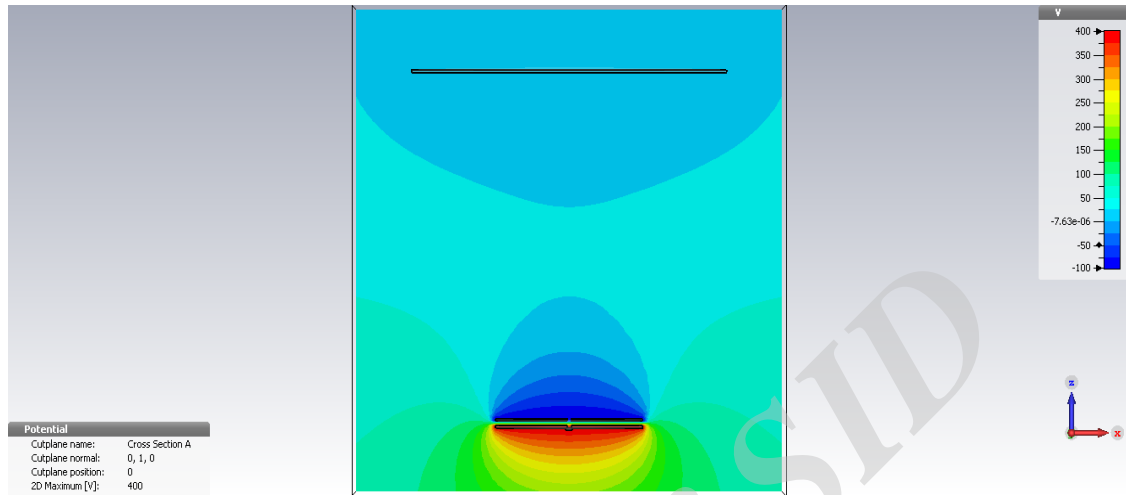
<sup>۱</sup> Plasma Cusp



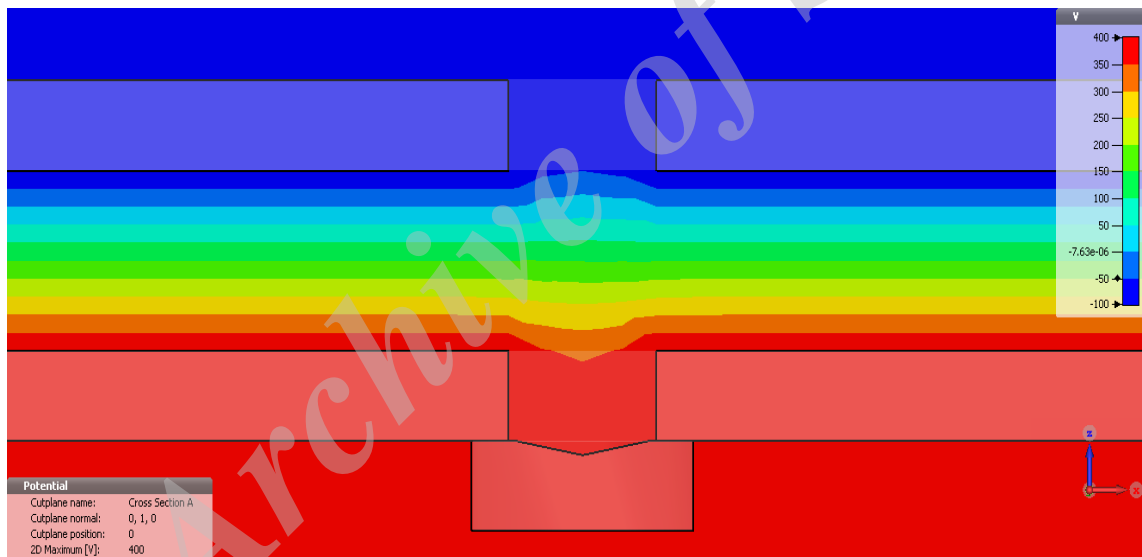
شکل ۳-۱۵- مکان مجازی ذرات گسیل شبیه سازی

### ۳.۶.۳. نتایج مدل اولیه

در شکل ۳-۱۶، توزیع پتانسیل الکتریکی در صفحه  $y = 0$  مدل نشان داده شده است.



(الف)

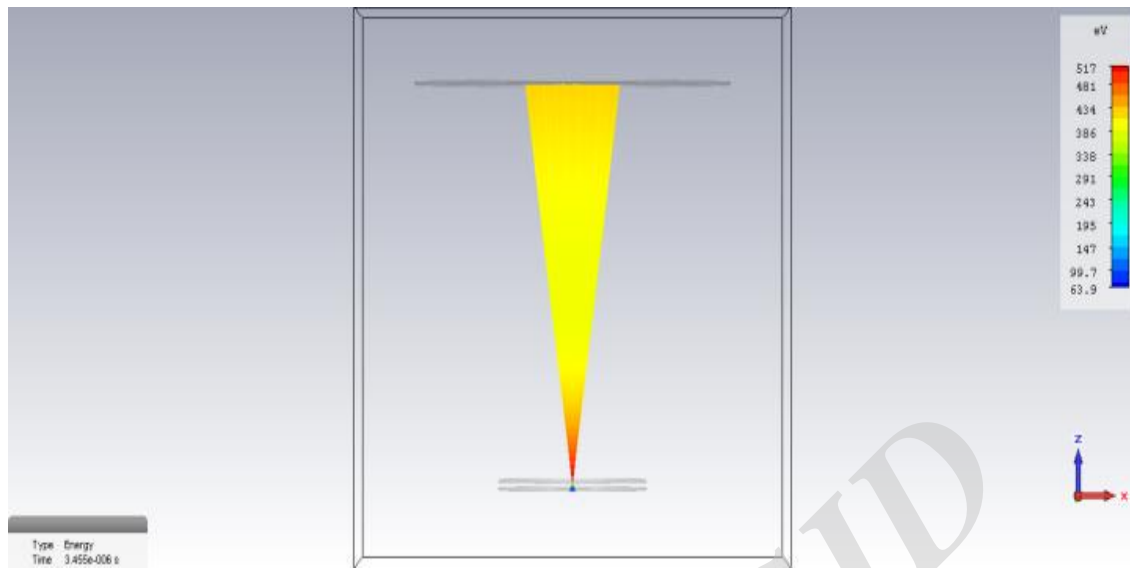


(ب)

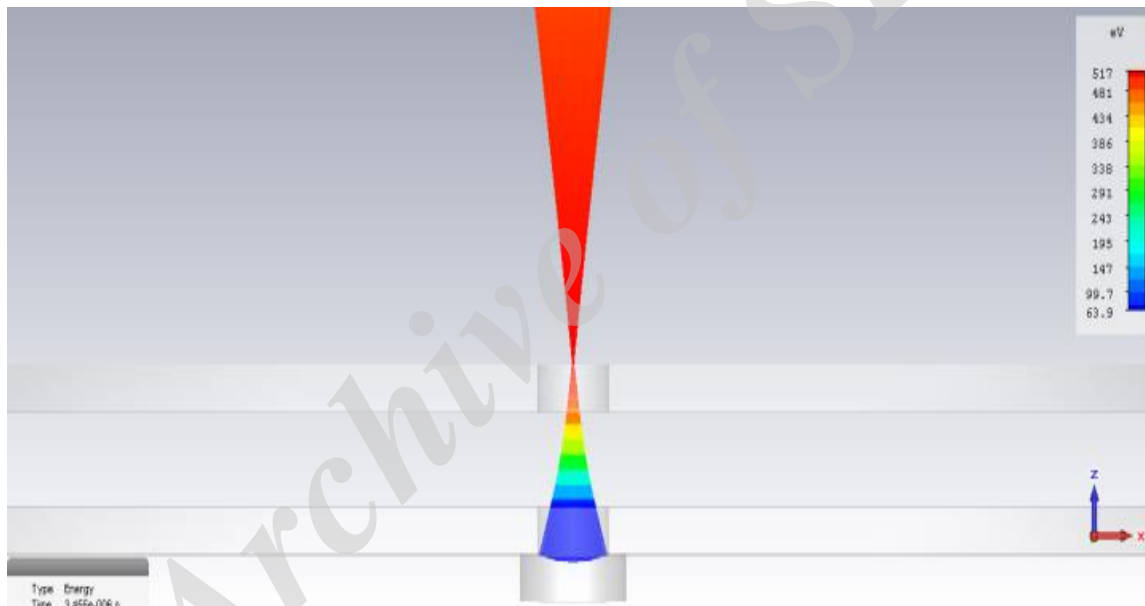
شکل ۳-۱۶- توزیع پتانسیل الکتریکی در صفحه  $y = 0$ : (الف) در کل مدل و (ب) در مجاورت روزنه‌ها.

در شکل ۳-۱۷، مسیر ذرات در مدل مورد بررسی نشان داده شده است.





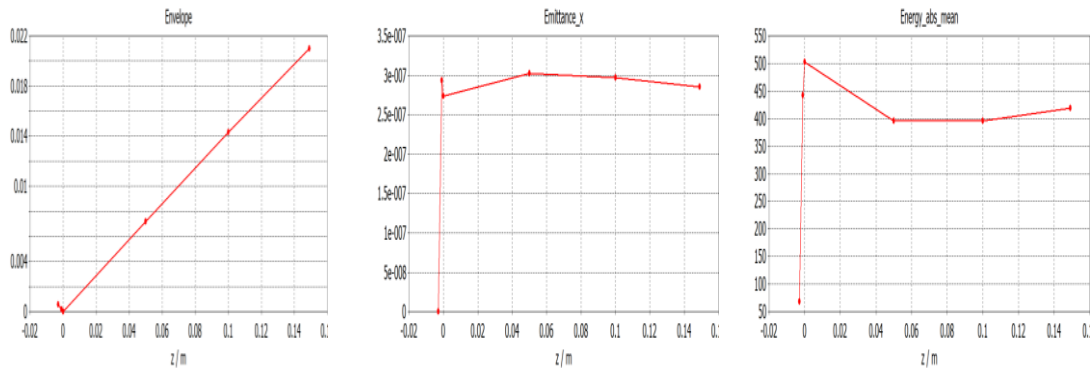
(الف)



(ب)

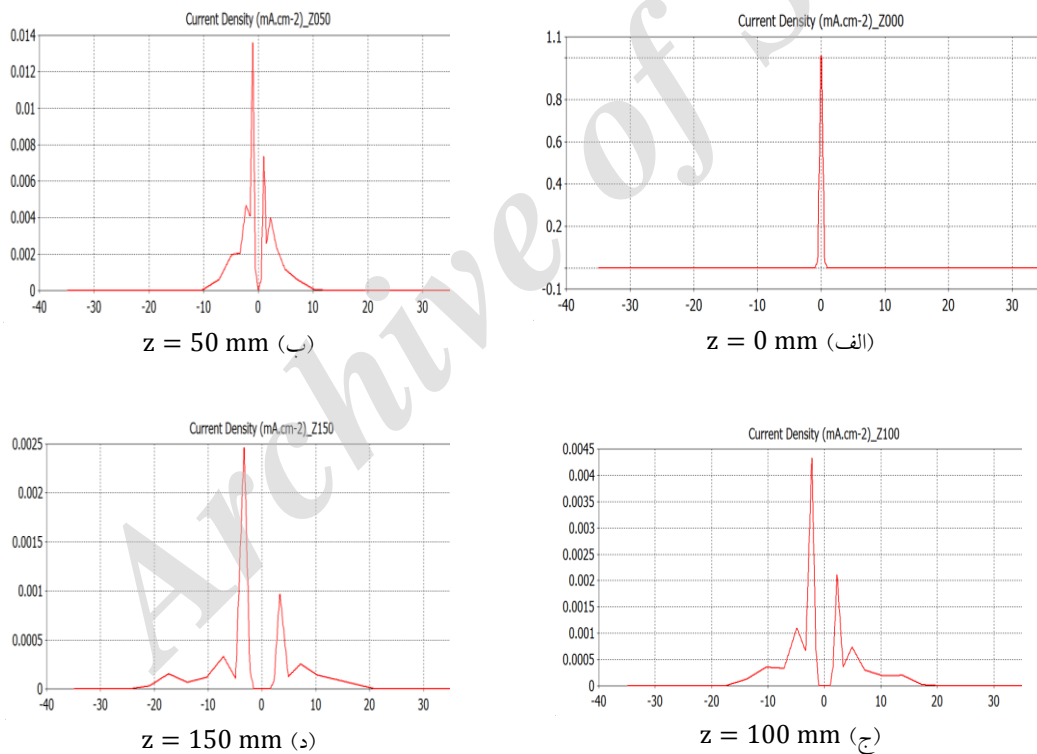
شکل ۳-۱۷- مسیر ذرات (الف) در کل مدل و (ب) در مجاورت روزنه‌ها.

جریان و پروینس پرتو به ترتیب برابر با  $3/499.03$  میکروآمپر و  $3/12963 \times 10^{-10}$  و زاویه واگرایی پرتو  $7/63547$  درجه است. نمودار تغییرات انرژی متوسط ذرات، شعاع مؤثر و ضریب گسیل پرتو در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- تغییرات انرژی متوسط ذرات (راست)، شعاع مؤثر پرتو (وسط) و ضریب گسیل پرتو در راستای Z.

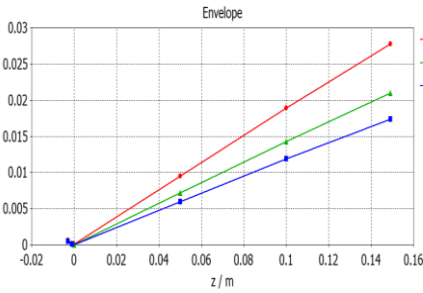
در شکل ۳-۱۹، نمودار توزیع چگالی جریان پرتو در مقطع عرضی در فواصل مختلف از شتابدهنده نشان داده شده است.



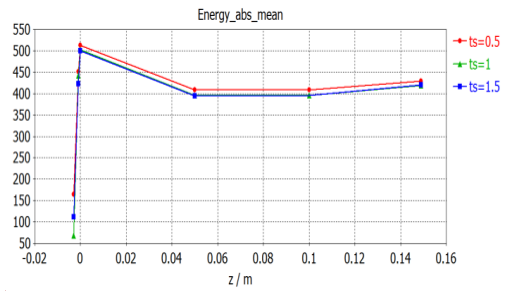
شکل ۳-۱۹- نمودار توزیع چگالی جریان پرتو در مقطع عرضی در فواصل مختلف از الکتروود شتابدهنده.

### - تأثیر ضخامت الکتروودها

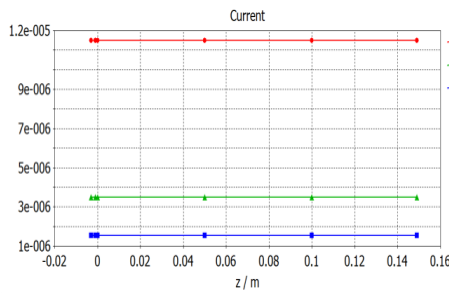
در شکل ۳-۲۰ نمودار تغییرات مهمترین پارامترهای هدف برای مقادیر مختلف ضخامت الکتروود محافظ نشان داده شده است. تغییر پارامتر  $t_s$  از ۰/۵ تا ۱/۵، موجب کاهش جریان به میزان بیش از ۵ برابر و کاهش واگرایی پرتو به میزان ۲ برابر شده است.



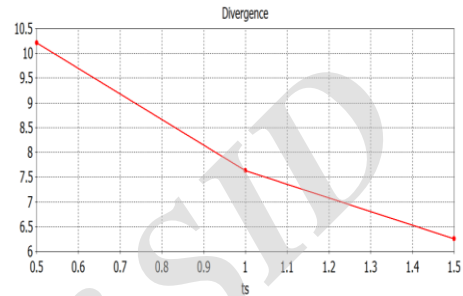
(ب)



(الف)



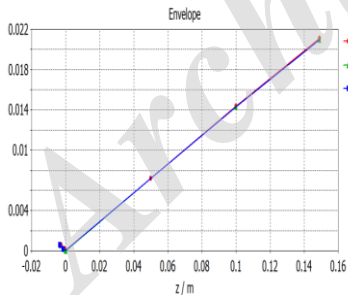
(د)



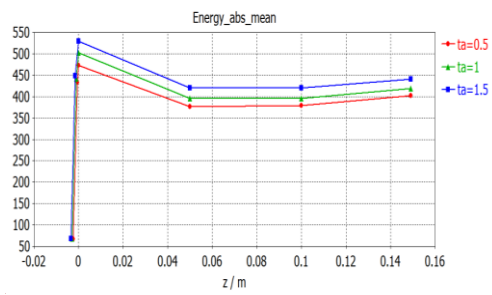
(ج)

شکل ۳-۲۰- نمودار تغییرات پارامترهای هدف برای مقادیر مختلف ضخامت الکتروود محافظ؛ (الف) انرژی، (ب) شعاع پرتو، (ج) زاویه واگرایی، (د) جریان

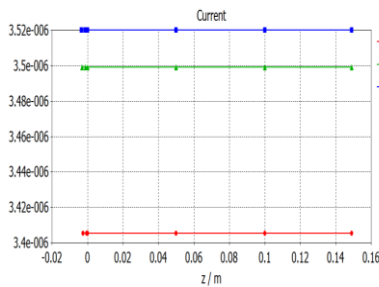
در شکل ۳-۲۱ نمودار تغییرات پارامترهای مهم هدف برای مقادیر مختلف ضخامت الکتروود شتاب- دهنده نشان داده شده است. مطابق شکل فوق، تغییر پارامتر  $t_a$  از  $0.5$  تا  $1.5$ ، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای پرتو ندارد.



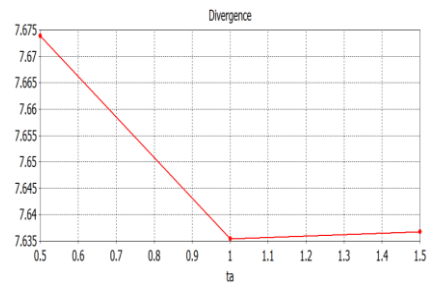
(ب)



(الف)



(د)

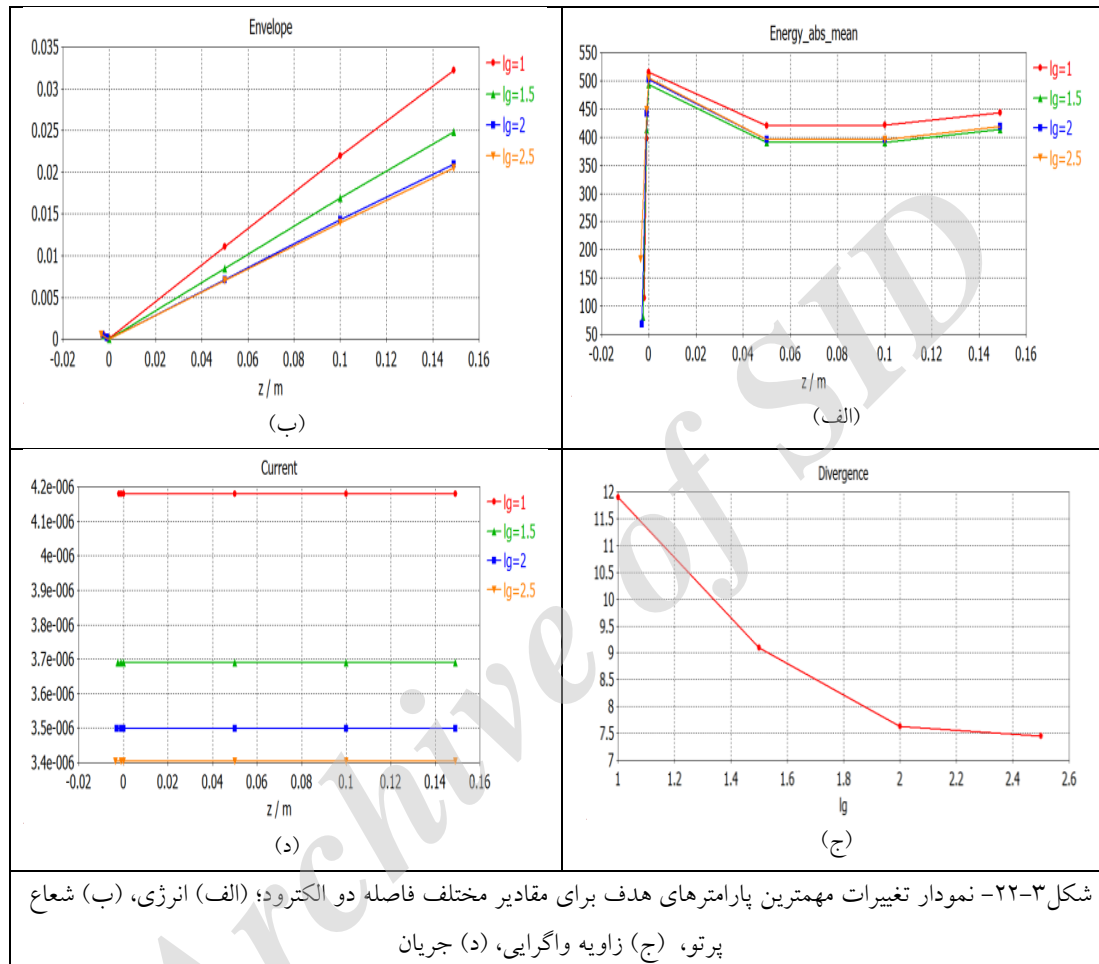


(ج)

شکل ۳-۲۱- تغییرات پارامترها با ضخامت توری شتاب دهنده: (الف) انرژی، (ب) شعاع پرتو، (ج) زاویه واگرایی، (د) جریان

### تأثیر فاصله الکترودها

در شکل ۳-۲۲، نمودار تغییرات پارامترهای هدف برای فواصل مختلف دو الکتروود نشان داده شده است.



مطابق این شکل، تغییر پارامتر  $I_g$  از ۱ تا ۲/۵ م.م. موجب کاهش ۱/۲ برابری جریان و به طور همزمان موجب کاهش ۱/۶ برابری واگرایی پرتو شده است.

### قطر روزنه‌ها

کاهش قطر روزنه‌ها باعث کاهش جریان پرتوی خروجی و افزایش آن‌ها اگرچه باعث افزایش جریان می‌شود، اما هدر رفت گاز و نیز کاهش تعداد آن‌ها را سبب می‌گردد، که به نوبه خود اثر افزایش جریان را خنثی می‌سازد. ازینرو از شبیه‌سازی این بخش، صرف نظر گردید.

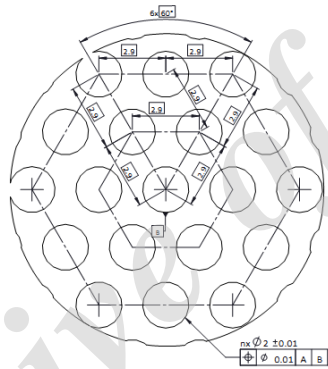
با این حال، آرایه روزنه‌ها، بدون تغییر قطرشان، از وضعیت چهار گوش به شش ضلعی تغییر داده شد که موجب افزایش تعداد روزنه‌ها با حفظ قطر آن‌ها و در نتیجه باعث افزایش کسر شفافیت هندسی توری‌ها و جریان پرتو گردید.

### ۳.۷. طراحی و ساخت سامانه استخراج

با استفاده از مطالب بخش‌های قبل و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر طراحی بهینه توری، نتیجه‌گیری کرده و بر این اساس از میان طرح‌های پیشنهاد شده برای قسمت مشبک توری و نحوه بستن آنها، طرح نهایی که مورد استفاده قرار گرفت تشریح می‌شود.

#### ۳.۷.۱. توری‌ها:

- آرایه شش ضلعی بیشترین کسر شفافیت را در چینش روزنه‌ها ایجاد می‌کند.
- برای توری با قطر روزنه ۲ م.م. کسر شفافیت ۴۳٪ انتخاب شده است. (فاصله مراکز دو روزنه مجاور، ۲/۹ میلی‌متر) (شکل ۳-۲۳).



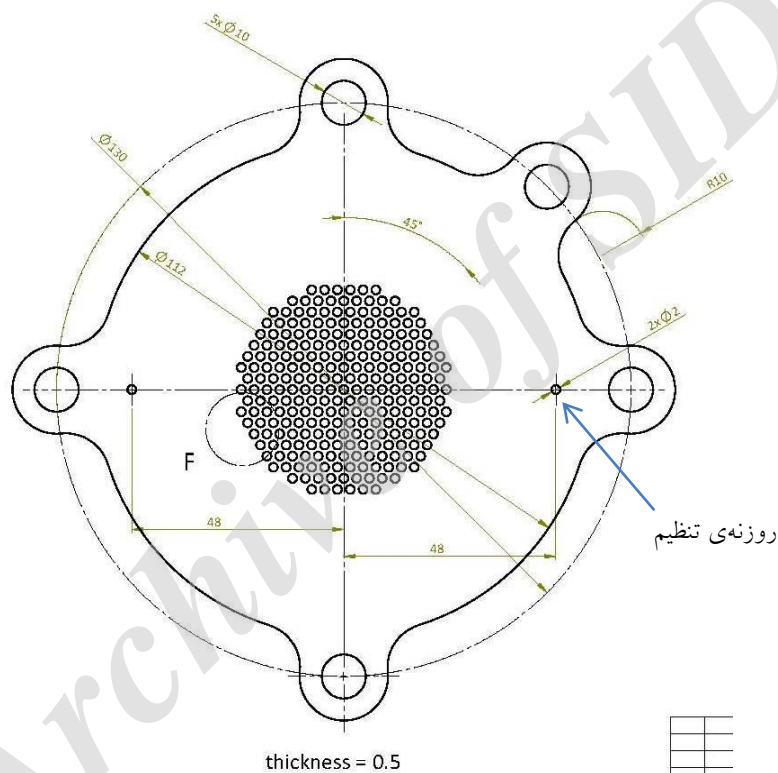
شکل ۳-۲۳- آرایش روزنه توری‌ها

- فاصله توری‌ها در محدوده ۲- ۱/۵ م.م. در نظر گرفته می‌شود.
- به علت محدودیت‌های ساخت، توری‌ها از جنس استیل خواهد بود.
- روش ساخت توری‌ها می‌تواند پانچ با دستگاه CNC یا سوراخکاری با لیزر باشد. علت انتخاب این دو روش نسبت به روش‌های دیگر، نداشتن دقت کافی، هزینه سنگین و یا عدم تکرارپذیری است در آن‌هاست. دقت موقعیت روزنه‌ها در یک توری و در دو توری نسبت به هم، در هر دو روش بهتر از ۰/۱ میلی‌متر است. دقت قطر روزنه‌ها در حد صدم میلی‌متر است.
- در ساخت توری‌ها به وسیله دستگاه پانچ CNC، سه محدودیت عملی وجود دارد: ۱) قطر روزنه‌ها حداقل باید دو برابر ضخامت ورق باشد و ۲) فاصله دیواره سوراخ‌ها از هم باید برابر ضخامت ورق باشد تا در هنگام سوراخ کردن، ورق دچار اعوجاج نشود و روزنه‌ها به یکدیگر راه پیدا نکنند. ۳) سوراخ‌های ایجاد شده در روش پانچ ممکن است به علت دایره کامل نبودن سمبه دارای یک تغییر شکل از حالت دایره ای داشته باشند.
- در ساخت قسمت مشبک توری‌ها به وسیله لیزر نیز باید به این نکته توجه کرد که: در اثر حرارت ایجاد شده از پرتوی لیزر، توری‌های با ضخامت کمتر از ۱ م.م. دچار اعوجاج می‌شوند.

- ضخامت توری‌ها ۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.
- روزنه‌های قسمت مشبک در داخل دایره‌ای به قطر ۵۰ م.م. محیط می‌شوند (با حذف روزنه‌هایی که مرکز آن‌ها خارج از این دایره قرار داشتند).

### ۳.۷.۲. نصب

در این بخش با توجه به طراحی انجام شده، نحوه بستن توری‌ها بطور اجمال بیان می‌گردد. توری محافظ به شکل ۵ پر با سوراخ‌های ۱۰ م.م. در مرکز هر پر است که چهار پر آن برای بستن توری‌ها به هم و یک پر باقی‌مانده برای اتصال الکتریکی توری استفاده می‌شود (شکل ۳-۲۴).



شکل ۳-۲۴- آرایش پرها و روزنه‌های تنظیم توری‌ها

- دو روزنه به قطر ۲ م.م. برای هم محور کردن سوراخ توری‌ها در نزدیکی ۲ پر از ۵ پر توری‌ها در نظر گرفته شد. هنگام بستن توری‌ها به یکدیگر، دو میله به قطر ۲ م.م. در این جفت سوراخ و سوراخ‌های متناظرشان در توری‌های دیگر قرار داده می‌شود و پس از اطمینان از هم محور بودن سوراخ‌ها و بستن توری‌ها در محل خود، دو میله خارج می‌شوند.

- فاصله توری‌ها با ضخامت حلقه‌های سرامیکی بین آن‌ها، تعیین می‌شود.
- به منظور ایجاد عایق‌بندی الکتریکی بین دو توری، پیچ اتصال دهنده آنها از داخل سوراخ سرامیک نری گذرنده از سوراخ‌های ۱۰ م.م. واقع بر پره‌های توری‌ها عبور داده می‌شود.

### ۳.۸. خنثی کننده بارفضا

وظیفه خنثی کننده بار فضا تولید و تزریق الکترون به پرتو یون خروجی است تا پرتو در کل از لحاظ بار الکتریکی خنثی شود. این سامانه می تواند از روش های مختلفی مانند پل پلاسمائی، رشته داغ یا کاتد توخالی<sup>۱</sup> برای تولید الکترون بهره گیرد. در این فرآیند، یون ها خنثی نمی شوند بلکه به اندازه تعداد یون موجود در پرتو خروجی، الکترون به درون پرتو تزریق می شود. در غیر اینصورت یون ها به علت پدیده بارفضا (حضور بارهای همنام در یک ناحیه) همدیگر را دفع می کنند و پرتو واگرا خواهد شد. ضرورت استفاده از خنثی کننده بارفضا زمانی بیشتر می شود که جنس ماده هدف عایق باشد. چون در صورت عدم استفاده از خنثی ساز، مشکل تجمع بار مثبت در محل هدف و در نتیجه انحراف و پس زدن پرتو یون مطرح می شود. با انجام خنثی سازی، به اندازه جریان یون فرودی به هدف، جریان الکترونی نیز شارش می یابد و ماده هدف از لحاظ الکتریکی خنثی می شود.

#### ۳.۸.۱. طراحی خنثی ساز

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، خنثی ساز یک منبع تولید الکترون است که با گسیل و همراه سازی الکترون با پرتوی یون از واگرایی کلومی پرتوی باردار جلوگیری می کند. به علاوه باعث خنثی سازی صفحه هدف و ممانعت از تجمع بار مثبت بر روی آن می شود.

اولین قدم برای طراحی خنثی ساز، انتخاب نوع و نحوه تولید الکترون در آن است. انتخاب نوع خنثی ساز بر اساس عملکرد چشمه یون، گازهای مورد استفاده در آن، بیشینه جریان تولید شده در آن و مدت زمان قابل قبول برای سرویس اجزای چشمه یون صورت می گیرد.

در چشمه یون توری دار DC، که در چشمه پلاسمای آن از رشته تنگستنی استفاده شده و به همین دلیل تنها امکان استفاده از گازهای خنثی در آن وجود دارد، خنثی سازی نیز معمولاً با عبور جریان از یک رشته تنگستنی و تولید و گسیل الکترون از آن صورت می گیرد.

پس از انتخاب رشته تنگستنی به عنوان خنثی ساز، می بایست طول و هندسه رشته، محل قرارگیری آن، پتانسیل و جریان گذرنده از آن مشخص شود.

#### - طول و هندسه رشته

طول و ضخامت رشته تنگستنی باید به گونه ای انتخاب شود که قابلیت ایجاد تعداد الکترون مورد نیاز (حدود ۲۵٪ بیشتر از تعداد یون های موجود در پرتوی یون) را بدون ایجاد کردن گرمای اضافی داشته باشد.

هرچه ضخامت رشته کاتد کمتر باشد، با عبور جریان کمتری (و در نتیجه در دمای کمتری)، رشته امکان گسیل ترمیونیک الکترون را خواهد داشت. اما به همان نسبت نیز تعداد الکترون کمتری تولید می شود. بنابراین برای دستیابی به الکترون کافی برای خنثی سازی، رشته تنگستنی با طول زیاد و ضخامت کم انتخاب می شود.

<sup>۱</sup> Hallow Cathode

با بررسی رشته کاتد مورد استفاده در چشمه‌های یون شرکت‌های Plasma, Kaufman & Robinson Inc و Veeco Process Group و با توجه به رشته‌های موجود در بازار ایران، از یک مفتول تنگستن با خلوص ۹۵٪، به ضخامت ۰.۳ م.م. و طول ۲۰ س.م. استفاده شد. به منظور استفاده موثر از کل طول رشته خنثی ساز، رشته بصورت فنری با ۱۰ حلقه به قطر ۵ م.م. با دو دنباله در دو طرف پیچیده می‌شود. در این حالت طول رشته که در معرض تابش مستقیم پرتو قرار دارد، حدود ۱۲ س.م. خواهد بود.

#### - محل قرارگیری رشته

رشته خنثی ساز را معمولاً به گونه‌ای نصب می‌کنند که از مرکز پرتو عبور کند تا پرتو را به صورت موثر و یکنواخت خنثی کرده و باعث انحراف پرتو به صورت نامتقارن نشود. در بعضی موارد، با هدف افزایش طول عمر رشته، آن را در کنار قسمت مشبک توری‌ها، نصب می‌کنند. این خنثی ساز باعث اختلال اندکی در یکنواختی پرتوی یون و خنثی سازی می‌شود که در برخی کاربردها با توجه به نیاز به طول عمر بیشتر، از این اختلال صرف‌نظر می‌شود.

گرم کردن رشته کاتد باعث خم شدن و افتادگی آن می‌شود. در طرح حاضر، این رشته توسط دو سرامیک، به صورت ایزوله بر روی درب چشمه یون بگونه‌ای نصب شد که دقیقاً از مرکز پرتوی یون عبور داده شود. فاصله عمودی آن و درب چشمه یون حدود ۱۷ م.م. در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۲۵). این رشته گاهی نیز بصورت سیم صاف بدون حلقه بسته می‌شود.



شکل ۳-۲۵- نحوه بستن رشته سامانه خنثی ساز

#### - شرایط الکتریکی رشته

برای تولید الکترون، می‌بایست با عبور جریان از رشته تنگستنی، آن را تا دمای گسیل ترمیونیوم گرم کرد. الکترون‌های تولید شده تحت تاثیر اختلاف پتانسیل رشته (که در پتانسیل زمین قرار دارد) و پرتوی یون به سمت پرتوی یون کشیده شده و با پرتوی یونی همراه می‌شوند.

با وجود اینکه متناوب یا مستقیم بودن جریان عبوری از رشته تاثیر چندانی در وظیفه اصلی آن که گرم کردن رشته است ندارد، در صورتیکه از جریان متناوب برای گرم کردن آن استفاده شود، رشته تحت تاثیر میدان



مغناطیسی قوی چشمه پلاسما، مرتعش شده و باعث ایجاد اختلال در یکنواختی پرتو و خنثی سازی آن می‌شود. بنابراین استفاده از منبع جریان مستقیم پیشنهاد می‌شود. شدت جریان مورد نیاز برای خنثی کردن پرتو بسته به شدت پرتوی یون و هندسه خنثی ساز متفاوت است که بصورت تجربی برای چشمه یون موجود بدست آمد. منبع جریان مناسب برای تغذیه خنثی ساز، منبع تغذیه جریان مستقیم ۱۵ آمپر و ۲۵ ولت است.

### ۳.۹. ساخت و نصب

پس از تهیه نقشه‌های اجزا و قطعات هر زیرسامانه از چشمه یون بر اساس جنس و ابعاد و عملکرد هریک از قطعات، فهرست مواد اولیه مورد نیاز استخراج و نسبت به خرید آن‌ها اقدام گردید. تمامی قطعات به استثنای توری‌ها، با روش‌های ماشین کاری ساخته شدند و مورد ارزیابی و کنترل کیفیت قرار گرفتند. تنها توری‌ها به روش برش با لیزر و با دقت مناسب ساخته شدند. آبگرد روی آند و بوش درزگیر خلأ آن توسط جوش نقره به این قطعه جوش داده شد.

برخی از قطعات استاندارد آمادی نیز نظیر پیچ‌ها و مهره‌ها از بازار تهیه شده و کلیه مواد و قطعات آمادی پس از دریافت کنترل کیفیت شدند.

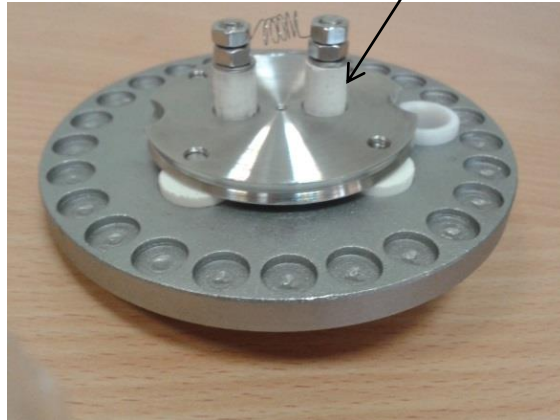
پس از آماده شدن اجزای سامانه و انجام مراحل کنترل کیفی، مونتاژ مجموعه طبق دستورالعمل مربوط انجام گردید. تصاویر اجزای چشمه پلاسما و مجموعه کامل آن در شکل‌های ۳-۲۶ تا ۳-۴۱ آمده است.

#### ۳.۹.۱. چشمه پلاسما

چشمه پلاسما که از کاتد و پایه‌های آن، استوانه آند توبی کف آن، مگنترون شامل آهنرباها و یوغ‌ها تشکیل شده مراحل مونتاژ آن به شرح زیر است:

- عایق تفلونی (مربوط به عبور لوله‌های آب)، ۶ عدد سرامیک نری از سمت بالا درون ۶ سوراخ یوغ پایین و کفی آند روی سرامیک‌ها قرار داده می‌شود و با استفاده از ۴ عدد پیچ و ۴ عدد سرامیک مادگی که از سمت پایین درون سوراخ‌های پیرامونی یوغ قرار داده می‌شوند؛ کفی به یوغ بسته می‌شود (شکل ۳-۲۶).

لوله‌های سرامیکی محافظ



شکل ۳-۲۶ - اتصال توپی آند به یوغ پائینی مگنترون

- پایه‌های کاتد از دو عدد لوله سرامیکی و پس از آن از دو عدد سوراخ در وسط کفی آند و سپس از سوراخ-  
های متناسب با سرامیک‌های نری- مادگی در وسط یوغ گذرانده و با ۲ عدد مهره از سمت پایین بسته می-  
شود(شکل ۳-۲۶).

- رشته کاتد توسط ۴ مهره و واشر روی پایه‌های کاتد بر روی توپی نصب می‌شود(شکل ۳-۲۶).

- لوله‌های آبگرد آند از سوراخ مربوطه در یوغ پایین عبور داده شده و استوانه آند به دور کفی آند قرار گرفته و  
با ۲ عدد پیچ M3 مغزی به کفی آند بسته می‌شود (شکل ۳-۲۷).



شکل ۳-۲۷- نصب آند و آبگرد آن روی توپی متصل به یوغ پائینی

- حلقه فاصله‌انداز تفلونی روی یوغ بالا به دور استوانه آند قرار داده می‌شود(شکل ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸- نحوه نصب حلقه عایق تفلونی بین آند و یوغ بالائی

- جفت آهنرباها با رعایت قطب آن‌ها بین یوغ پایین و بالا قرار داده می‌شود (شکل ۳-۲۹).



شکل ۳-۲۹- آهنرباهای نصب شده بین دو یوغ پائین و بالا

- ده عدد سرامیک نری داخل سوراخ‌های ایجاد شده بر روی درپوش زیرین قرار داده می‌شود (شکل ۳-۳۰).



شکل ۳-۳۰- سرامیک‌های نری بر روی درپوش زیرین دستگاه

- سینی تفلونی طوری روی سرامیکها قرار داده می شود که سوراخهایش با سوراخهای درپوش منطبق باشند(شکل ۳-۳۱).



شکل ۳-۳۱- سینی عایق بر روی درپوش پائین

- مجموعه چشمه پلازما در حالیکه لوله های آب در سمت پائین قرار دارند درون فضای ایجاد شده در سینی عایق قرار داده می شود (شکل ۳-۳۲).



شکل ۳-۳۲- نصب مجموعه چشمه پلازما روی درپوش پائین

در این گام از عملیات، لازم است ابتدا اجزای سامانه استخراج به صورت یک پارچه سوار شوند و سپس فرآیند ادامه یابد:

### ۳.۹.۲. سامانه استخراج

سوار کردن اجزای سامانه استخراج خود در سه مرحله انجام می شود:



شکل ۳-۳۳- نصب مهره، واشر و سرامیک نری روی پیچ ۱۸ سانتی متری

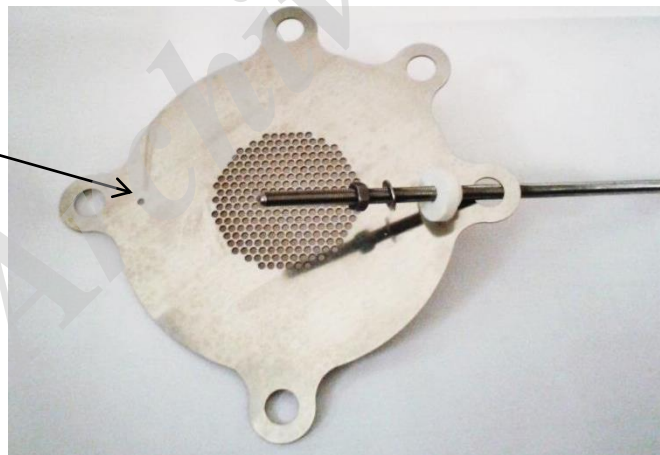
#### ۱- بستن توری‌ها به پیچ‌های بلند

۱-۱- دو پیچ ۱۸ سانتی متری (شکل ۳-۳۳) توسط مهره‌های M5 به توری‌ها (بصورت آزاد و بدون محکم کردن) بسته می‌شود.

یک مهره در فاصله ۵ سانتی متری از انتهای یکی از دو پیچ ۱۸ سانتی متری بسته می‌شود. یک واشر روی مهره و یک سرامیک نری روی آن قرار داده می‌شود.

۱-۲- یکی از پیچ‌ها از سوراخ پره توری محافظ (در زاویه صفر درجه؛ شکل ۳-۲۹)، گذرانده و توری روی سرامیک قرار داده می‌شود. (پره موجود در زاویه صفر درجه در نزدیکی سوراخ تنظیم کننده است؛ شکل ۳-۳۴).

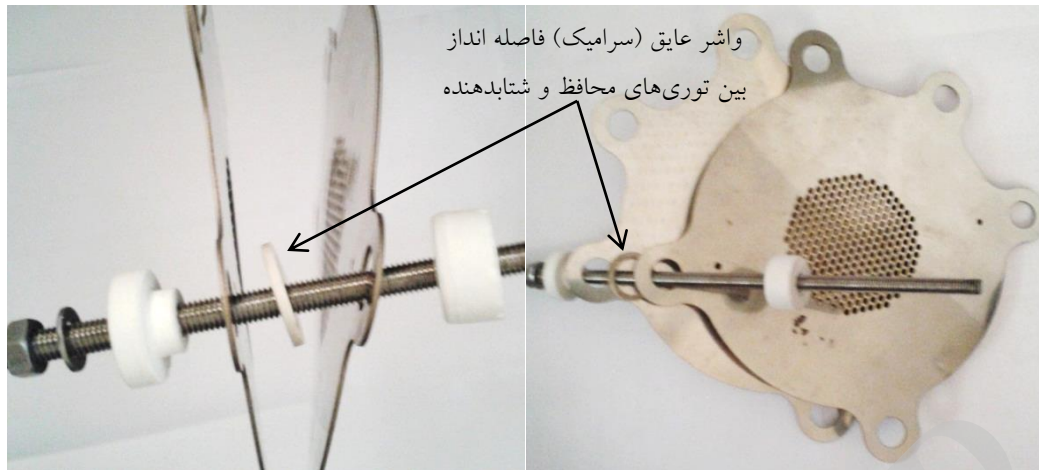
سوراخ تنظیم روزنه  
توری‌ها



شکل ۳-۳۴- نصب اولیه توری محافظ

۱-۳- یک واشر سرامیکی (شکل ۳-۳۵) از پیچ گذرانده شده و دور سرامیک نری قرار داده می‌شود. پره توری شتابدهنده که در زاویه صفر درجه قرار دارد روی آن قرار می‌گیرد.

۱-۴- یک سرامیک مادگی با عبور پیچ از سوراخ آن، روی توری شتابدهنده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۳۵- نصب اولیه توری شتابدهنده

- ۱-۵- انتهای پیچ، با یک واشر و مهره، از سمت دیگر مهار می گردد.
- ۱-۶- مراحل فوق، برای پیچ ۱۸ سانتی متری دیگر در زاویه ۱۸۰ درجه تکرار می شود.
- ۱-۶- در صورت نیاز به توری کاهنده، دور نری ها بازهم واشر سرامیکی قرار داده شده و توری کاهنده روی آن ها گذاشته شده و سپس بندهای ۱-۶ و ۱-۷ اجرا می شود.

## ۲- نصب پیچ های کوتاه (۱۵ سانتی متری)

- ۲-۱- یک مهره در فاصله ۱/۵ سانتی متری از انتهای یکی از پیچ های ۱۵ سانتی متری بسته می شود.
- ۲-۳- یک واشر روی مهره و یک سرامیک نری روی آن قرار داده می شود.
- ۲-۴- یک واشر سرامیکی بین توری ها (بین دو پره در زاویه ۹۰ درجه) قرار داده می شود.
- ۲-۵- پیچ ۱۵ سانتی متری به همراه مهره و واشر و سرامیک نری، از سمت توری محافظ، از سوراخ پره ها (در زاویه ۹۰ درجه) عبور داده شده و در سمت دیگر با مهره و واشر بسته می شود.
- ۲-۶- یک مهره و واشر در فاصله ۱/۵ سانتی متری از انتهای یک پیچ ۱۵ سانتی متری بسته می شود.
- ۲-۷- یک واشر سرامیکی بین توری ها (بین دو پره در زاویه ۲۷۰ درجه) قرار داده می شود.
- ۲-۸- یک پیچ ۱۵ سانتی متری دیگر به همراه مهره و واشر بسته شده روی آن، از سمت توری محافظ از سوراخ پره ها (در زاویه ۲۷۰ درجه) عبور داده شده و با سرامیک نری و واشر و مهره در سمت دیگر بسته می شود.
- ۲-۹- یک مهره و واشر در فاصله ۱/۵ سانتی متری از انتهای یک پیچ ۱۵ سانتی بسته می شود.
- ۲-۱۰- پیچ ۱۵ سانتی متری به همراه مهره و واشر، از سوراخ پره بیرون زده توری بالایی عبور داده شده و در سمت دیگر با واشر و مهره بسته می شود (شکل ۳-۳۶).



شکل ۳-۳۶- نصب توری ها قبل از تنظیم

### ۳- تنظیم توری ها

۳-۱- دو میله تنظیم کننده، از سوراخ های تنظیم ایجاد شده در توری ها گذرانده شده و در این وضعیت، همه مهره ها محکم می شود (شکل ۳-۳۷).



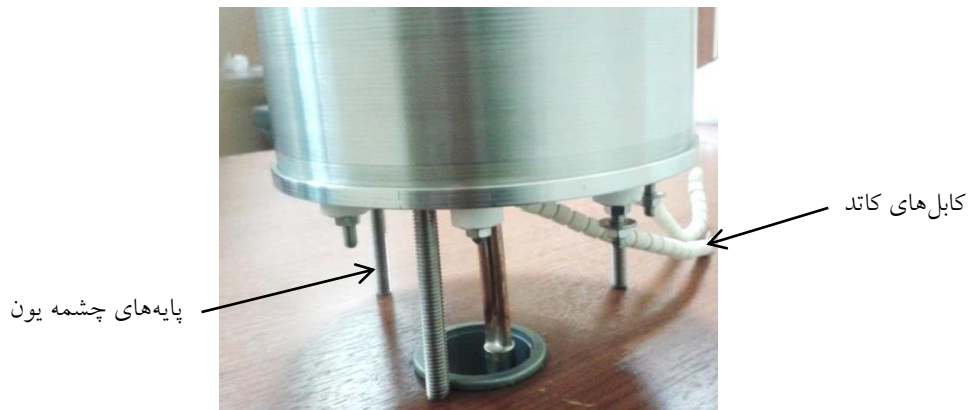
میل تنظیم روزنه ها

شکل ۳-۳۷- نصب کامل توری ها و تنظیم آن ها

۳-۲- دو سوراخ باقیمانده مانند ۲-۸ بسته می شود با این تفاوت که از پیچ های آلن ۵ بطول ۲ سانتی متر استفاده می شود. این پیچ ها برای ثابت نگه داشتن تنظیم انجام شده در ۳-۱ به کار می روند (شکل ۳-۳۷).

### ۳.۹.۳. نصب سامانه استخراج و ختشی ساز

سه عدد پیچ ۱۰ سانتی متری به قاب زیرین بسته و سوراخ های سینی تفلونی و قاب زیرین هم محور می شوند. این مجموعه، از طریق پایه های نگهدارنده روی میز کار قرار داده می شود (میز کار باید یک سوراخ به قطر حدود ۵ سانتی متر داشته باشد تا لوله آبگرد درون آن قرار گیرد؛ شکل ۳-۳۸).



شکل ۳-۳۸- نصب کابل های عایق بندی شده کاتد و پایه های دستگاه

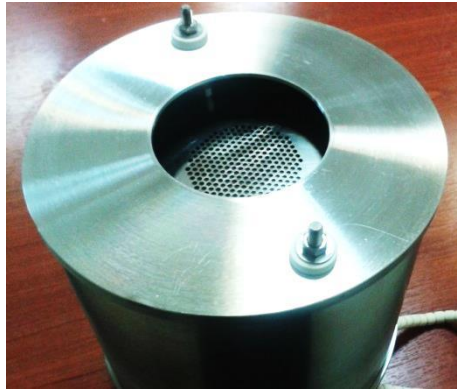
سامانه استخراج طوری روی مجموعه چشمه پلاسما قرار داده می شود که انتهای پیچ های بلند از داخل سوراخ های هم محور شده فوق عبور کنند (شکل ۳-۳۹). در این مرحله می توان قاب جانبی دستگاه را با قراردادن آن روی درب یا قاب پائینی نصب نمود.



شکل ۳-۳۹- نصب سامانه استخراج روی مجموعه چشمه پلاسما و بستن کابل ها

- ۱- پایه های کاتد با ۲ عدد سرامیک نری و ۲ عدد واشر و مهره، به قاب زیرین بسته می شوند و سپس کابل های عایق بندی شده به آنها متصل می گردند (شکل ۳-۳۹).
- ۲- پیچ ها با ۵ عدد سرامیک نری و واشر و مهره، به قاب زیرین بسته می شوند.
- ۳- قاب بالایی طوری روی بدنه قرار داده می شود که پیچ های ۱۸ سانتی متری از دو سوراخ قاب بالایی عبور کنند و با ۲ عدد سرامیک نری و واشر و مهره، به قاب بسته می شوند (شکل ۳-۴۰).





شکل ۳-۴۰- نصب قاب بالایی

۴- خنثی‌ساز با ۲ عدد واشر و مهره به ۲ پیچ متری بسته شوند (شکل ۳-۴۱). اگر در این مرحله، مجموعه روی صفحه اصلی محفظه خلأ قرار داده می‌شود بوشن لوله آبگرد باید در محل فیدتروی آب و پایه‌های نگهدارنده در محل‌های مناسب قرار گیرند.



شکل ۳-۴۱- نصب خنثی ساز

۵- سه پیچ متصل به توری‌ها و ۴ پیچ متصل به کاتد و خنثی‌ساز و از طریق کابل‌های ولتاژ و جریان بالای مناسب برای محیط خلأ، به فیدتروهای مربوط و از آنجا به پایانه‌های منابع تغذیه مرتبط، متصل می‌شوند. اتصال الکتریکی آند به پایانه تغذیه مربوطه از طریق یک کابل ولتاژ بالای معمولی که به لوله آبگرد در بیرون محفظه وصل می‌شود برقرار می‌گردد.



#### ۴. فصل چهارم: نتایج آزمون‌ها

Archive of SID

#### ۴.۱. مقدمه:

در این فصل، شرح آزمایش‌های انجام شده با سامانه بهینه شده بیان می‌گردد. دو دسته آزمایش طراحی و انجام شده است. دسته اول برای بدست آوردن شرایط پایدار و دستیابی به پرتو با جریان و انرژی یون مورد نظر و دسته دوم برای لایه‌نشانی بکمک پرتو یون انجام گردید.

#### ۴.۲. آزمون‌های عملکرد

معیارهای اصلی عملکرد چشمه یون عبارتند از:

فشار محفظه: در محدوده  $10^{-3}$  میلی‌بار یا کمتر

جریان کاتد: ۱۰-۱۵ آمپر

ولتاژ پلاسما: ۵۰ ولت یا کمتر

جریان پلاسما: یک آمپر یا بیشتر

ولتاژ پرتو: ۳۰۰-۵۰ ولت

جریان پرتو: ۵۰ میلی‌آمپر یا بیشتر

ولتاژ شتاب‌دهنده: ۲۰۰-۶۰۰ ولت

#### ۴.۲.۱. آزمون عملکرد چشمه پلاسما

در یک وضعیت پایدار عملکرد چشمه یون، با ثابت قرار دادن فشار توسط کنترل شار جرمی، جریان کاتد، ولتاژ تخلیه و شتاب‌دهنده، تاثیر افزایش پتانسیل پرتو بر جریان هدف بررسی شد.



شکل ۴-۱ - زیر سامانه چشمه یون نصب شده در سامانه خلأ

فاصله توری‌ها از هم ۱/۹ م.م. بود. این آزمایش با هدف دستیابی به شرایط پایدار و جریان یون مناسب انجام گردید. کاتد سامانه خنثی‌ساز بصورت یک سیم صاف ساخته و نصب شد. شرایط آزمایش در جدول ۴-۱ آمده است:

فشار تنظیم کننده گاز آرگون	۱/۶ بار
فشار نهائی محفظه (پایه)	$10^{-5} \times 1/3$ میلی بار
فشار محفظه در حضور گاز آرگون	$10^{-4} \times 6/3$ میلی بار
جریان گاز آرگون	$5/65 \pm 0/1$
اتصال توری کاهنده	متصل به زمین
اتصال توری محافظ	متصل به آند

جریان رشته کاتد بین ۱۱ تا ۱۳ آمپر تغییر داده شد. در حالیکه ولتاژ تخلیه در ۴۰ ولت ثابت نگه‌داشته شده بود، جریان تخلیه در این شرایط بین ۱/۰۲ تا ۲/۱۵ آمپر بود. جزئیات آزمایش در جدول ۴-۲ آمده است:

فشار آرگون	شار گاز (MFC)	جریان کاتد	ولتاژ تخلیه	جریان تخلیه	ولتاژ شتاب‌دهنده	جریان شتاب‌دهنده	ولتاژ پرتو	جریان پرتو
$10^{-4}$ میلی‌بار	sccm	آمپر	ولت	آمپر	ولت	میلی‌آمپر	ولت	میلی‌آمپر
۶/۳	۵/۶۵	۱۱/۲	۴۰/۵	۱/۰۲	-۱۳۰	۳/۵	۲۵۰	۱۱
۶/۳	۵/۶۵	۱۳	۴۰	۲/۱۵	-۵۳۰	۱/۵	۱۴۰	۱۴
۹/۷	۱۴/۸	۱۰/۲	۳۹	۳/۷۶	-۸۵۰	۵	۳۱۳	۶۲
۹/۷	۱۴/۸	۱۰/۲	۴۰	۳/۷۵	-۸۵۰	۵	۳۴۰	۷۶

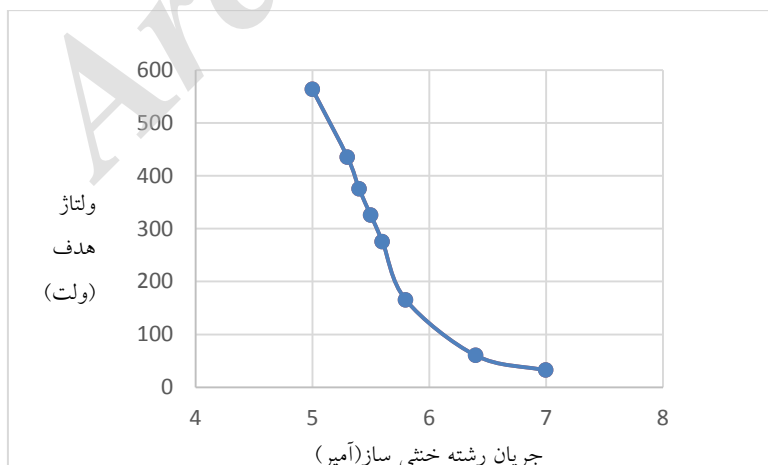
در این آزمایش مشاهده شد با افزایش جریان تخلیه با بالا بردن جریان کاتد، و تغییرات مناسب ولتاژهای توری شتاب‌دهنده و محافظ (یا ولتاژ پرتو)، جریان پرتوی برابر ۷۶ میلی‌آمپر با انرژی ۳۴۰ الکترون ولت حاصل گردید.

#### ۴.۲.۲. آزمون عملکرد خنثی‌ساز

در بررسی عملکرد خنثی‌ساز باید درباره این مساله اطمینان حاصل کرد که الکترون‌های گسیلی از رشته وظیفه خنثی‌سازی پرتو یون را بطور کامل انجام داده و از تجمع بار مثبت روی صفحه جلوگیری کنند. به این منظور صفحه هدف که یک قرص مسی به قطر ۱۵ س.م. است، در پتانسیل شناور و در فاصله ۲۳ س.م. از چشمه یون قرار داده شد. خنثی‌سازی کامل زمانی صورت می‌گیرد که پتانسیل صفحه هدف با وجود برخورد پرتوی یون به آن صفر باقی بماند. در واقع این به این مفهوم است که به همان میزان که یون به صفحه هدف برخورد کرده، الکترون نیز به آن رسیده و باعث خنثی‌سازی صفحه هدف شده است.

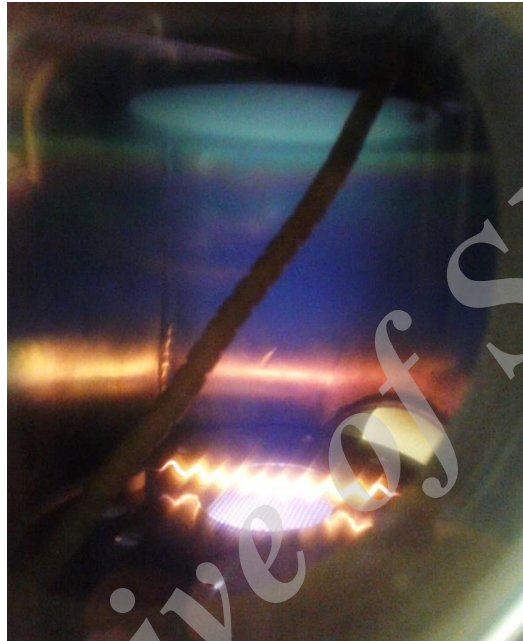
برای انجام این آزمایش با استفاده از پمپ دیفیوژن محفظه تا  $10^{-5} \times 4/6$  میلی بار خالاً شد. فشار رگولاتور روی ۱ بار تنظیم گردید. با باز کردن شیر گاز آرگون فشار محفظه به  $10^{-4} \times 4/8$  میلی بار رسانده شد. پس از روشن کردن چشمه یون و رسیدن به شرایط پایدار، با اعمال جریان، رشته خنثی ساز به دمای مناسب برای الکترون دهی رسانده شد. با افزایش جریان اعمالی به رشته خنثی ساز، تاثیر عملکرد آن بصورت تغییر ولتاژ قرائت شده ناشی از تجمع بارهای پرتو یون بر روی صفحه هدف، که نشانی از جریان یون است بررسی شد. اطلاعات بدست آمده از این آزمون در جدول ۴-۱ و منحنی تغییرات ولتاژ هدف در شکل ۴-۲ آمده است. این منحنی نشان می دهد با افزایش جریان خنثی ساز، الکترون های بیشتری تولید شده و جریان یون را بیشتر خنثی می نمایند.

جدول ۴-۱- بهبود خنثی سازی پرتوی یون با افزایش جریان رشته تنگستنی								
هدف	خنثی ساز	پرتو (توری محافظ)		شتابدهنده	پلازما		کاتد	فشار آرگون $10^{-4}$ میلی بار
		جریان mA	ولتاژ V		جریان A	ولتاژ V		
ولتاژ V	جریان A	جریان mA	ولتاژ V	ولتاژ V	جریان A	ولتاژ V	جریان A	
۵۶۳	۵	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۴۳۵	۵/۳	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۳۷۵	۵/۴	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۳۲۵	۵/۵	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۲۷۵	۵/۶	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۱۶۵	۵/۸	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۶۰	۶/۴	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸
۳۲	۷	۴۱	۷۹۰	-۱۴۲	۲	۴۴	۹	۴/۸



شکل ۴-۲- منحنی تغییرات ولتاژ هدف با تغییرات جریان رشته خنثی ساز

نکته‌ای که لازم است به آن توجه کرد این است که خنثی سازی هدف به معنی از بین بردن اثرات فیزیکی برخورد پرتوی یون به صفحه هدف نیست. در واقع پرتوی یون از نظر الکتریکی در محل هدف خنثی می‌شود اما ذرات یونی با برخورد به هدف و انتقال تکانه خود به آن باعث کندوپاش صفحه هدف می‌شود. این حقیقت در شکل ۳-۴ به خوبی مشهود است. همانطور که مشاهده می‌شود در اثر پرتوی یون خنثی شده به صفحه هدف، ذرات مس کندوپاش شده و پرتوی یون آرگون بنفش رنگ را در محل هدف به رنگ سبز-آبی درآورده است.



شکل ۴-۳- رشته خنثی ساز، پرتوی استخراج شده و درخشش یونی در محل هدف (بالا برنگ سبزی)

خنثی سازی پرتو در محل هدف با آزمایش دیگری نیز بررسی شد. این بار صفحه هدف توسط یک آمپر متر به زمین متصل و جریان یونی رسیده به آن را قرائت شد. خنثی سازی کامل زمانی صورت می‌گیرد که جریان یون قرائت شده از صفحه هدف صفر باشد. در این آزمایش سعی شد در یک شرایط تقریباً ثابت با روشن و خاموش کردن منبع تغذیه خنثی ساز، تاثیر وجود یا عدم وجود خنثی ساز در مسیر پرتو بررسی شود. نتایج این آزمایش در جدول ۴-۲ آمده است.

جدول ۴-۲- نتایج آزمون سامانه بهبود خنثی سازی پرتوی یون با افزایش جریان رشته کاتد									
هدف	شتابدهنده (-)		پرتو (+)		پلازما		کاتد	خنثی ساز	فشار محفظه $\times 10^{-4}$
	جریان (mA)	ولتاژ (V)	جریان (mA)	ولتاژ (V)	جریان (A)	ولتاژ (V)	جریان (A)	جریان (A)	
۰.۹	۲	-۲۰.۴	۳۴-۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۸	۲.۸
۲۲.۳	۲	-۲۰.۴	۳۴-۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۰	۲.۸
-۰.۴	۲	-۲۰.۴	۳۴-۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۸	۲.۷۷
۲۱.۷	۲	-۲۰.۴	۳۴-۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۰	۲.۷۷
-۰.۸	۲	-۲۰.۴	۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۸	۲.۷۴

۲۱.۷	۲	-۲۰.۴	۳۲	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۰	۲.۷۴
-۲.۱	۲	-۲۰.۴	۳۲-۳۱	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۸	۲.۷۲
۲۱.۳	۲	-۲۰.۴	۳۲-۳۱	۶۰.۲	۰/۹	۴۴	۹	۰	۲.۷۲
-۴.۷	۲-۱	-۲۰.۴	۳۱	۶۰.۲	کاتد	پلاσμα	کاتد	۸	۲.۷

همانطور که مشاهده می‌شود با عبور یک جریان مشخص از رشته خنثی ساز (۸ آمپر)، جریان قرائت شده از صفحه هدف تقریباً نزدیک صفر را نشان می‌دهد و با قطع ولتاژ تغذیه خنثی ساز آن جریان یونی قرائت شده از صفحه هدف افزایش چشمگیری دارد. این جریان، حکایت از تعداد یون‌های خنثی نشده در محل صفحه هدف را در غیاب خنثی ساز دارد. این یون‌های خنثی نشده به مرور باعث تجمع بار مثبت بر روی صفحه هدف عایق یا شناور می‌شود. چند بار جریان صفحه هدف با و بدون خنثی ساز، اندازه‌گیری شد. نکته‌ای که در این داده‌ها به چشم می‌خورد کاهش جریان قرائت شده در دفعات بعدی تکرار آزمایش است. این کاهش به علت کاهش تدریجی فشار در طول فرآیند است که منجر به کاهش جریان یونی و در نتیجه مازاد الکترون‌های گسیل شده برای خنثی سازی پرتوی یون می‌شود.

در آزمون‌های بعدی بجای رشته فنری شکل از یک سیم صاف استفاده گردید و مشکل ارتعاش آن در جریان‌های زیاد برطرف شد. این امر باعث افزایش طول عمر رشته نیز می‌گردد. افزایش طول عمر، وقتی از یک مفتول صاف (بدون حلقه‌های فنری) استفاده می‌شود وابسته به سطح مقطعی از آن است که مقابل پرتویون قرار می‌گیرد. مفتول صاف طولی برابر ۵ سانتی‌متر در مقابل پرتو دارد در حالیکه اگر از یک فنر پیچ با ۶ حلقه استفاده شود طول فنر برابر ۸ سانتی‌متر در قطر ۵ سانتی‌متری پرتو خواهد بود. بنابراین با توجه به یکسان بودن قطر سیم برای هر دو وضعیت، می‌توان نتیجه گرفت که سطح مقابل پرتو ۱/۶ برابر افزایش یافته که به معنای کاهش طول عمر آن با همین نسبت است. اما اگر تنش‌های ایجاد شده در حین فنری ساختن سیم نیز در نظر گرفته شود، این نسبت افزایش خواهد یافت. بنابراین با قطعیت می‌توان افزایش طول عمر خنثی‌ساز را در حالت مفتول صاف، بیش از ۲ برابر ذکر نمود. این مقدار برای چهار مورد سیم تنگستن صاف، بطور متوسط حدود ۳۵ ساعت بوده است.

### ۴.۲.۳. آزمایش واگرایی

این آزمایش برای مشخصه‌یابی پرتو یون به منظور تعیین واگرایی سامانه استخراج انجام گردیده است. از یک فنجان فارادی مقدماتی برای مشخصه‌یابی پرتو بهره گرفته شد. فنجان فارادی از طریق یک فیدتروی مکانیکی و بازوهای مناسب با حفظ ایزولاسیون الکتریکی به درب بالایی محفظه، متصل گردید. از یک صفحه مدرج روی صفحه بالایی محفظه، برای تنظیم زاویه چرخش محور فیدترو، استفاده گردید. جمع‌کننده فنجان فارادی از طریق مغزی یک کابل گیس بافت و یک فیدتروی الکتریکی، به یک مقاومت ۵۶ کیلو اهمی در بیرون محفظه وصل شد تا با اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ آن نسبت به زمین، جریان عبوری از مدار فنجان محاسبه و با دانستن مساحت روزنه فنجان، چگالی جریان پرتو بدست آید. سر دیگر مقاومت نیز به زمین متصل شد. از طریق یکی از کانال‌های فیدتروی چهارپایه، بدنه فنجان که به عنوان دافع الکترون عمل

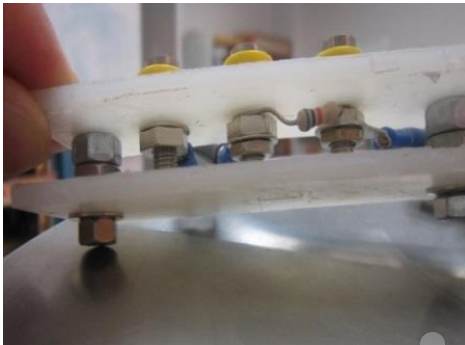
می‌کند، به پایانه منفی منبع تغذیه ۴۰ ولت متصل گردید. همچنین یک برد کوچک برای اتصالات الکتریکی مقاومت فنجان فارادی طراحی و ساخته شد (شکل ۴-۴).



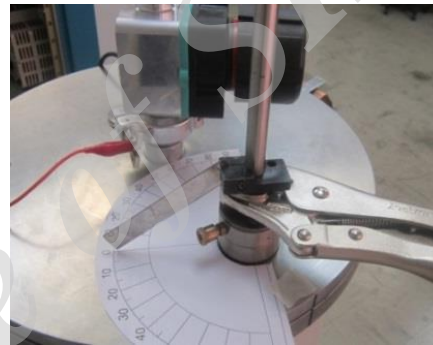
فنجان فارادی نصب شده در زیر درب بالائی محفظه



منبع تغذیه ۴۰ ولت جریان مستقیم



مقاومت ۵۶ کیلو اهم برای اندازه‌گیری ولتاژ



زاویه سنج و دسته چرخش جام روی درب بالائی

شکل ۴-۴- اجزای آزمایش مشخصه‌یابی پرتو

با استفاده از فنجان فارادی می‌توان از معادله ۴-۱ چگالی جریان یونی را محاسبه کرد. که در آن  $V$  پتانسیل قرائت شده در فنجان و بر حسب ولت است.

$$J = \frac{I}{A} \left[ \frac{A}{m^2} \right] = \frac{V}{\pi r^2 R} \left[ \frac{A}{m^2} \right] = \frac{1000 \times V}{\pi \times (0.0225) \times 56000} \left[ \frac{mA}{cm^2} \right]$$

معادله ۴-۱

$$J = 0.252627 \times V \left[ \frac{mA}{cm^2} \right]$$

با حرکت دادن بازوی مکانیکی، سطح پرتو توسط فنجان جاروب و ولتاژ دوسر مقاومت متصل به فنجان فارادی در زوایای مختلف پرتو ثبت شد (جدول ۴-۳).



تصویر پرتو یون و جام فارادی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. در این آزمایش جریان کاتد به ۹ آمپر افزایش داده شد که در ولتاژ پلاسما برابر ۴۴ ولت (نزدیک به کمترین حد مجاز)، و جریان آن به مقدار ۲ آمپر افزایش یافت که در حد بالای جریان پلاسما است.

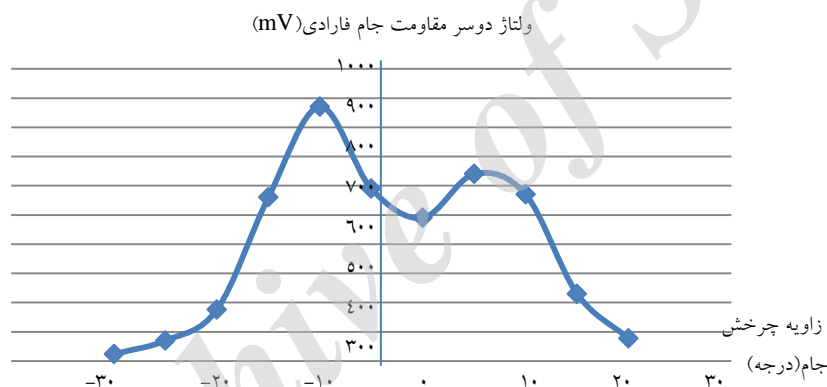
جدول ۴-۳- نتایج کمی آزمون مشخصه یابی پرتو

جام فارادی		پرتو (+)		شتاب دهنده	پلاسما		جریان کاتد	فشار
ولتاژ مقاومت (mV)	زاویه (درجه)	جریان (mA)	ولتاژ (V)	ولتاژ (V)	جریان (A)	ولتاژ (V)	چنگکی (A)	محفظه $\times 10^{-4}$ (میلی بار)
۶۲۵	+۷.۵	۲۶/۵	۷۱۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۶۴۰	+۵	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۵۷۰	+۱۰	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۲۳۰	+۱۵	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۷۷	+۲۰	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۵۹۰	-۵	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۸۷۰	-۱۰	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۵۶۰	-۱۵	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۱۷۶	-۲۰	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۷۰	-۲۵	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱
۲۴	-۳۰	۳۴	۸۰۰	-۲۳۰	۲	۴۴	۹	۱/۱

در شکل ۴-۶، منحنی تغییرات ولتاژ دو سر مقاومت بر حسب زاویه قرارگیری جام فارادی نشان داده شده است. مطابق این شکل، توزیع چگالی جریان پرتو نسبت به مرکز به علت جابجائی مرکز جام نسبت به محور پرتو در نقطه صفر و نیز حرکت جام فارادی در هنگام اندازه گیری بر روی کمانی از دایره به جای حرکت بر روی قطر دایره مقطع پرتو یون، متقارن نیست.



شکل ۴-۵- تصویر پرتو یون و جام فارادی



شکل ۴-۶- منحنی تغییرات ولتاژ دو سر مقاومت در یک چرخش کامل جام داخل پرتو یون در جریان پلاسمای ۲ آمپر

پارامترهای اعمال شده در چشمه یون ساخته شده، طبق جدول زیر بسیار نزدیک به پارامترهای چشمه یون ۳ سانتی متر متعلق به شرکت ویکو است. اما جریان پرتو به عنوان خروجی در چشمه یون ویکو کمی (حدود ۱۵٪) بالاتر است. به عنوان مثال جریان پرتو در ۱۰۰۰ ولت برابر ۳۴ میلی آمپر است که در چشمه یون ویکو این مقدار برابر ۴۰ است که البته این می‌تواند به علت بالاتر بودن فشار در چشمه یون ویکو باشد. بقیه کمیت‌ها با اختلاف کمی تقریباً مطابقت دارند.

Table 2.4: 3 cm DC Ion Source Recipes

Neutraliz	Cathode	Discharge	Discharge	Accelerat	Beam (I)	Beam	Recipe
TBN*	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	0	0	1, 94
TBN	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	20 mA	500 V	2, 95

TBN	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	30 mA	750 V	3, 96
TBN	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	40 mA	1000 V	4, 97
TBN	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	50 mA	1250 V	5, 98
TBN	8.5 A	2.5 A	40 V	15%	60 mA	1500 V	6, 99

در طرح ۱۹۰۶، قطر پرتو یون با قطر خروجی ۵ سانتی‌متر در فاصله ۱۴ سانتی‌متری از دهانه خروجی آن برابر ۱۵ سانتی‌متر بود. بنابراین زاویه واگرایی آن برابر می‌شود با:

$$\delta = \text{atan}[(1/2)(15-5)/14] = 19/6$$

در حالی که در طرح جدید (۲۱۵۴)، قطر پرتو با قطر خروجی ۶ سانتی‌متر در فاصله ۲۳ سانتی‌متری از دهانه خروجی برابر ۱۲ سانتی‌متر بود که در این صورت زاویه واگرایی آن برابر می‌شود با:

$$\delta = \text{atan}[(1/2)(12-6)/23] = 7/4$$

یعنی زاویه واگرایی به میزان ۱۲/۲ درجه کاهش و یا به میزان ۶۲/۲٪ بهبود یافته است.

#### ۴.۳. آزمون تأثیر تابش پرتوی یون بر لایه‌نشانی

هدف از این آزمایش بررسی اثر تابش پرتوی یون بر لایه‌نشانی توسط یک منبع دیگر است. این منبع می‌تواند یک چشمه یون دیگر، تفنگ الکترونی یا منبع تبخیر حرارتی باشد. انتظار می‌رود تابش پرتوی یون همزمان با لایه‌نشانی، بر روی خواص اپتیکی و مکانیکی لایه تأثیر بگذارد.

در این آزمایش با تابش پرتو کم انرژی (به منظور جلوگیری از کندوپاش لایه) همزمان با لایه‌نشانی با منبع تبخیر الکترونی، تغییر خواص اپتیکی لایه را در مقایسه با لایه ایجاد شده بدون تابش پرتوی یون بررسی شود.

به منظور تعیین نوع ماده لایه‌نشانی مطالعاتی انجام گرفت و طی آن مشخص شد که خواص برخی مواد پس از لایه‌نشانی چندان تحت تأثیر پرتو یون قرار نمی‌گیرند. منیزیم فلوراید و برخی فلزات از آن جمله‌اند. بنابراین مطالعات، آلومینیوم به دلیل در دسترس بودن و نیز تأثیر پذیری از پرتو یون، به عنوان ماده هدف انتخاب شد.

#### ۴.۳.۱. آزمون لایه‌نشانی

قبل از تخلیه محفظه، مقداری آلومینیوم جهت لایه‌نشانی در یک بوته تنگستن که به الکترودهای جریان منبع تبخیر حرارتی بسته شده بود قرار داده شد. دو عدد لام میکروسکوپ نیز بطور متقارن نسبت به بوته طوری در بالای آن نصب گردید که تنها یکی از آن‌ها در معرض تابش پرتو یون قرار گیرد تا بتوان از آن به عنوان مرجع مقایسه لایه نشانداده شده استفاده نمود. فاصله بوته از نمونه‌ها ۲۳ سانتی‌متر بود. همچنین با تغییر طول پایه‌های چشمه یون بر روی صفحه کار، این سامانه طوری زاویه داده شد تا پرتو آن عمود بر یکی از نمونه‌ها بتابد. یک ضخامت سنج کریستالی نیز در کنار بوته و در فاصله مناسبی نسبت به آن قرار داده شد. با تعیین فاصله و زاویه کریستال نسبت به بوته و نمونه ضریب فاصله<sup>۱</sup> برابر ۲/۲ محاسبه و در کنترلر ضخامت-

<sup>۱</sup> Tooling Factor



سنگ ثبت گردید. با رسیدن به فشار پایه  $5 \times 10^{-5}$  میلی بار آزمایش با شرایط ذکر شده در جدول ۴-۴ انجام گردید.

فشار تنظیم کننده گاز آرگون	۱/۸ بار
فشار نهائی محفظه (پایه)	$3/4 \times 10^{-5}$ میلی بار
فشار محفظه در حضور گاز آرگون	$9/6 \times 10^{-4}$ میلی بار
جریان گاز آرگون	$14/8 \pm 0/1$
اتصال توری کاهنده	متصل به زمین
اتصال توری محافظ	متصل به آند

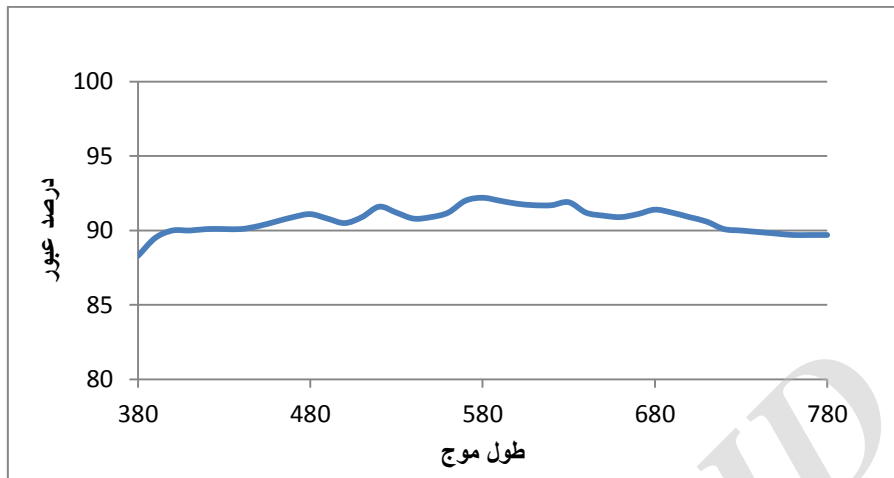
با توجه به تجربیات بدست آمده از آزمایش‌های قبلی، کمیت‌ها بر روی مقادیر بدست آمده از آن‌ها، به عنوان نقطه آغازین کار تنظیم گردید. در این آزمایش در کمترین ولتاژ تخلیه و جریان کاتد مناسب (۹/۵ آمپر) و در جریان تخلیه ۲/۴ آمپر، جریان پرتوی برابر ۲۶ میلی آمپر بدست آمد که با انرژی ۲۰۰ الکترون‌ولت، امکان بمباران لایه آلومینیوم را در حین تبخیر و لایه‌نشانی فراهم آورد. ابتدا پیش تبخیر به مدت حدود ۲ دقیقه انجام و سپس بطور هم‌زمان بستاور کنار زده و ضخامت‌سنج فعال گردید.

فشار آرگون	شار گاز (MFC)	جریان کاتد	ولتاژ تخلیه	جریان تخلیه	ولتاژ شتاب‌دهنده	جریان شتاب‌دهنده	ولتاژ پرتو	جریان پرتو
$10^{-4}$ میلی بار	sccm	آمپر	ولت	آمپر	ولت	میلی آمپر	ولت	میلی آمپر
۹/۹	۱۴/۸	۱۰/۵	۳۸	۲/۶	-۷۵۰	۰	۱۴۳	۲۱
۹/۶	۱۴/۸	۹/۵	۳۸	۲/۳	-۷۵۰	۵	۱۵۰	۲۰
۹/۸	۱۴/۸	۹/۵	۳۸	۲/۴	-۹۰۰	۰	۲۰۰	۲۶

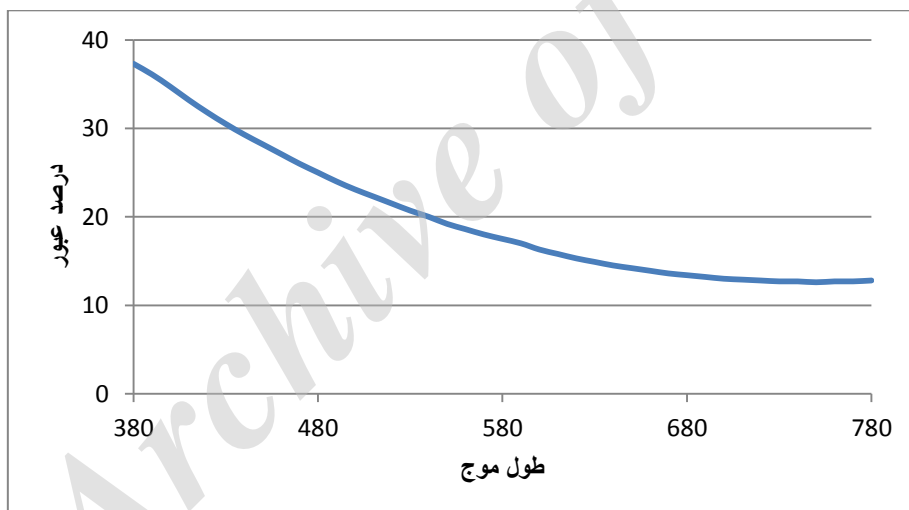
تحت شرایط مذکور، ۴۵ نانومتر آلومینیوم لایه‌نشانی و توسط پرتو یون ایجاد شده به مدت ۲۰ دقیقه هم‌زمان تحت تابش قرار گرفت.

#### ۴.۳.۲. بررسی تغییر خواص اپتیکی لایه تحت تابش پرتوی یون

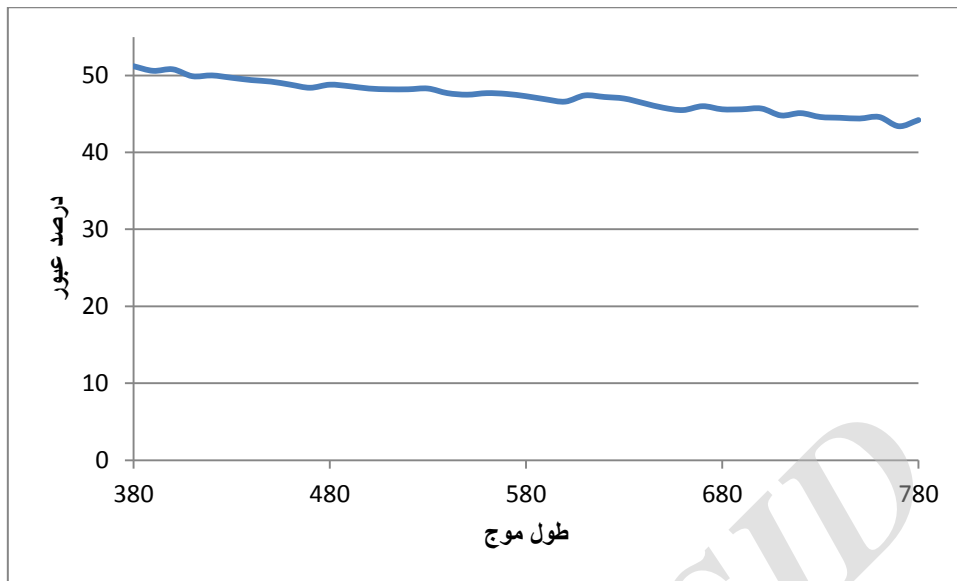
لایه‌ی ایجاد شده و نمونه شاهد (لایه بدون تابش پرتویون)، توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Spectronic 501 ساخت شرکت Milton Roy در ناحیه مرئی بطور کمی طیف سنجی شد و طیف عبوری آن‌ها بدست آمد (شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ و ۴-۹). شکل ۴-۷ مربوط به یک زیرآیند بدون لایه مورد استفاده در لایه‌نشانی است.



شکل ۴-۷- در صد عبور نور مرئی از نمونه بدون لایه

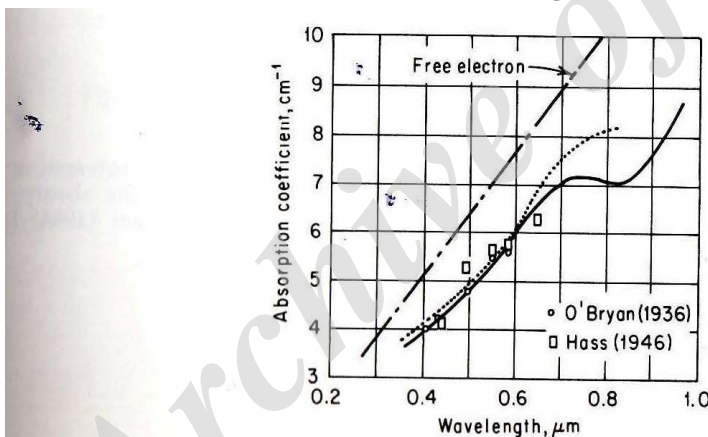


شکل ۴-۸- در صد عبور لایه آلومینیوم به ضخامت ۴۵ نانومتر لایه نشانی به کمک چشمه یون پهن



شکل ۴-۹- درصد عبور لایه آلومینیوم به ضخامت ۴۵ نانومتر لایه نشانی بدون تابش پرتو چشمه یون بهن

مقایسه شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ نشان می‌دهد در صد عبور نور با کاهش طول موج افزایش می‌یابد و این روند در لایه‌ای که تحت تابش یون‌ها قرار گرفته سریع‌تر است.



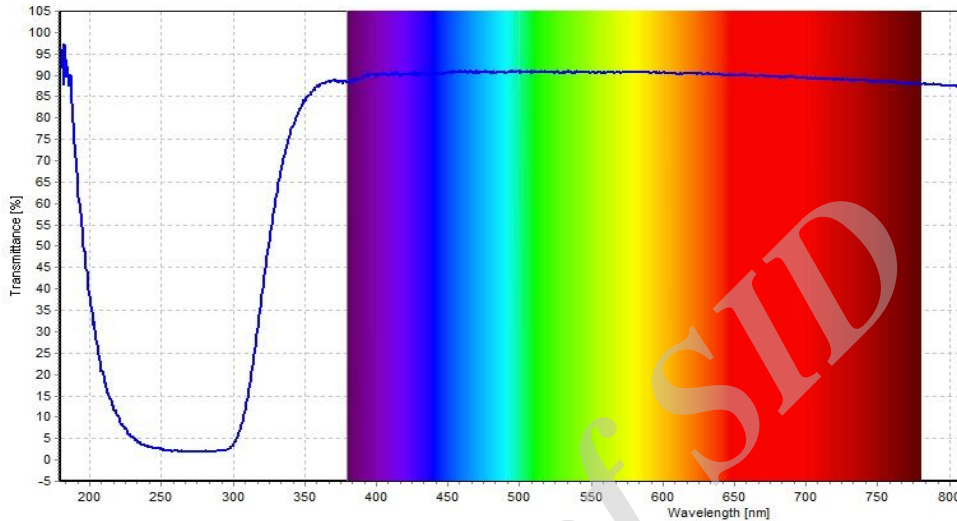
**Fig. 214** Absorption coefficient of aluminum. For identification of references cited on the figure, see the original source. [From Schulz (1954).]

شکل ۴-۱۰- ضریب جذب آلومینیوم از دو منبع متفاوت؛ هردو منبع در ناحیه مرئی تقریباً توافق دارند

شکل ۴-۱۰- ضریب جذب آلومینیوم را در ناحیه مرئی نشان می‌دهد [11]. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که چون با کاهش طول موج ضریب جذب کاهش می‌یابد، بدیهی است در این طول موج‌ها عبور افزایش خواهد یافت. اما از آنجا که استفاده از پرتو یون باعث شده خواص لایه نشاندگی به خواص توده و انباشته آن نزدیک‌تر شود، لذا این تغییرات نیز سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

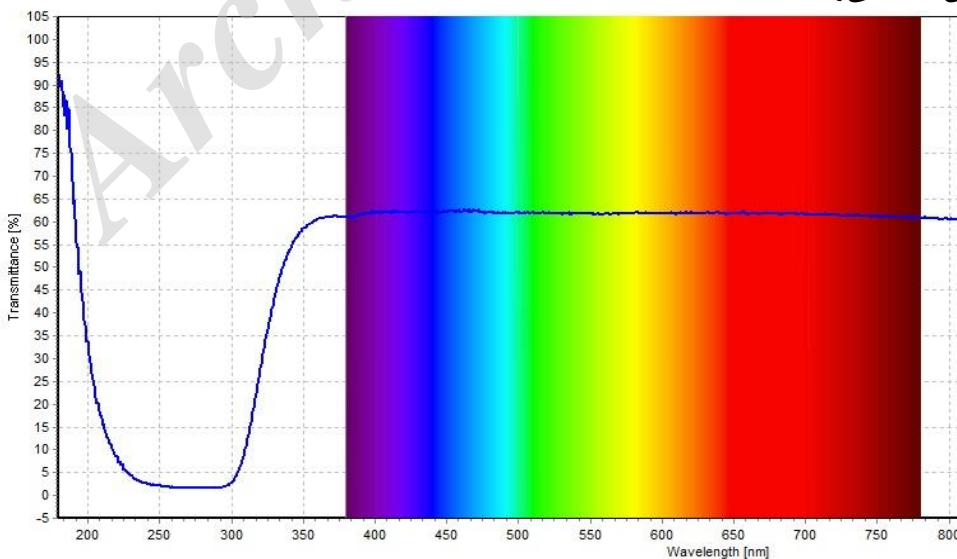
<sup>1</sup> Bulk

کیفیت اپتیکی لایه‌های ایجاد شده در آزمایش اخیر با دستگاه طیف سنج AVAspec-ULS ساخت شرکت Avantes نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ آمده است. نتایج بدست آمده در این آزمون کیفی نیز موید تاثیر مثبت پرتو یون بر روی لایه نشاندگی شده است.

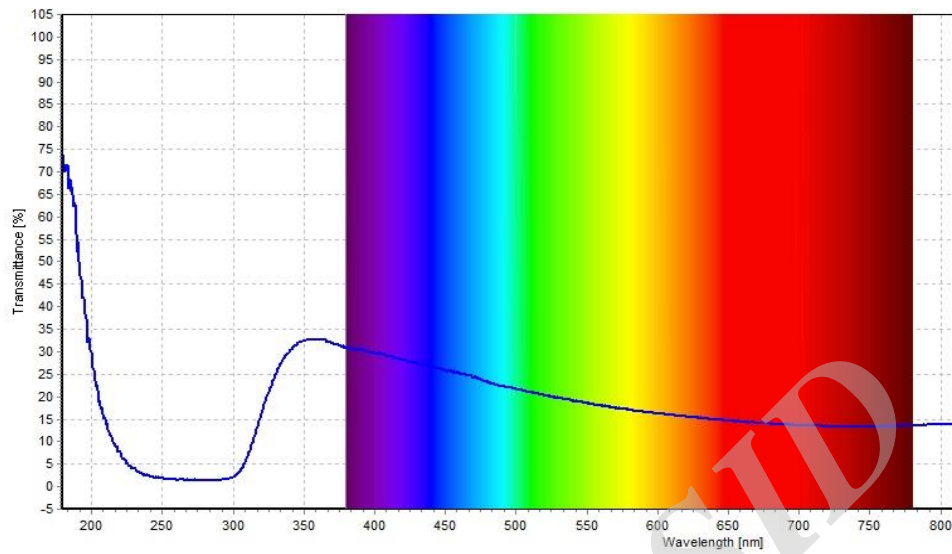


شکل ۴-۱۱- طیف کیفی عبور نور مرئی از زیرابند (نمونه بدون لایه)

از آنجا که آزمون بطور کیفی انجام شده درصدهای عبور پرتو در طول موج‌های مختلف دقیق نیست. اما مقایسه نمونه بدون لایه و لایه ایجاد شده تحت پرتو یون دارای طیف عبور عادی هستند در حالیکه لایه ایجاد شده بدون تاثیر پرتو یون عبور غیرعادی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، عبور در این لایه در ناحیه بنفش افزایش می‌یابد در حالی که انواع شیشه در این ناحیه مقدار جذبشان افزایش یافته و در ناحیه فرابنفش به میزان ۸۰٪ می‌رسد.



شکل ۴-۱۲- طیف کیفی عبور نور مرئی از لایه آلومینیوم تحت تابش پرتو یون



شکل ۴-۱۳- طیف کیفی عبور نور مرئی از لایه آلومینیوم بدون تابش پرتو یون

Archive of SID





۵. فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری

Archive of SID

## ۵.۱. نتیجه گیری پایانی:

الف- چشمه پلاسما- نتایج آزمون ها نشان می دهد که تخلیه الکتریکی به خوبی انجام می شود (بالاترین جریان پلاسما برابر  $3/76$  آمپر در فشار  $9/7 \times 10^{-4}$  میلی بار و در ولتاژ تخلیه  $38$  ولت رخ داده است که اولاً افزایش  $200$  درصدی نسبت به طرح اولیه ( $1906$ ) دارد و ثانیاً در ولتاژی پائین تر از ولتاژ یونش دوم گاز آرگون ( $Ar^{++}$ ) بوده است. بنابراین چشمه پلاسما عملکرد مناسبی از خود نشان می دهد. بعلاوه دستیابی به این جریان در جریان  $9/5$  آمپر کاتد که نسبت به طرح اولیه کاهش  $250$  درصدی داشته حائز اهمیت است. از مزایای کاهش این جریان، کاهش محسوس گرما و آلودگی ایجاد شده در محیط چشمه پلاسماست.

ب- سامانه استخراج- در این بخش از بهینه سازی سامانه علاوه بر توری های محافظ و شتابدهنده، از یک توری سوم بنام کاهنده نیز استفاده شده است که نیاز به منبع تغذیه نداشته و به زمین وصل می گردد. نقش این توری استخراج جریان یون بالا در انرژی های پائین است. بطور معمول برای استفاده از چشمه یون جهت کمک به لایه نشانی که از انرژی های پائین تا  $300$  الکترون ولت استفاده می شود، بیرون کشیدن یون ها از چشمه پلاسما با استفاده از دو توری در سامانه استخراج با جریان بالای  $20$  میلی آمپر غیر ممکن است. به همین دلیل یا از چشمه های یون بدون سامانه استخراج<sup>۱</sup> استفاده می شود و یا از سامانه استخراج سه توری. در طرح اولیه که از دو توری در سامانه استخراج استفاده می شد، افزایش جریان همواره با افزایش انرژی همراه بود. این امر باعث می شد از این چشمه یون نتوان در کاربردهایی که در آنها پرتوی یون کم انرژی نیاز است، استفاده کرد. اما با بهینه سازی های انجام شده در این طرح علاوه بر سهولت باز و بسته کردن توری ها، کاهش جریان های اتلافی و افزایش جریان پرتو یون، امکان ایجاد پرتوی یون با انرژی کم (کمتر از  $300$  الکترون ولت) و جریان قابل قبول (بالاتر از  $20$  میلی آمپر) برای کاربردهایی نظیر لایه نشانی به کمک پرتوی یون فراهم آمد.

با توجه به نتایج آزمایش ها مشاهده می شود که سامانه سه توری امکان استخراج جریان پرتوی  $76$  میلی آمپر را در انرژی حدود  $300$  الکترون فراهم آورده است (جدول ۷-۲ ص ۷۷).

ج- سامانه خنثی ساز - آزمون های انجام شده با این زیرسامانه با طراحی جدید، موید صحت عملکرد آن است. در طرح  $1906$ ، زاویه واگرائی پرتو یون برابر با  $19/6$  درجه بود در حالیکه در طرح  $2154$ ، این زاویه برابر با  $7/4$  درجه (بسیار نزدیک به نتیجه  $7/63$  در شبیه سازی؛ ص ۴۴) است که  $62/2\%$  بهبود یافته است. استفاده از یک مفتول صاف و بدون حلقه (عدم استفاده از کاتد فنی شکل) دارای چند مزیت است. از جمله کاهش سطح مقطع برخورد که هم طول عمر آن را افزایش می دهد و هم پراکندگی و اختلال پرتو را کاهش می دهد. دیگر اینکه به علت کشیدگی سیم در هنگام نصب، از خم شدن و افتادگی آن به علت گرم شدن، جلوگیری می شود. افزایش طول عمر، وقتی از یک مفتول صاف بدون حلقه های فنی استفاده می شود وابسته به سطح مقطعی از آن است که مقابل پرتو یون قرار می گیرد. مفتول صاف طولی برابر  $5$  سانتی متر در مقابل پرتو دارد در حالیکه اگر از یک فنریج با  $6$  حلقه استفاده شود طول فنی برابر  $8$  سانتی متر در قطر  $5$  سانتی متری پرتو خواهد بود. بنابراین با توجه به یکسان بودن قطر سیم برای هر دو وضعیت، می توان نتیجه

<sup>1</sup> End Hall Ion Source

گرفت که سطح مقابل پرتو  $1/6$  برابر افزایش یافته که به معنای کاهش طول عمر آن با همین نسبت است. اما اگر تنش‌های ایجاد شده در حین فنی ساختن سیم نیز در نظر گرفته شود، این نسبت افزایش خواهد یافت. بنابراین با قطعیت می‌توان افزایش طول عمر خنثی‌ساز را در حالت مفتول صاف، بیش از ۲ برابر ذکر نمود. این محاسبه با مقایسه تجربیات پیشین و فعلی نیز سازگار است. چنانچه طول عمر رشته‌های فنی‌پیچ غالباً در بهترین شرایط بین ۱۶ تا ۲۰ ساعت بوده در حالی که این کمیت برای رشته‌های سیمی در حدود ۲۸ تا ۳۸ ساعت است.

د- اجزای چشمه یون در آخرین مراحل مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفته و تقریباً تمامی اجزای آن از نو ساخته شده است.

ه- از آنجائیکه چشمه یون دارای کابل‌های متعدد با ولتاژها و جریان‌های متفاوت است (دارای ۶ کابل با تنوع ولتاژ از ۴۰ ولت تا ۹۰۰ ولت و جریان از ۱ میلی‌آمپر تا ۱۱ آمپر) ساخت مجموعه یکپارچه اتصال دهنده - الکتريکی با توجه به ابعاد صفحه کارسامانه‌های خلأ و نیز خود چشمه یون، علاوه بر آن که دستگاه را از سهولت کاربردی دور می‌سازد (کاربر ناچار خواهد بود بر روی صفحه کار دستگاه خلأ خود، سوراخ جدیدی ایجاد کند تا بتواند فیدتروی این سامانه را روی آن نصب نماید. درحالیکه در شرایط فعلی، کاربر آزاد خواهد بود هر کابل را به فیدتروی مناسب آن در هر جای صفحه کار متصل نماید، چنانچه در آزمایش‌های انجام شده رخ داد)، هزینه‌های متعددی را نیز برای کاربر ایجاد خواهد کرد. بعلاوه از انعطاف و تحرک چشمه یون مانند جابجائی و زاویه دادن به آن ممانعت خواهد کرد. بنابراین با استفاده از تجربیات بدست آمده، از ساخت اتصال الکتريکی یکپارچه صرفنظر گردید.

و- پایه نگهدارنده چشمه یون طوری طراحی شد که به راحتی قابل نصب بوده و امکان زاویه دادن به سامانه را نیز می‌دهد.

ز- آزمون‌های چشمه یون بطور کامل انجام و نتایج آن‌ها در بخش‌های پیشین ارائه گردید.

ح- تاثیر تابش پرتو یون بر خواص لایه آلومینیوم بررسی و نتایج آزمون‌ها با آنالیز لایه‌ها در دو حالت کمی و کیفی بیان گردید. تابش پرتو در حین لایه نشانی ضریب عبور لایه را کاهش شد. این امر، امکان استفاده از سامانه را در کاربردهایی مانند ساخت انواع صافی‌های نوری مهیا می‌سازد.

ط- راهنمای مربوط به راه‌اندازی و کار جهت سهولت کاربری بطور جداگانه تهیه گردیده است.

## ۵.۲. پیشنهادها:

چشمه پرتو یون پهن کاربردهای زیادی در پژوهش، فناوری و صنعت دارد. این سامانه در پژوهش‌های بنیادین مانند شتابدهنده‌های ذرات اتمی و زیر اتمی در انرژی‌های بالا موارد استفاده زیادی دارد. در پیشرانه سامانه‌های فضائی، نوع خاصی از چشمه پرتو پهن با سامانه استخراج دو توری بکار می‌رود. در ساخت قطعات اپتیکی مانند انواع صافی‌های دارای پوشش‌های چندلایه‌ای، که نیاز به چگالی بالای ماده لایه‌نشانی است، بکارگیری این سامانه اجتناب‌ناپذیر است. چشمه‌های پرتو یون پهن، در میکرو الکترونیک و نانو الکترونیک بخصوص در نانولیتوگرافی لایه‌ها بشدت مورد نیازند. یون کاشت از دیگر کاربردهای مهم این سامانه‌هاست.



ازینرو، توسعه این فناوری از نیازهای مهم کشور بوده طرح‌های آتی زیر را پیشنهاد می‌نماید:

- ۱- طراحی و ساخت چشمه یون پهن از نوع بدون توری (End Hall)
- ۲- طراحی و ساخت چشمه یون پهن برای لایه‌نشانی مستقیم بروش کندوپاش (Sputtering)
- ۳- طراحی و ساخت چشمه یون پهن برای کاشت یون (Ion Implantation)

Archive of SID



## ۶. منابع:

- ۱- سلحشور، مصطفی؛ زواریان، علی اصغر، ۱۳۹۱، گزارش پایانی طرح " طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی چشمه یون پهن"، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف
- [2] I. G. Brown, 2004. Wiley-VCH, "*The Physics and Technology of Ion Sources*", 2nd Ed, , Alabama, July 20–23, 2003, p. 238 Chap5
- [3] Zhang, H. "*Ion Sources*", Science Press, 1999, ISBN: 3540657479
- [4] Foster, J. E. (2004). "*The High Power Electric Propulsion Ion Thruster*". Joint Propulsion Conference and Exhibit (p. 3812). Fort Lauderdale: AIAA-2004-.
- [5] Martin, P. M. ( 2009). "*Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*": Science, Applications and Technology 3rd Edition. Elsevier.
- [6] Reynolds, Thaine W. "Mathematical Representation of Current Density Profiles from Ion Thrusters", AIAA-1971-693. 1971.
- [7] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. "*Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*", Second Edition, ISBN 0-521-431085, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [8] Farnell, C. Coffman, "*Performance and Lifetime Simulation of Ion Thruster Optics*", For the PHD, Colorado University, Spring 2007, 35th Joint Propulsion Conference, Los Angeles, June 20–24, 1999 .
- [9] Kohl, W. H. "*Handbook Of Materials and Techniques for Vacuum Devices*", AIP Press, 1994, ISBN: 1-56396-387-6
- [10] Cuomo, J. J., Rossnagel, S. M. and Kaufman, H. R.; "*Handbook of Ion Beam Processing Technology*", William Andrew, (1989).
- [11] Driscoll, Walter G. Vaughan W. "*Handbook of Optics*"; Sponsored by Optical Society of America, , 7-145, 146, 150



## **Abstract**

This report includes the description of the activities, accomplished in three stages of the optimization of the dc broad beam ion source project, each stage having titles: “plasma source optimization”, “derivation system optimization” and “other optimizations”. In the first phase, the different parts of the plasma source, including anode, cathode, magnetron and cooling system, have been improved. In the derivation system optimization stage, grid dimensions, connections, and their numbers have been optimized. In the last stage, the outer body, the legs, neutralization system and gas inlet connections have been designed and optimized. Finally, an optical sample has been made with and without the optimized ion beam source and their optical transmission coefficients, have been compared with each other in the visible wavelengths.

## **Target:**

Optimization of a laboratorially stable dc broad beam ion source having a maximum of 200 ev energy and 50 mA beam current

## **Methodology**

In this project, we have exploited from library studies, computer simulations and laboratorial experiences.

## **Results:**

A stable dc broad beam ion source, with a maximum energy of 300 ev, 6 cm in diameter, having 76 mA beam current, in 40 volts and 2A plasma voltage and current. The output beam is optimized by 3- grid derivation and hot cathode neutralization systems and has a divergence angle of 7.4 degrees.

## **Keywords:**

Broad ion beam, plasma source, derivation system, neutralizer



**FINAL REPORT**

**Broad Beam Ion Source**

**Optimization for Ion Beam**

**Assisted Deposition**

**(Ver.2)**

**(Code No.2154-55)**

**Sharif University of Technology**

**Branch**

**Aliasghar Zavarian, Maryam Salehi**

**Vaccum Research Group**

**December 2016**