

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ

نگارنده:

مظهر فتحی

استاد راهنما

دکتر احسان ابراهیمی بسابی

استاد مشاور

دکتر سید مصطفی ساداتی

بهمن ۹۹

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و اتقان تقدیم می نمایم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و بامهربانی

چگونه زیستن را به من آموخته اند.

برادر و همراه همیشگی و پشتوانه ی زندگیم

به همسر زندگی ام که در تمام طول تحصیل همراه و بهکام من بوده است.

به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرایاری نمودند.

به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه ی راهم بود.

پروردگار احسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کنشال عنایت بفرما

اکنون که به یاری پروردگار و یاری و راهبانی استاید بزرگ موفق به پایان این پایان نامه شده ام و وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به من کمک کرده اند را به عل آورم:

در آغاز از استاد عزیز جناب دکتر ابراهیمی بسابی که راهبانی این پایان نامه را به عهده داشته اند کمال تشکر را دارم.

از جناب دکتر ساداتی که زحمات مشاوری این پایان نامه را متقبل شدند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

از جناب آقای دکتر توکلی و جناب آقای دکتر سوهانی که زحمات داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند، تشکر و قدردانی می نمایم.

خالصانه از تمامی استاید به خصوص جناب دکتر حسن آبادی، معلمان و مدرسانی که در مقطع مختلف تحصیلی به من علم آموخته و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده اند تشکر می نمایم.

از همسر عزیزم و دوستان خوجم آقایان علی افراسیابی، کیوان عبدی و جناب آقا پور که در این مدت بسیار به من لطف داشتند نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تجدیدنامه

اینجانب **مظهر فتحی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ** تحت راهنمایی **دکتر احسان ابراهیمی بسابی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

بهمن ۹۹

مظهر فتحی

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

چشمه‌های یونی انواع مختلفی دارد که یکی از مهمترین آنها چشمه یونی پنینگ می‌باشد. با توجه به سادگی طراحی و بهره‌برداری، اندازه کوچک و توان مصرفی کم، چشمه‌های یونی پنینگ در زمینه‌های مختلفی مانند شتابدهنده ذرات، کاشت یون و کندوپاش کاربردهای فراوانی دارند. در این پایان نامه طراحی، شبیه سازی و ساخت چشمه یونی پنینگ کاتد سرد با استخراج محوری توضیح داده شده است. ابتدا اصول فیزیکی، ساختار و عملکرد این چشمه یونی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس شبیه سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم افزار CST مدل مناسب انتخاب شده و مراحل طراحی و ساخت این چشمه تشریح شده است. ولتاژ اشتعال و شدت جریان استخراج شده با تغییرات هندسه‌ی کاتد و آنتی کاتد چشمه یونی از مهمترین نتایج عملی بدست آمده می‌باشد. نتایج تجربی نشان می‌دهد، با طراحی جدید کاتد و آنتی کاتد، ولتاژ اشتعال کاهش و جریان استخراج شده، افزایش یافته است.

کلمات کلیدی : پلاسما، چشمه یونی پنینگ، برنامه شبیه‌سازی CST، ولتاژ اشتعال، جریان استخراج

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- فتحی، م . ابراهیمی بسابی، ا . ساداتی، س. فتحی امین، ن . (۱۳۹۸)، "طراحی و شبیه سازی کاتد چشمه یونی پنینگ " هفتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، شاهرود، ارائه به صورت پوستر

فهرست مطالب

فصل اول: پلاسما و تخلیه الکتریکی	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ پلاسما	۲
۱-۲-۱ چگالی ذرات پلاسما	۲
۱-۲-۲ کسر یونیزاسیون	۳
۱-۲-۳ انرژی و سرعت ذرات	۳
۱-۲-۴ دمای ذرات	۵
۱-۲-۵ نوسانات پلاسما	۶
۱-۲-۶ اثر میدان مغناطیسی	۶
۱-۲-۷ غلاف پلاسما	۷
۱-۲-۷-۱ طول دمای	۸
۱-۳ تخلیه الکتریکی	۱۰
۱-۳-۱ تخلیه الکتریکی افروخته DC	۱۰
فصل دوم: چشمه یونی پنینگ	۱۵
۲-۱ مقدمه	۱۶
۲-۲ چشمه یونی پنینگ (PIG)	۱۶
۲-۳ کاربردهای چشمه یونی پنینگ	۱۷
۲-۳-۱ شتابدهنده ذرات	۱۷
۲-۳-۲ کاشت یون	۱۸
۲-۳-۳ کندوپاش	۱۹
۲-۴ ساختار و عملکرد چشمه یونی پنینگ	۱۹

۲۱	۲-۵ انواع چشمه یونی پنینگ
۲۱	۲-۵-۱ نحوه تولید الکترون یونیزان
۲۲	۲-۵-۲ جهت استخراج باریکه یونی
۲۳	۲-۶ اجزای اصلی چشمه یونی پنینگ
۲۴	۲-۶-۱ اتاقک یونش
۲۴	۲-۶-۱-۱ آند
۲۵	۲-۶-۱-۲ کاتد
۲۷	۲-۶-۱-۳ آنتی کاتد
۲۹	۲-۶-۱-۴ آهنربا
۳۴	۲-۶-۲ سیستم استخراج
۳۵	۲-۷ مدل انتخابی برای ساخت چشمه یونی پنینگ
۳۷	فصل سوم: شبیه سازی چشمه یونی پنینگ
۳۸	۳-۱ مقدمه
۳۹	۳-۳ شبیه سازی چشمه یونی پنینگ
۴۱	۳-۳-۱ شبیه سازی آند
۴۳	۳-۳-۲ طراحی و شبیه سازی کاتد
۴۷	۳-۳-۳ شبیه سازی آهنربا
۵۰	۳-۳-۴ طراحی و شبیه سازی آنتی کاتد
۵۹	۳-۴ نتیجه گیری
۶۱	فصل چهارم: طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ
۶۲	۴-۱ مقدمه
۶۲	۲-۴ طراحی چشمه یونی پنینگ
۶۴	۴-۲-۱ مدلسازی و ساخت اجزای اصلی اتاقک یونش

۴-۲-۱-۱	آهنربا و مدلسازی قطعه نگهدارنده آهنربا	۶۴
۴-۲-۱-۲	مدلسازی و ساخت کاتد	۶۵
۴-۲-۱-۳	مدلسازی و ساخت آند	۶۸
۴-۲-۱-۴	مدلسازی و ساخت آنتی کاتد	۶۸
۴-۲-۲	طراحی و ساخت پوسته نگهدارنده اتاقک یونش	۷۰
۴-۲-۳	طراحی و ساخت فلنج	۷۳
۴-۳	فنجان فاردای	۷۹
فصل پنجم : آزمایش و اندازه گیری		۸۱
۵-۱	مقدمه	۸۲
۵-۲	تمیزکاری قطعات	۸۲
۵-۳	سرهم کردن قطعات	۸۳
۵-۴	آزمایش خلا و نشت یابی	۸۷
۵-۵	روشن کردن چشمه	۸۸
۵-۶	آزمایش و اندازه گیری	۸۹
۵-۶-۱	اندازه گیری جریان تخلیه در ولتاژهای مختلف	۸۹
۵-۶-۲	اندازه گیری فشار بر حسب ولتاژ اشتعال	۹۰
۵-۶-۳	اندازه گیری جریان تخلیه بر حسب فشار	۹۱
۵-۶-۴	اندازه گیری جریان یون استخراج شده بر حسب فشار و ولتاژ آند برای دو مدل آنتی کاتد	۹۱
۵-۷	نتیجه گیری	۹۴
۵-۸	پیشنهادهات	۹۵
مراجع		۹۶

فهرست جداول

جدول ۱-۲ مواد مورد استفاده برای ولتاژ اشتعال کم و بالاتر ۲۶

جدول ۱-۳ مشخصات تغییرات ایجاد شده در هندسه ی کاتدها ۴۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ غلاف پلاسما: تغییرات پتانسیل پلاسما از داخل حجم پلاسما تا دیواره ۹
- شکل ۱-۲ منحنی پاشن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برای چندین گاز مختلف ۱۴
- شکل ۱-۲ نمایشی از چشمه یونی پنینگ ۲۰
- شکل ۲-۲ طراحی نمایشی از یک چشمه یونی پنینگ کاتد سرد با استخراج محوری ۲۲
- شکل ۲-۳ طراحی نمایشی از یک چشمه یونی پنینگ کاتد گرم با استخراج شعاعی ۲۳
- شکل ۲-۴ اجزای اصلی چشمه یونی (a) اتاقک یونش (b) سیستم استخراج (c) باریکه یون ۲۳
- شکل ۲-۵ نمایشی از هندسه‌ی اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ نوعی ۲۴
- شکل ۲-۶: نمایشی از هندسه‌های مختلف برای آنتی کاتد ۲۸
- شکل ۲-۷: نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب فشار برای هندسه‌ی مختلف آنتی کاتد در ولتاژ تخلیه ۲ کیلوولت ۲۸
- شکل ۲-۸ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب فشار برای زوایای مختلف آنتی کاتد ۲۹
- شکل ۲-۹ (الف) چشمه یونی با آهنربای استوانه‌ای (ب) چشمه یونی با آهنربای حلقه‌ای (ج) چشمه یونی با آهنربای مالتی کاسپ ۳۲
- شکل ۲-۱۰ تعداد ذرات بر حسب نانو ثانیه برای سه هندسه‌ی مختلف آهنربا ۳۳
- شکل ۲-۱۱ تعداد ذرات موجود در چشمه یونی بر حسب نانو ثانیه برای دو هندسه‌ی تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای ۳۳
- شکل ۲-۱۲ چشمه یونی با آهنربای دائمی در اطراف آند ۳۴
- شکل ۳-۱ چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده در برنامه CST ۳۹
- شکل ۳-۲ سطح تابنده ذرات باردار که به عنوان پلاسمای درون چشمه یونی شبیه سازی شده است ۴۰
- شکل ۳-۳ خطوط هم پتانسیل چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده در برنامه CST ۴۱
- شکل ۳-۴ نمودار جریان استخراج شده بر حسب به قطر خارجی آند چشمه یونی پنینگ ۴۲

شکل ۳-۵ نمودار جریان استخراج شده بر حسب به ضخامت دیواره آند ۴۳

شکل ۳-۶ مدل کاتدهای شبیه سازی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) کاتد صفحه‌ای ساده (ب) کاتد یک پله‌ای (ج) کاتد دو پله‌ای (د) کاتد سه پله‌ای (ه) کاتد چهار پله‌ای (و) کاتد دو پله‌ای مخروطی (ز) کاتد سه پله‌ای و مخروطی (ح) کاتد مخروطی ساده ۴۵

شکل ۳-۷ خطوط هم پتانسیل مدل کاتدهای شبیه سازی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) کاتد صفحه‌ای ساده (ب) کاتد یک پله‌ای (ج) کاتد دو پله‌ای (د) کاتد سه پله‌ای (ه) کاتد چهار پله‌ای (و) کاتد دو پله‌ای مخروطی (ز) کاتد سه پله‌ای و مخروطی (ح) کاتد مخروطی ساده ۴۶

شکل ۳-۸ نمودار میدان الکتریکی بر حسب به مدل کاتدهای طراحی شده ۴۷

شکل ۳-۹ چشمه یونی با دو آهنربای حلقه‌ای اطراف آند ۴۸

شکل ۳-۱۰ خطوط میدان مغناطیسی شبیه سازی شده ناشی از دو آهنربای حلقه‌ای در صفحه x-z برای چشمه یونی پنینگ ۴۸

شکل ۳-۱۲ خطوط میدان مغناطیسی شبیه سازی شده ناشی از دو آهنربای حلقه‌ای در صفحه x-y برای چشمه یونی پنینگ ۴۹

شکل ۳-۱۳ نمودار میدان مغناطیسی بر حسب طول محور آند ۵۰

شکل ۳-۱۳ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب به قطر روزنه استخراج آنتی کاتد ۵۱

شکل ۳-۱۴ مدل آنتی کاتدهای طراحی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) آنتی کاتد با روزنه استوانه‌ای (ب) آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای (ج) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) (د) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه داخل چشمه) ۵۲

شکل ۳-۱۵ خطوط هم پتانسیل مدل آنتی کاتدهای طراحی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) آنتی کاتد با روزنه استوانه‌ای (ب) آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای (ج) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) (د) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه داخل چشمه) ۵۳

شکل ۳-۱۶ نمودار جریان یون استخراج شده برحسب به مدل آنتی کاتدهای طراحی شده
۵۴.....

شکل ۳-۱۷ شکل باریکه خروجی از چشمه یونی پنینگ برای مدل آنتی کاتدهای طراحی شده (الف) چشمه
یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه استوانه‌ای (ب) چشمه یونین پنینگ با آنتی کاتد روزنه مخروطی و استوانه‌ای
(ج) چشمه یونی با آنتی کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) (د) چشمه یونی با آنتی
کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به داخل چشمه) ۵۵

شکل ۳-۱۸ خطوط چگالی جریان چشمه یونی پنینگ برای مدل آنتی کاتدهای طراحی شده (الف) چشمه
یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه استوانه‌ای (ب) چشمه یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه مخروطی و استوانه‌ای
(ج) چشمه یونی با آنتی کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) (د) چشمه یونی با آنتی
کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به داخل چشمه) ۵۶

شکل ۳-۱۹ خطوط هم پتانسیل چشمه یونی شبیه سازی شده با آنتی کاتد مخروطی (سطح مقطع کوچک
روبه بیرون) در زاویه‌های مختلف (الف) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۳۵ درجه (ب) آنتی کاتد مخروطی با
زاویه ۳۷/۵ درجه (ج) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۴۰ درجه (د) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۴۵ درجه (ه)
آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۵۰ درجه (و) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۵۵ درجه (ز) آنتی کاتد مخروطی با
زاویه ۶۰ درجه ۵۷

شکل ۳-۲۰ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب به زاویه‌های مختلف برای مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی
مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) ۵۸

شکل ۴-۱ طرح اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ مدلسازی شده برای ساخت ۶۳

شکل ۴-۲ طرح دو آهنربای حلقه‌ای و قطعه نگهداره PTFE مدلسازی شده ۶۵

شکل ۴-۳ طرح کاتد سه پله‌ای و مخروطی ساخت شده ۶۶

شکل ۴-۴ طرح عایق بین آند و کاتدها ساخت شده ۶۷

شکل ۴-۵ طرح آند ساخت شده ۶۸

شکل ۴-۶ طرح آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) ساخت شده ۶۹

شکل ۴-۷ طرح آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای ساخت شده ۷۰

شکل ۴-۸ طرح پوسته نگهدارنده اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ ساخت شده ۷۱

- شکل ۴-۹ طرح قطعه PTFE نگهدارنده پوسته ۷۲
- شکل ۴-۱۰ لوله شیشه‌ای پیرکس استفاده شده ۷۲
- شکل ۴-۱۱ طرح فلنج پایین ساخت شده ۷۳
- شکل ۴-۱۲ لوله تزریق گاز و فید ترو ۷۴
- شکل ۴-۱۳ طرح فلنج بالای ساخت شد ۷۵
- شکل ۴-۱۴ طرح قطعه تفلونی استوانه‌ای ساخت شده ۷۵
- شکل ۴-۱۵ فلنج طراحی و ساخته شده برای انتهای لوله شیشه‌ای ۷۶
- شکل ۴-۱۶ قطعه تفلونی T شکل متصل شده به فنجان فارادی و اتصالات پمپ خلا ۷۶
- شکل ۴-۱۷ نقشه انفجار اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ ۷۷
- شکل ۴-۱۸ قطعات اصلی اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ ۱- کاتد ۲- عایق بین آند و کاتدها ۳- آند ۴- عایق بین کاتدها و آند ۵- آنتی کاتد ۶- پوسته نگهدارنده اتاقک یونش ۷۸
- شکل ۴-۱۹ قطعات اصلی اتاقک یونش سرهم شده (سمت راست) پوسته نگهدارنده اتاقک یونش (سمت چپ) ۷۸
- شکل ۴-۲۰ قسمت های اصلی فارادی کاپ موجود در آزمایشگاه به ترتیب از چپ به راست: ۱- ساختار نیمه مخروطی ۲- فارادی کاپ نیمه استوانه ای ۳- عایق بین فارادی کاپ نیمه استوانه ای و بازدارنده ۴- بازدارنده ۵- عایق بین بازدارنده و لوله رانش ۶- لوله رانش ۸۰
- شکل ۵-۱ قطعات چشمه یونی پنینگ قرار گرفته در دستگاه التراسونیک ۸۳
- شکل ۵-۲ اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ سرهم شده ۸۴
- شکل ۵-۳ اتاقک یونش قرار گرفته در فلنج پایین با استفاده از یک قطعه تفلونی (سمت چپ) اورینگ قرار گرفته در لوله شیشه‌ای پیرکس و فلنج بالا (سمت راست) ۸۵
- شکل ۵-۴ مجموعه کلی چشمه یونی پنینگ ۱- فنجان فارادی ۲- قطعه تفلونی T شکل ۳- اتصالات پمپ خلا ۴- فشار سنج پیرانی ۵- لوله شیشه‌ای پیرکس ۶- اتاقک یونش چشمه یونی قرار گرفته در پوسته

- نگهدارده ۷- آهنربای حلقه‌ای قرار گرفته در قطعه نگهدارده تفلونی ۸- فلنج انتهایی چشمه ۹- لوله تزریق گاز و سیم متصل شده به فیدترو ۸۶
- شکل ۵-۵ فشار خلا مجموعه چشمه یونی پنینگ قرائت شده ۸۷
- شکل ۵-۶ لحظه روشن شدن چشمه یونی پنینگ ۸۸
- شکل ۵-۷ نمودار جریان تخلیه نسبت به تغییر ولتاژ آند ۸۹
- شکل ۵-۸ نمودار فشار بر حسب ولتاژ اشتعال ۹۰
- شکل ۵-۹ نمودار جریان تخلیه بر حسب فشار ۹۱
- شکل ۵-۱۰ تاثیر ولتاژ اعمال شده به فلنج انتهایی لوله شیشه‌ای بر روی بایکه یونی استخراج الف) ۳۰۰ ولت پتانسیل اعمال شده به فلنج ب) پتانسیل اعمال نشده ۹۲
- شکل ۵-۱۱ نمودار جریان استخراج شده بر حسب فشار در ولتاژ ۷۰۰ ولت برای مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) و مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای ۹۳
- شکل ۵-۱۲ نمودار جریان استخراج شده بر حسب ولتاژ در فشار $1.5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ برای مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) و مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی و استوانه‌ای ۹۴

فصل اول: پلاسما و تخلیه الکتریکی

۱-۱ مقدمه

چشمه‌ی یونی در اصل یک چشمه‌ی پلاسما می‌باشد که با استخراج یون از چشمه‌ی پلاسما به چشمه‌ی یونی تبدیل می‌شود و همچنین تولید پلاسما غالباً بر پایه تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد. مشخصات ترکیبات باریکه یونی توسط پلاسما و استخراج کننده مشخص می‌شود. بدین ترتیب فیزیک چشمه‌ی یونی عمدتاً فیزیک پلاسما است که در ادامه فصل اصول و ویژگی‌های فیزیک پلاسما و تخلیه الکتریکی را که برای درک عملکرد و رفتار چشمه‌ی یونی مورد نیاز است، مرور می‌کنیم [۴-۱].

۱-۲ پلاسما

در چشمه‌ی یونی، پلاسما واسطه‌ای است که یون‌ها از آن استخراج می‌شوند. اگر گازها گرم شوند، الکترون‌های اتم‌های گاز شروع به نوسان می‌کنند و احتمال یونیزاسیون گاز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، الکترون‌ها انرژی بیشتری به دست می‌آورند و آزادانه به حرکت در می‌آیند. در نتیجه، الکترون‌ها بر نیروهای الکترواستاتیک غلبه می‌کنند. یک تعریف مفید برای پلاسما چنین است: پلاسما گاز شبه خنثی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهد. به پلاسما حالت چهارم ماده نیز گفته می‌شود [۱-۴، ۹]. تقریباً برابر بودن تعداد بارهای منفی و مثبت موجود در یک سیستم را شبه خنثی بودن تعریف می‌کنند.

در ادامه فصل برخی از ویژگی‌ها و پارامترهای پلاسما و تخلیه الکتریکی به اختصار توضیح داده شده است.

۱-۲-۱ چگالی ذرات پلاسما

اجزای تشکیل دهنده پلاسما یون‌ها، الکترون‌ها و ذرات خنثی می‌باشند. تعداد بر واحد حجم هر یک از اجزای تشکیل دهنده پلاسما را چگالی پلاسما می‌نامند. n_e چگالی الکترون، n_i چگالی یون و n_n چگالی ذرات خنثی را نشان می‌دهند. از آنجا که پلاسما در کل یک مجموعه خنثی است، چگالی یون n_i برابر

است با چگالی الکترون n_e ولی برای پلاسما در صورتی که دارای یون‌های $+1, +2, \dots, +\infty$ باشد الزاماً چگالی الکترون و یون برابر نمی‌باشد. و در حالت کلی

$$\sum Q_j n_j = 0 \quad (1-1)$$

که $z = 1, 2, 3, \dots, Z$ و Q حالت بار است. اصطلاح چگالی پلاسما اغلب به معنای چگالی یون یا چگالی الکترونی پلاسما است. بدلیل خنثی بودن پلاسما برای یون‌های باردار مثبت معمولاً چگالی یون و برای یون‌های باردار مرتبه بالا از چگالی الکترون استفاده می‌کنیم. اکثر پلاسماهای آزمایشگاهی دارای مقدار چگالی در محدوده $10^8 - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ هستند که برای استخراج باریکه مطلوب در چشمه‌ی یونی چگالی پلاسما باید در محدوده 10^{12} cm^{-3} باشد [۱-۲، ۴، ۹].

۲-۲-۱ کسر یونیزاسیون

کسر یونیزاسیون (یا درصد یونیزاسیون پلاسما) به عنوان نسبت چگالی یون به چگالی کل یون‌ها و ذرات خنثی تعریف می‌شود:

$$\text{کسر یونیزاسیون} = \frac{n_i}{n_i + n_n} \quad (2-1)$$

برای توصیف پلاسما با درصد یونیزاسیون بیشتر از ۱۰٪ از اصطلاح کاملاً یونیزه^۱ استفاده می‌شود [۱، ۲، ۴، ۹].

۲-۲-۳ انرژی و سرعت ذرات

طبق نظریه جنبشی گازها، توزیع سرعت ذرات در گازها از توزیع ماکسول-بولتزمن پیروی می‌کند.

$$f = (v_x \cdot v_y \cdot v_z) = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT} \right) \quad (3-1)$$

¹ fully ionized

n چگالی ذرات، m جرم ذرات، k ثابت بولتزمن، T دما، v_x, v_y, v_z سرعت ذرات می‌باشد. پهنای توزیع با استفاده از دما مشخص می‌شود که با افزایش دمای گاز، پهنای توزیع گسترده‌تر می‌شود. با توجه به پهنای توزیع همیشه ذره‌هایی در گاز وجود دارند که سرعت کافی برای انجام یونیزاسیون دارند. در دماهای بسیار زیاد، کسری از مواد یونیزه به اندازه کافی بزرگ می‌شود که حجم مواد نشان دهنده‌ی رفتار پلاسما می‌باشد. همچنین ذرات باردار از طریق برخورد الاستیک بایکدیگر واکنش می‌دهند [۱،۴،۹]. سه بعد این توزیع کاملاً از یکدیگر مستقل می‌باشند پس برای هر بعد می‌توان نوشت:

$$f(v_x) = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{mv_x^2}{2kT} \right) \quad (۴-۱)$$

می‌توانیم با استفاده از تابع توزیع سرعت $f(v)$ ، تابع توزیع تندی $F(v)$ و تابع توزیع انرژی $f(E)$ را بدست آورد [۱-۴،۹]:

$$\begin{aligned} F(v) &= 4\pi v^2 f(v) \\ &= 4\pi v^2 n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) \end{aligned} \quad (۵-۱)$$

$$\begin{aligned} f(E) &= F(v) \frac{dv}{dE} \\ &= n \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/2} (kT)^{-3/2} E^{1/2} e^{-E/kT} \end{aligned} \quad (۶-۱)$$

با استفاده از توابع ذکر شده می‌توانیم میانگین سرعت ذرات و میانگین انرژی جنبشی ذرات را محاسبه کرد:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (۷-۱)$$

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT \quad (۸-۱)$$

در یک پلاسمای همگن انرژی جنبشی مساوی بین سه درجه آزادی تقسیم شده است که به صورت زیر می باشد:

$$\overline{E_x} = \overline{E_y} = \overline{E_z} = \frac{1}{2}kT \quad (9-1)$$

بنابراین میانگین سرعت گرمایی الکترون ها و یون ها از رابطه زیر به دست می آید:

$$\bar{v}_e = 67\sqrt{T_e} \text{ cm } \mu s^{-1} \quad (10-1)$$

$$\bar{v}_i = 1.57 \sqrt{\frac{T_i}{A}} \text{ cm } \mu s^{-1} \quad (11-1)$$

T_e و T_i بر حسب eV و A بر حسب amu می باشد [۱-۴،۹].

۴-۲-۱ دمای ذرات

دمای پلاسما نیز یک پارامتر اساسی و مهم است. دمای پلاسما را با واحد الکترون ولت (eV) بیان می کنند:

$$1 \text{ eV} = 11600^\circ \text{ K} \quad (12-1)$$

دمای یون T_i و دمای الکترون T_e لزوماً برابر نیستند و در حضور میدان مغناطیسی حتی ذرات همجنس، (مثلاً الکترون ها یا یون ها) می توانند دو نوع دما داشته باشند. علت این امر این است که نیروهای وارد بر یک یون یا یک الکترون در امتداد میدان مغناطیسی متفاوت از نیروهای وارد بر آن ها در امتداد عمود بر میدان مغناطیسی هستند بنابراین ما می توانیم چهار دمای ذره مختلف $T_{e\perp}$ ، $T_{e\parallel}$ ، $T_{i\perp}$ و $T_{i\parallel}$ داشته باشیم [۱،۲،۴،۹]

۵-۲-۱ نوسانات پلاسما

الکترون‌ها در اثر لختی‌شان، از وضعیت اولیه آن طرف‌تر رفته و با فرکانس مشخصه‌ای که به عنوان فرکانس پلاسما شناخته شده است نوسان می‌کنند. این نوسان به اندازه‌ای سریع است که یون‌های سنگین مجالی برای پاسخگویی به میدان نوسان‌کننده پیدا نمی‌کنند و می‌توان آن‌ها را ثابت در نظر گرفت. پلاسما چندین حالت طبیعی نوسان دارد که شاید اساسی‌ترین آنها نوسانات الکترون پلاسما باشد. فرکانس نوسان را فرکانس الکترون پلاسما می‌نامند رابطه فرکانس الکترون پلاسما (ω_{pe}) به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \quad (۱۳-۱)$$

که ϵ_0 فضای آزاد، n_e چگالی الکترون، m_e جرم الکترون است.

همچنین یون‌ها نیز می‌توانند در فرکانس طبیعی خود نوسان داشته باشند. این فرکانس، فرکانس یون پلاسما (ω_{pi}) نامیده می‌شود و به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_{pi}^2 = \frac{Q^2 e^2 n_i}{\epsilon_0 m_i} \quad (۱۴-۱)$$

که Q حالت بار یون، n_i چگالی یون، m_i جرم یون است [۴].

۶-۲-۱ اثر میدان مغناطیسی

در یک پلاسما که میدان مغناطیسی وجود دارد، حرکت یون‌ها و الکترون‌ها به صورت دایره‌ای در صفحه‌ی عمود بر میدان مغناطیسی (یعنی جهت عرضی) صورت می‌گیرد. به طوری که ذرات به صورت مارپیچی حرکت می‌کند که ترکیبی از حرکت دایره‌ای عرضی و سرعت ثابت طولی می‌باشد [۱،۴،۹].

میدان مغناطیسی از طریق نیروی لورنتس^۱ بر حرکت ذرات باردار اثر می‌گذارد. ذره‌ای با بار $q = eQ$ و سرعت v در حال حرکت در یک میدان مغناطیسی با چگالی شار B نیرویی را تجربه می‌کند که به صورت زیر می‌باشد:

$$F = eQv \times B \quad (۱۵-۱)$$

که F نیرو، e واحد بار، Q تعداد بار، v سرعت، B میدان مغناطیسی است. برای حرکت دورانی داریم:

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (۱۶-۱)$$

$$r = \frac{mv_{\perp}}{eQB} \quad (۱۷-۱)$$

$$E_{\perp} = \frac{1}{2} mv_{\perp}^2 = kT_{\perp} \quad (۱۸-۱)$$

که r شعاع چرخشی است و به ترتیب برای یون و الکترون داریم:

$$r_i = 0.0014 \frac{\sqrt{AT_{i\perp}}}{QB} \quad (۱۹-۱)$$

$$r_e = 0.00033 \frac{\sqrt{T_{e\perp}}}{B} \quad (۲۰-۱)$$

که r برحسب cm، A برحسب amu، T_i برحسب eV و B برحسب تسلا است [۱،۴،۹].

۷-۲-۱ غلاف پلاسما

ذرات پلاسما (یون ها و الکترون ها) ذرات باردارند و از طریق میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با یکدیگر برهمکنش دارند. برای پلاسما یک طول مقیاس وجود دارد که مسافت را مشخص می‌کند که بر روی آن میدان الکتریکی یک ذره آزمایش گسترش می‌یابد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که یک میدان الکتریکی از

¹ Lorentz

یک منبع خارجی به پلاسما اعمال شود. یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما، توانایی آن برای ایجاد حفاظ در مقابل پتانسیل‌های الکتریکی است که به آن اعمال می‌شود. منشا این حفاظ در ذرات باردار نهفته است که به واسطه میدان اعمال شده بر روی پلاسما توزیع مجدد می‌یابند. این فاصله ایجاد شده در اثر اعمال میدان الکتریکی خارجی را حفاظ پلاسما می‌گوییم. یک لایه مرزی بین پلاسما و دیواره ماده اطراف پلاسما ایجاد می‌شود. چون الکترون‌ها سریع‌تر از یون‌ها حرکت می‌کنند پلاسما را با سرعت بیشتری نسبت به یون‌های ترک می‌کنند، بنابراین دیواره نسبت به پلاسما بار منفی می‌گیرد. از طرف دیگر پلاسما نسبت به دیواره که آن را محصور می‌کند، دارای پتانسیل مثبت می‌باشد. به این لایه مرزی، غلاف پلاسما گفته می‌شود [۱،۲،۴،۹].

۱-۲-۷-۱ طول دبای

این پدیده نخستین بار در حدود ۸۰ سال پیش توسط پیتر دبای^۱ مورد بررسی قرار گرفت. اساس فیزیکی طول دبای همانند حفاظ پلاسما است که در قسمت قبل بررسی کردیم به طوری که فاصله‌ی حفاظ یا ضخامت غلاف پلاسما را به ما می‌دهد. فرمول طول دبای λ_D به صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda_D^2 = \frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e} \quad (۲۱-۱)$$

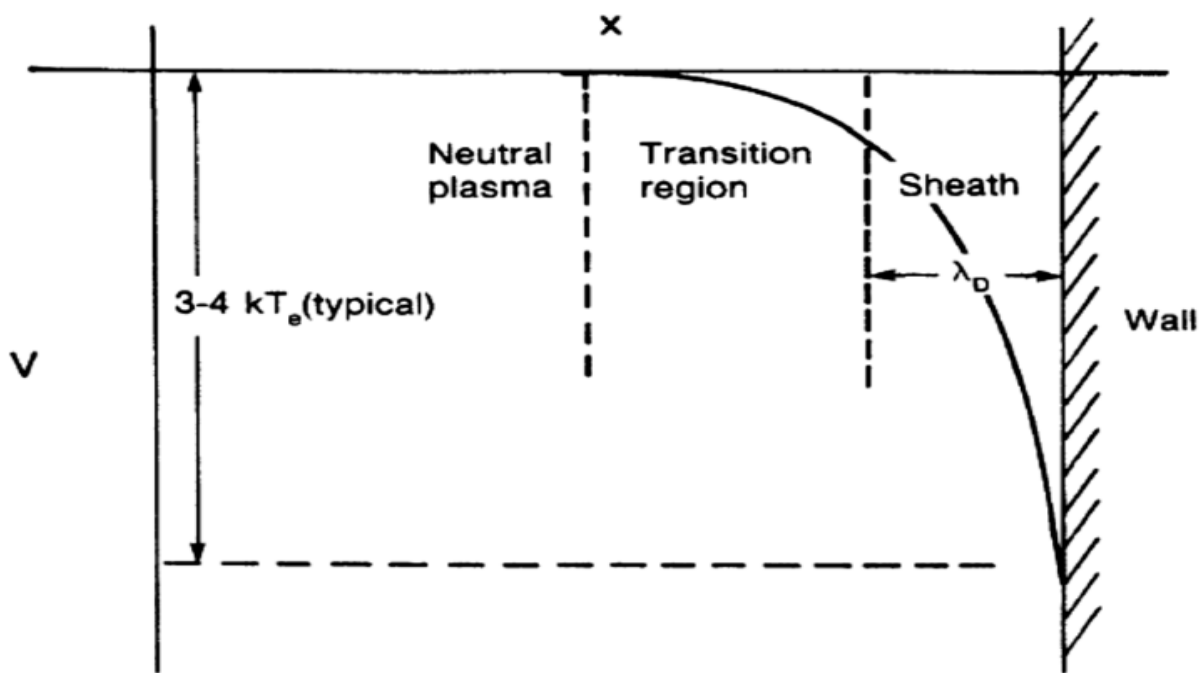
یا

$$\lambda_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (۲۲-۱)$$

که دمای الکترون T_e بر حسب eV، چگالی الکترون n_e بر حسب تعداد الکترون‌ها در واحد حجم cm^{-3} و طول دبای λ_D بر حسب cm می‌باشد. همان طور که انتظار می‌رود می‌بینیم که هر چقدر چگالی الکترون

^۱ Peter Debye

افزایش یابد، طول دبای کاهش پیدا می کند، زیرا هر لایه از پلاسما، تعداد الکترون بیشتری را شامل می شود. به علاوه طول دبای با افزایش kT_e افزایش می یابد. زیرا ابربار^۱ در غیاب اغتشاش حرارتی فروریخته و به صورت یک لایه بی نهایت نازک در می آید. همانگونه که در شکل ۱-۱ مشخص است؛ طول دبای، $1/e$ عرض ناحیه انتقال می باشد. مقدار افت غلاف پلاسما، یعنی پتانسیل پلاسما نسبت به دیوار، به پارامترهای دقیق پلاسما بستگی دارد، اما به طور معمول چندین برابر (۳ یا ۴ برابر) دمای الکترون است [۱،۲،۴،۹].



شکل ۱-۱ غلاف پلاسما: تغییرات پتانسیل پلاسما از داخل حجم پلاسما تا دیواره [۱].

^۱ charge cloud

۳-۱ تخلیه الکتریکی

تخلیه الکتریکی در علم فیزیک و صنعت کاربرد فراوانی دارد مثلاً در تولید نور، فیزیک پلاسما و تولید گرما. اصولاً تخلیه الکتریکی به معنی جاری شدن جریان الکتریکی از میان یک محیط گازی است و این در صورتی است که بعضی از ذرات گاز یونیزه شده و علاوه بر آن میدان الکتریکی موجود باشد تا ذرات را براند. در حالت پایدار بر حسب جریان، تخلیه الکتریکی را به سه دسته تقسیم می‌کنند: تخلیه افروخته^۱، تخلیه تاریک^۲ و تخلیه قوسی^۳. که ما در اینجا از تخلیه الکتریکی افروخته که با استفاده از ولتاژ DC عمل می‌کند، استفاده می‌کنیم [۵].

۳-۱-۱ تخلیه الکتریکی افروخته DC

روش‌های مختلفی برای تولید پلاسما وجود دارد یکی از این روش‌ها تخلیه الکتریکی افروخته DC می‌باشد. تخلیه افروخته DC را می‌توان با دو الکتروود رسانا که درون یک لوله شیشه‌ای قرار گرفته و به منبع تغذیه متصل شده است، مشاهده کرد. این لوله می‌تواند با گازهای مختلف پر شود و با افزایش ولتاژ DC اعمال شده در دو الکتروود جریان افزایش می‌یابد. بر همین اساس با اعمال یک ولتاژ بالا بر الکتروودها گاز داخل شیشه یونیزه شده و پلاسمایی با جریان پایین تولید می‌شود. در این نوع تخلیه فشار از مرتبه ۱/۱۰ torr تا ۱۰ torr می‌باشد. در این نوع تخلیه ولتاژ در محدوده چند صد ولت و جریان در محدوده چند ده میلی آمپر می‌باشد. نور حاصل از تخلیه هر گاز رنگ خاص خود را دارد که دلیلش را باید در وجود ترازهای خاص انرژی برای اتم‌ها یا مولکول‌های تشکیل دهنده آن گاز جستجو کرد. بررسی شدت و رنگ نور گسیل شده حاصل از تخلیه الکتریکی روشی برای شناسایی آن گاز در فشار و شدت جریان مشخص می‌باشد. هر گازی حاوی یون‌های آزاد و الکترون‌های آزاد است، این حامل‌های بار آزاد از طریق میدان الکتریکی اعمال شده، شتاب

^۱ Glow

^۲ Townsend

^۳ ARC

گرفته و با اتم‌ها یا مولکول‌ها برخورد می‌کنند. حامل‌های بار آزاد شتاب گرفته و در اثر برخورد انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند. ولتاژ اعمال شده در الکترودها باعث می‌شود که انرژی جنبشی حامل‌های بار آزاد برای یونیزاسیون ذرات خنثی حفظ شود. اگر انرژی جنبشی حامل‌های بار آزاد برای یونیزه کردن ذرات خنثی به اندازه کافی باشد، حامل‌های بار شتاب داده شده به وسیله برخورد غیرالاستیک با اتم‌ها یا مولکول‌های خنثی، انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند. در غیر این صورت، انرژی حامل‌های بار آزاد برای برانگیخته کردن یا یونیزه کردن اتم‌ها و مولکول‌ها هدف ناچیز بوده و برخورد الاستیک انجام می‌دهد. (یونیزاسیون به معنای جدا کردن الکترون‌ها از اتم‌ها است در حالی که برانگیختگی به این معنی است که الکترون‌های یک اتم را نسبت به الکترون‌ها به سطح انرژی بالاتر برساند.) با یونیزاسیون و برانگیختگی اتم‌ها یا مولکول‌ها، تعداد حامل‌های بار تولید شده افزایش می‌یابد و پدیده بهمن رخ می‌دهد.

با اعمال ولتاژ یون‌ها و الکترون‌ها تولید شده به خصوص الکترون‌ها انرژی جنبشی کسب کرده و دوباره باعث برانگیختگی و یونیزاسیون می‌شوند. در صورت برخورد الاستیک بین الکترون‌ها و اهداف، انرژی از دست داده شده الکترون یا انرژی منتقل شده توسط معادله ۱-۲۳ قابل محاسبه است [۸-۶]

$$W_{tr} = \frac{2m_e}{M_T} W_e \quad (۲۳-۱)$$

که W_{tr} انرژی از دست داده شده الکترون یا انرژی منتقل شده، M_T جرم هدف، m_e جرم یک الکترون و W_e انرژی الکترون می‌باشد. برای برخورد غیرالاستیک بین الکترون‌های پرنرژی و هدف سنگین، محاسبه برخورد تغییر می‌کند. کسر میانگین انرژی انتقال یافته به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{W_{tr}}{W_e} = \frac{M_T}{M_T + m_e} \quad (۲۴-۱)$$

پدیده بهمن ناشی از الکترون‌ها و یون‌های جدید تولید شده می‌باشد و فرآیند تکثیر الکترون ادامه پیدا می‌کند. تعداد الکترون N که از طریق الکتروود آند در واحد زمان شارش می‌یابد و توسط معادله ۱-۲۵ می‌توان محاسبه کرد:

$$N = N_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (25-1)$$

که N_0 تعداد الکترون اولیه، α احتمال اینکه الکترون‌های شتاب گرفته پس از طی یک مسافت معین در محفظه‌ی تخلیه اتم‌های گاز را یونیزه کند (α اولین ضریب تاونسند^۱ است). عبارت $e^{\alpha d}$ ضریب تقویت در مسافت d می‌باشد. اما علاوه بر الکترون‌های تولید شده یون‌هایی نیز تولید می‌شود. ضریب γ بازده الکترون ثانویه است به‌عنوان مثال الکترون‌های ثانویه که از برخورد یون‌ها به کاتد تولید شده‌اند. همچنین γ ضریب ثانویه تاونسند نیز نامیده می‌شود. ضریب انتشار الکترون ثانویه γ به نوع ماده که کاتد از آن ساخته شده و ساختار سطح کاتد بستگی دارد. هنگامی که مقدار N به سمت بی‌نهایت می‌رود، شکست الکتریکی گاز در شکاف بین دو الکتروود رخ می‌دهد. در صورتی که مخرج معادله ۱-۲۵ به سمت صفر رود فاکتور تقویت الکترون N/N_0 بی‌نهایت می‌شود. شرایط شکست الکتریکی توسط معادله ۱-۲۶ محاسبه می‌شود:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (26-1)$$

برای حفظ پلاسما DC شرایط زیر باید فراهم شود:

$$\gamma e^{\alpha d} = 1 \quad (27-1)$$

زمانی که $\gamma e^{\alpha d} \rightarrow 1$ ، مخرج کسر معادله ۱-۲۵ به سمت صفر رفته و تعداد الکترون N بی‌نهایت خواهد شد. به همین دلیل شکست الکتریکی رخ می‌دهد.

¹ Townsend

مقدار α را می‌توان بر حسب پارامترهای متغیر به صورت معادله ۲۸-۱ بدست آورد:

$$\alpha = Ape^{-Bp/E} \quad (28-1)$$

در معادله ۲۸-۱ ثابت‌های A و B برای گازهای مختلف متفاوت است، p فشار گاز را تعیین می‌کند و E میدان الکتریکی در فضای بین دو الکترود می‌باشد بنابراین $E = V/d$. ولتاژ شکست یا ولتاژ آغاز V_{br} را می‌توان با ترکیب معادله ۲۶-۱ و معادله ۲۸-۱ محاسبه کرد. علاوه بر این، ولتاژ شکست در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد پایدار است و تحرک پذیری الکترون^۱ به طور عکس با فشار متناسب است. پس داریم:

$$Ape^{-Bp/E} = \ln(1 + \gamma^{-1}) \quad (29-1)$$

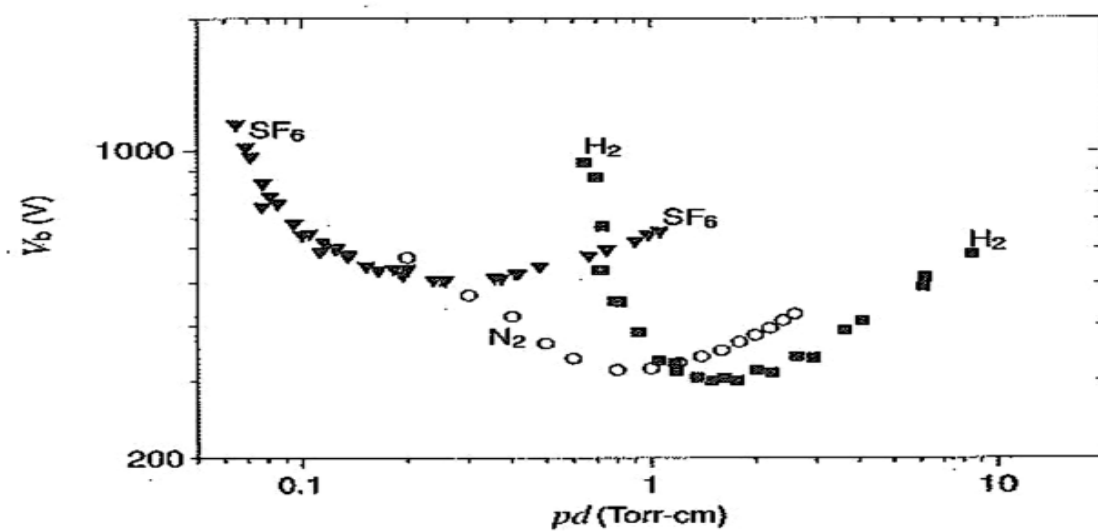
با قرار دادن عبارت $E = V/d$ در معادله ۲۹-۱ معادله ولتاژ شکست V_{br} به صورت زیر می‌باشد:

$$V_{br} = \frac{Bpd}{\ln(pd) + \ln(A/\ln(1 + 1/\gamma))} \quad (30-1)$$

معادله ۳۰-۱ به عنوان قانون پاشن^۲ شناخته می‌شود. pd به عنوان فاصله الکترود کاهش یافته نامیده می‌شود که ولتاژ شکست به آن بستگی دارد. منحنی V_{br} نسبت به pd به عنوان منحنی پاشن شناخته می‌شود. مقدار pd در فرآیند استخراج یون‌ها نقش مهمی دارد. در شکل ۲-۱ منحنی پاشن برای چندین گاز نشان داده شده است [۷].

¹ Electron mobility

² Paschen



شکل ۲-۱ منحنی پاشن در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برای چندین گاز مختلف [۷]

فصل دوم: چشمه یونی پینک

۱-۲ مقدمه

چشمه‌ی یونی باریکه‌ای از یون‌ها یا ذرات باردار را تولید می‌کند. چشمه‌های یونی انواع مختلفی دارد که یکی از مهمترین آنها چشمه یونی پنینگ می‌باشد. از ویژگی‌های این چشمه می‌توان به سادگی در طراحی و عملکرد، ابعاد کوچک و طول عمر زیاد اشاره کرد. هندسه‌ی چشمه یونی پنینگ برای نخستین بار به عنوان چشمه‌ی یونی مثبت توسط لوئیس ماکسول^۱ که در موسسه‌ی فرانکلین^۲ در فیلادلفیا در سال ۱۹۳۰ مشغول به کار بود گزارش شده است. با این حال، هندسه‌ی الکتروود پنینگ نام خود را از فرانس میشل پنینگ^۳، که کار تحقیقاتی خود را در آزمایشگاه فیزیک فلیپس^۴ در آینه‌هون، هلند انجام می‌داد، می‌گیرد. وی در سال ۱۹۳۶ یونیزاسیون پنینگ را توسعه داد و قادر به اندازه‌گیری بسیار دقیق جریان تخلیه در فشارهای پایین گاز شد؛ که امروزه هنوز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹،۱۰]

در ادامه فصل به تفصیل در مورد ساختار، کاربرد و مدل انتخابی برای ساخت چشمه یونی پنینگ بحث خواهیم کرد.

۲-۲ چشمه یونی پنینگ (PIG)

با توجه به سادگی طراحی و بهره‌برداری، اندازه کوچک و مصرف کم انرژی چشمه یونی پنینگ به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند شتابدهنده ذرات، کاشت یون و کندوپاش کاربرد فراوانی دارد که در ادامه فصل به تفصیل در مورد چشمه یونی پنینگ و کاربردهای آن بحث خواهیم کرد [۱۱،۱۲].

^۱ Louis Maxwell

^۲ Franklin Institute

^۳ F. M. Penning

^۴ Philips Physics Laboratory

۲-۳ کاربردهای چشمه یونی پنینگ

۲-۳-۱ شتابدهنده ذرات

شتابدهنده ذرات دستگاه‌هایی هستند که با استفاده از میدان الکتریکی ذرات باردار را به طور الکتریکی تا سرعت‌های بالا به حرکت در آورده و یا باز می‌دارد. این شتابدهنده‌ها از میدان‌های مغناطیسی نیز برای منحرف کردن، کانونی کردن و واگرا کردن ذرات باردار استفاده می‌کنند. طراحی، ساخت و استفاده از سیستم شتابدهنده از سال ۱۹۲۰ تا کنون ادامه داشته و روز به روز توسعه و پیشرفت در زمینه‌ی طراحی، ساخت و استفاده از شتابدهنده‌ها در کاربردهای مختلف افزوده می‌شود به طوریکه امروزه به یکی از فناوری‌های مهم و ارزشمند در دنیا تبدیل شده که دستیابی به آن دارای ارزش و اهمیت بسیار زیادی است. فیزیک و تکنولوژی شتابدهنده‌ها شاخه‌های زیادی از علم و فناوری را در بر می‌گیرد این شاخه‌ها عبارتند از: الکترومغناطیسی، خواص مواد حالت جامد، فیزیک اتمی، ابر رسانایی، مکانیک غیرخطی، دینامیک اسپین، فیزیک پلاسما و کوانتوم فیزیک [۱۳، ۱۴].

شتابدهنده ذرات دارای انواع مختلفی هستند که از چند منظر مختلف می‌توان آنها را تقسیم بندی نمود. به طور کلی شیوه‌های موجود برای شتابدهی ذرات از منظر طراحی مکانیزم اعمال نیرو به ذرات به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: ۱- روش شتاب مستقیم، که در آن میدان شتابدهنده ناشی از اعمال مستقیم اختلاف پتانسیل بالا بین دو سر یک ستون عایق است، ۲- روش القایی، که در آن میدان شتابدهی ناشی از یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان است و ۳- روش شتاب میکروویو (یا فرکانس رادیویی)، که در آن میدان شتابدهنده ناشی از میدان الکترومغناطیسی نوسان کننده است که در یک ساختار کاواک میکروویو قرار گرفته است [۱۳].

۲-۳-۲ کاشت یون^۱

کاشت یون در پلاسما فرآیندی است که برای بهبودی سختی، مقاومت به سایش به صورت کاشت یون‌های پر انرژی در عمق ده‌ها میکرون زیر سطح انجام می‌شود و اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این فرآیند یون‌های پر انرژی در زیر سطح ماده جامد کاشته می‌شوند. در فرآیند کاشت یون، یون‌های پر انرژی را به سمت سطح کاتد شتاب می‌دهند. در نتیجه‌ی این کار ترکیب و ساختار اتمی در نزدیکی سطح نمونه تغییر می‌یابد. فرآیند کاشت یون یک فرآیند کاربردی در ساخت نیمه هادی‌ها است. کاشت یون به صورت عادی و سنتی در محیط کاملاً خلاء انجام می‌گیرد به این صورت که یک باریکه یونی را از چشمه‌ی یونی به سمت هدف متمرکز می‌کنند. برای این کار یک پتانسیل منفی به نمونه اعمال می‌شود که در اثر این پتانسیل ناگهانی الکترون‌ها از نزدیکی نمونه دور می‌شوند و یون‌ها به دلیل وزن سنگینی که نسبت به الکترون‌ها دارند در ابتدا ساکن می‌مانند که نتیجه‌ی آن تشکیل غلاف ماتریسی^۲ با توزیع یکنواخت یون‌ها است. بعد از گذشت مدت زمانی، یون‌ها تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار گرفته و به سمت نمونه شتاب گرفته و کاشته یونی صورت می‌گیرد.

کاشت یون درون یک لایه سطحی نازک اثرات مهمی روی خواص مربوط به سطح مواد می‌گذارد :

۱- لایه گزینی از گونه‌های یونی مناسب موجب بهبودی سختی فلزات می‌شود که تا حد زیادی موجب افزایش عمر آن‌ها ست.

۲- موجب بهبود سختی سرامیک‌ها و بهبود مقاومت به سایش آن‌ها می‌شود [۱۵،۳۸].

^۱ Ion Implantation

^۲ Matrix sheath

۳-۳-۲ کندوپاش^۱

هنگامی که سطح یک جامد با یون‌های پر انرژی بمباران می‌شود، اتم‌های سطح جامد ممکن است به دلیل برخورد بین اتم‌های سطح و ذرات پرانرژی به عقب پراکنده شوند، این پدیده کندوپاش نامیده می‌شود. کندوپاش اولین بار در یک لوله ی تخلیه گاز DC توسط گرو^۲ در ۱۸۵۲ مشاهده شد. او کشف کرد که سطح کاتد لوله ی تخلیه توسط یون‌های پر انرژی در تخلیه ی گاز کندوپاش شده است و مواد کاتد روی دیواره ی داخلی لوله ی تخلیه ته‌نشین شده‌اند. در آن زمان به دلیل اینکه کاتد و توری در لوله ی تخلیه ی گاز تخریب می‌شدند، کندوپاش به عنوان یک پدیده ی نامطلوب در نظر گرفته می‌شد. هرچند امروزه کندوپاش به طور گسترده برای تمیز کردن سطح و حکاکی کردن، لایه نشانی فیلم نازک، آنالیز سطح، استفاده می‌شود [۱۶].

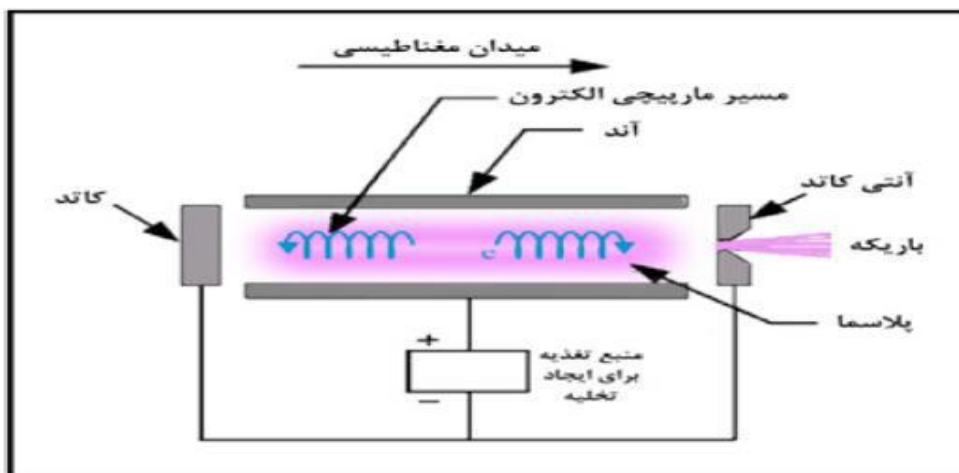
۴-۲ ساختار و عملکرد چشمه یونی پنینگ

تولید یون در چشمه یونی پنینگ با استفاده از تخلیه ی DC می‌باشد. همین باعث شده طراحی چشمه ی یونی بسیار ساده‌تر از سایر چشمه‌هایی باشد که با تخلیه RF و یا میکروویو^۳ کار می‌کنند. چشمه یونی پنینگ نوعی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است چشمه دارای تقارن محوری با مرکز می‌باشد.

^۱ Sputtering

^۲ Grove

^۳ microwave



شکل ۱-۲ نمایی از چشمه یونی پنینگ [۱۷]

چشمه یونی پنینگ از یک کاتد و آنتی کاتد صفحه‌ای و آند استوانه‌ای توخالی تشکیل شده است که بر اساس تخلیه‌ی DC عمل می‌کند. کاتد و آنتی کاتد دارای پتانسیل منفی نسبت به آند می‌باشد و ولتاژ DC بین کاتدها و آند اعمال می‌گردد که بسته به مشخصات هندسه‌ی چشمه‌ی یونی، این ولتاژ بین ۵۰۰- ۵۰۰۰ ولت می‌باشد. ولتاژ اعمال شده بین آند و کاتدها باعث توزیع میدان الکتریکی درون چشمه خواهد شد؛ میدان الکتریکی درون چشمه، الکترون‌های آزاد گاز تزریق شده را شتاب می‌دهد و این الکترون‌ها با استفاده از میدان مغناطیسی اعمال شده در راستای محور تخلیه حرکت چرخشی انجام می‌دهند، الکترون‌ها در اطراف خطوط میدان مغناطیسی با فرکانس و شعاع زیر حرکت چرخشی انجام خواهند داد [۲، ۱۸].

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (۲-۱)$$

$$r_{ce} = \frac{m_e v_{\perp}}{eB} \quad (۲-۲)$$

که در آن m_e جرم الکترون، B میدان مغناطیسی محوری و $v_{\perp}$ مولفه سرعت عمود بر میدان می‌باشد.

این فرکانس اغلب به نام فرکانس سیکلوترونی نامیده می‌شود و شعاع چرخش نیز اغلب به عنوان شعاع لامور شناخته می‌شود. با جایگزین کردن بار و جرم گونه‌های دیگر در تخلیه به جای بار و جرم الکترون در معادلات بالا، معادلات مشابهی برای این گونه‌ها به دست می‌آید. میدان مغناطیسی محوری باعث محصورسازی الکترون‌های یونیزان خواهد شد به طوری که الکترون‌ها حول خطوط میدان مغناطیسی با شعاعی کمتر از شعاع اتاقک تخلیه خواهند چرخید. افزایش طول مسیر ناشی از هندسه‌ی متقارن الکترودها و محصورسازی مغناطیسی باعث خواهد شد تخلیه در فشار پایین‌تر، مشتعل و نگهداری شود. باید توجه شود که این معادلات با دقت قابل قبولی رفتار الکترون را قبل از تشکیل پلازما توصیف می‌کند اما در حضور پلازما میدان الکتریکی و مغناطیسی موضعی خواهند بود و مسیر حرکت ذرات بسیار پیچیده خواهد شد.

الکترون‌های آزاد درون گاز تزریق شده توسط میدان الکتریکی درون چشمه شتاب گرفته و با ذرات خنثی درون گاز برخورد می‌کنند و سبب یونیزاسیون گاز می‌شود. یون‌هایی که طی فرایند یونیزاسیون تولید می‌شوند جرم بیشتری نسبت به الکترون‌ها دارند بنابراین به خوبی محصور نمی‌شوند. این چشمه پلازما با اضافه کردن یک دهانه برای استخراج یون از پلازما تبدیل به چشمه‌ی یونی می‌شود [۱۸].

۵-۲ انواع چشمه یونی پنینگ

چشمه یونی پنینگ را می‌توانیم به دو صورت دسته بندی کرد: ۱- بر اساس نحوه تولید الکترون یونیزان و ۲- جهت استخراج باریکه یونی.

۵-۱-۲ نحوه تولید الکترون یونیزان

چشمه یونی پنینگ بر اساس نحوه تولید الکترون یونیزان به دو دسته کاتد گرم و کاتد سرد تقسیم می‌شود. در چشمه یونی پنینگ کاتد گرم یکی از کاتدها فیلامان بوده و آنتی کاتد، سرد می‌باشد. در این نوع چشمه الکترون‌ها از فیلامان ساطع می‌شود و سپس توسط میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و یونیزاسیون رخ

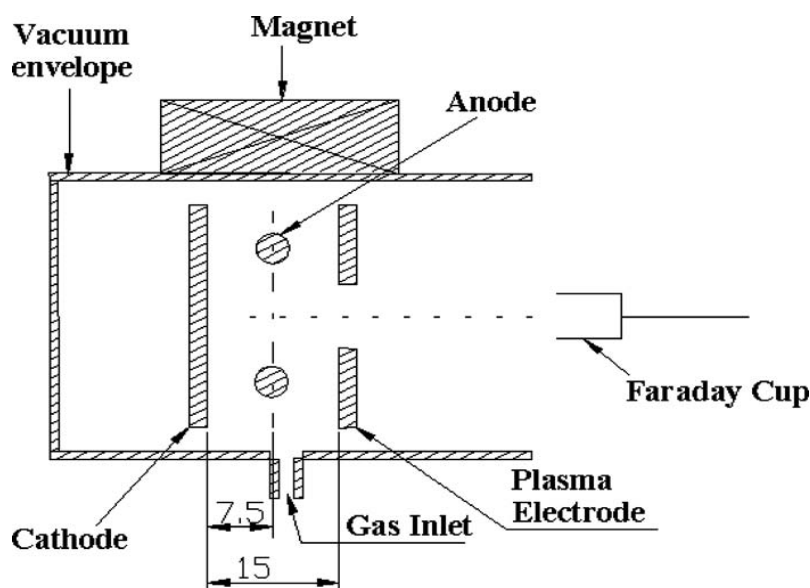
می‌دهد. در چشمه یونی پنینگ کاتد گرم باریکه‌ی یونی چگالی جریان بیشتری نسبت به چشمه‌ی یونی کاتد سرد دارد [۱۸-۱۹].

چشمه یونی پنینگ کاتد سرد همانطور که در بخش قبلی توضیح دادیم الکترون‌های آزاد درون گاز تزریق شده به کمک میدان الکتریکی داخل چشمه‌ی یونی شتاب می‌گیرند و با ذرات خنثی گاز برخورد می‌کنند و سبب یونیزاسیون می‌شود [۱۸].

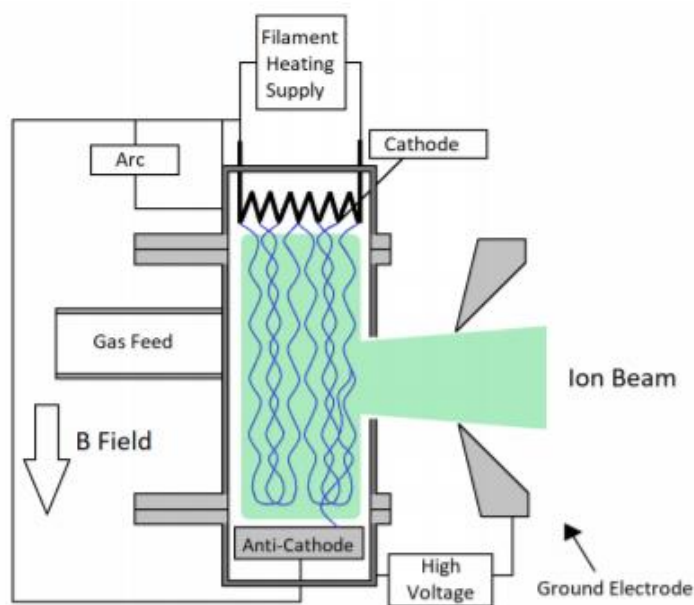
۲-۵-۲ جهت استخراج باریکه یونی

بر اساس جهت استخراج باریکه چشمه یونی پنینگ به دو دسته تقسیم می‌شود: ۱- چشمه یونی پنینگ با استخراج محوری ۲- چشمه یونی پنینگ با استخراج شعاعی.

در چشمه یونی پنینگ استخراج محوری با ایجاد یک روزنه در یکی از کاتدها که آنتی کاتد (یا کاتد پلاسما) نامیده می‌شود، استخراج باریکه در امتداد محور تخلیه انجام می‌گیرد. در چشمه یونی پنینگ استخراج شعاعی با ایجاد یک روزنه در آند استوانه‌ای توخالی استخراج در راستای عمود بر محور تخلیه صورت می‌گیرد [۲۰-۲۱].



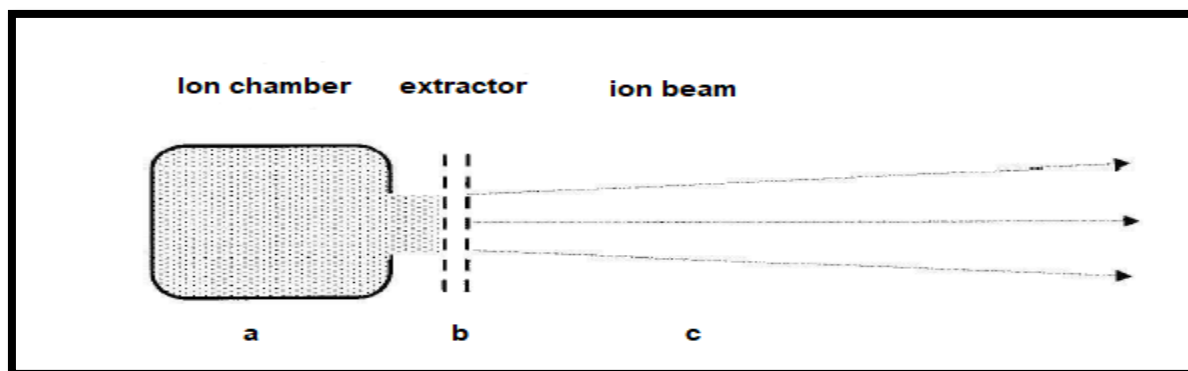
شکل ۲-۲ طراحی نمایی از یک چشمه یونی پنینگ کاتد سرد با استخراج محوری [۲۰]



شکل ۲-۳ طراحی نمایی از یک چشمه یونی پنینگ کاتد گرم با استخراج شعاعی [۲۲]

۲-۶ اجزای اصلی چشمه یونی پنینگ

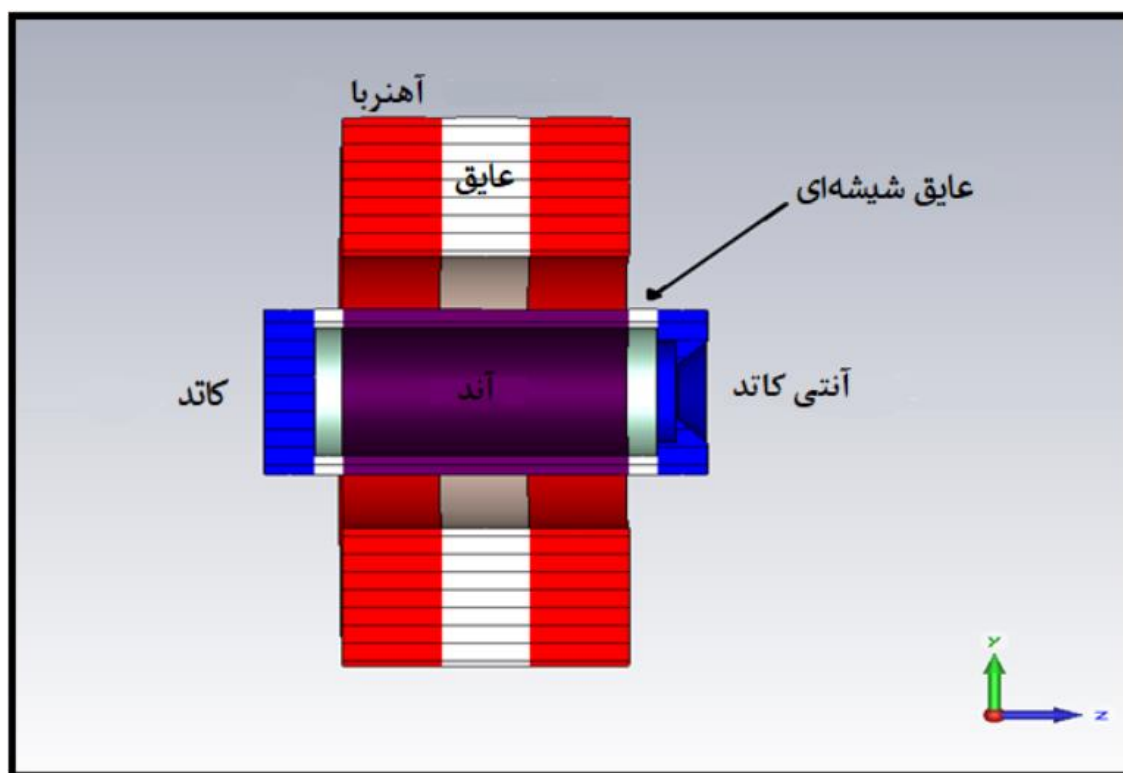
چشمه یونی پنینگ بطور کلی از اتاقک یونش و سیستم استخراج تشکیل شده است. فرآیند تشکیل پلاسما در اتاقک یونش صورت می‌گیرد و ما در ادامه فصل این بخش را به تفصیل بررسی خواهیم کرد.



شکل ۲-۴ اجزای اصلی چشمه یونی (a) اتاقک یونش (b) سیستم استخراج (c) باریکه یون [۷]

۱-۶-۲ اتاقک یونش

شکل ۲-۵ اجزای اصلی اتاقک یونش شامل آند، کاتد، آنتی کاتد (یا کاتد پلاسما)، آهنربا و عایق‌ها را نشان می‌دهد که در ادامه فصل هر یک از بخش‌های تشکیل دهنده اتاقک یونش چشمه یونی توضیح داده شده است.



شکل ۲-۵ نمایی از هندسه‌ی اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ نوعی

۱-۶-۱-۲ آند

در چشمه یونی پنینگ، آند دارای پتانسیل مثبت نسبت به کاتد و آنتی کاتد می‌باشد. از جمله پارامترهای مهم و موثر آند بر روی کارکرد چشمه یونی جنس، شکل و اندازه آند می‌باشد. در انتخاب جنس آند بهتر است که از مواد غیر مغناطیسی استفاده شود تا از تغییر و کم شدن میدان مغناطیسی جلوگیری به عمل آید.

به عنوان مثال استیل ضد زنگ ماده مطلوبی برای جنس آند می باشد. شکل آند چشمه یونی پنینگ می تواند استوانه توخالی، فنجان‌ی شکل و حلقه‌ای باشد که بر اساس تحقیقات انجام شده توسط رووی^۱ در سال ۲۰۰۸ آند استوانه توخالی در ولتاژهای پایین تر دارای جریان استخراج بیشتری نسبت به آند فنجان‌ی شکل و حلقه‌ای می باشد. همچنین آند حلقه‌ای به دلیل دور بودن محل تشکیل پلازما از آنتی کاتد و از بین رفتن بسیاری از یون‌ها، دارای شدت جریان استخراج شده کمتری نسبت به آند استوانه‌ای توخالی می باشد. بر همین اساس در بیشتر چشمه‌های یونی از آند استوانه‌ای توخالی استفاده می کنند. در اصل حجم داخلی آند محل تشکیل پلازما می باشد پس اندازه آند در شکل گیری پلازما از اهمیت زیادی برخوردار است. نتایج سی^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ نشان داد که افزایش طول آند باعث می شود فاصله‌ای را که الکترون‌ها بین دو کاتد حرکت می کنند، افزایش یافته و یونیزاسیون افزایش یابد در نتیجه با افزایش طول آند چگالی جریان^۳ برابر می شود. نسبت بهینه ارتفاع آند به قطر داخلی آند ۱،۲۵ تا ۲ برابر می باشد [۹،۲۳-۲۵].

۲-۱-۶-۲ کاتد

کاتدهای فلزی دارای الکترون آزاد یا به عبارتی دیگر دارای الکترون در مدار هدایت خودشان هستند. الکترون‌های اولیه ساطع شده از سطح کاتد گرم نقش اساسی در چشمه‌های یونی کاتد گرم ایفا می کنند. اگر دما بالاتر از پتانسیل آستانه باشد الکترون‌ها از سطح فلز و سایر سطوح ساطع می شوند. حداکثر چگالی جریان برای دمای ویژه توسط چگالی جریان اشباع j_{eS} ، که موسوم به معادله ریچاردسون می باشد، محاسبه می شود.

$$j_{eS} = AbT^2 \exp(-e\Phi/kT) \text{ A/cm}^2 \quad (۳-۲)$$

^۱ Joshua L. Rovey

^۲ Amy sy

$$A = 4\pi m e k^2 / h^3 = 120.4 \text{ A/cm}^2 K^2 \quad (۴-۲)$$

که در آن Φ تابع کار بر حسب ولت، T دما بر حسب کلوین، k ثابت بولتزمن و b یک فاکتور وابسته به ماده است. در اثر برخورد یون‌ها به سطح کاتد الکترون‌های ثانویه تولید می‌شود. ضریب انتشار الکترون ثانویه δ ، بیانگر نسبت الکترون خارج شده n_{es} به ذرات اولیه در سطح n_p می‌باشد که از معادله ۲-۵ محاسبه می‌گردد [۴-۵].

$$\delta = \frac{n_{es}}{n_p} \quad (۵-۲)$$

ضریب انتشار الکترون ثانویه سطح کاتد به مواد کاتد، کیفیت سطح کاتد و انرژی یون بستگی دارد و نیز ولتاژ اشتعال U_{ign} چشمه‌ی یونی با استفاده از مواد کاتد و کیفیت سطح کاتد تغییر می‌کنند. با پوشاندن سطح کاتد با یک لایه اکسید می‌توان ضریب انتشار ثانویه را افزایش داد. در جدول ۱-۲ مواد با ولتاژ اشتعال کم و بالاتر برای چشمه یونی پنینگ ذکر شده است.

جدول ۱-۲: مواد مورد استفاده برای ولتاژ اشتعال کم و بالاتر [۵]

Material	U_{ign} (V)	Sputtering Loss in H_2 (mg/Ah)
<i>Materials suitable for low U_{ign}</i>		
Al + O_2	350	<29
Mg + O_2	400	
Be + O_2	300	
Fe	400-500	68
U	500-800	<30
Ti	800-1000	<30
<i>Materials suitable for higher U_{ign}</i>		
Ni	3600	65
Zn	3600	340
Al	3500	29
Cu-Zn alloy	2800	
Monel	2800	
Cu	2300	300
C	2300	262
W	2100	57
Mo	1800	56
Ta	1700	16

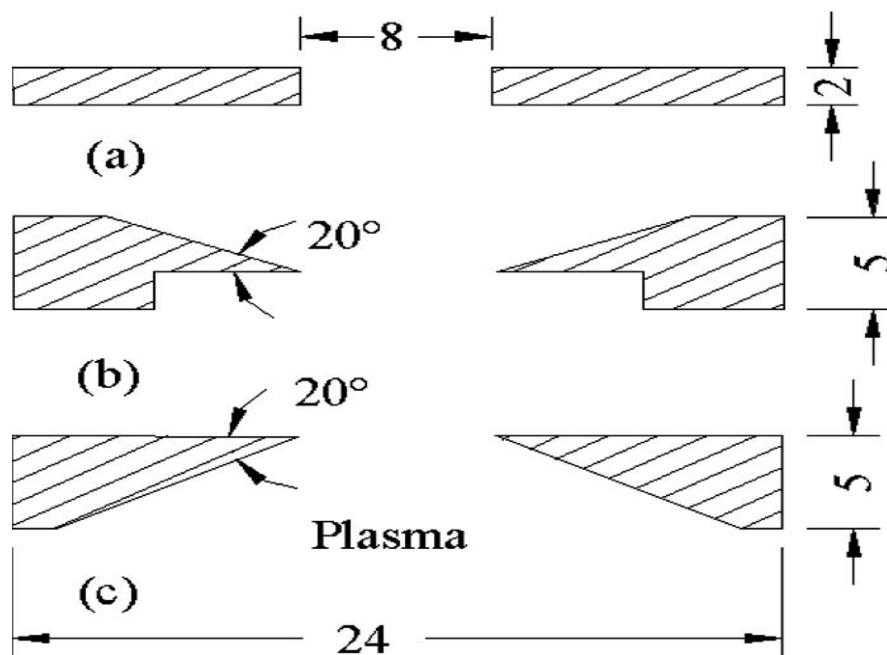
مواد لایه نشانی شده با اکسید به دلیل کندوپاش شدن به تدریج لایه اکسید را از دست می دهد و به ولتاژ اشتعال فلز خالص نزدیک می شوند. دلیل انتخاب مواد کاتد علاوه بر ولتاژ اشتعال، ولتاژ تخلیه (که کم تر از ولتاژ اشتعال است) و تخلیه پایدار است. بهترین ماده اورانیوم است که باعث تخلیه پایدار در ولتاژ پایین آند با کندوپاش پایین می شود. تانتالوم^۱ نیز ماده مناسبی می باشد زیرا به ولتاژ تخلیه نسبتاً پایین احتیاج دارد و میزان کندوپاش بسیار کمی دارد. این ماده را می توان هم در جریان بالا و هم در جریان پایین مورد استفاده قرار داد. از معایب اورانیم و تانتالوم می توان به در دسترس نبودن و قیمت بالای آن ها اشاره کرد. در بیشتر موارد تیتانیوم نیز ماده مناسبی می باشد [۵].

۳-۱-۶-۲ آنتی کاتد

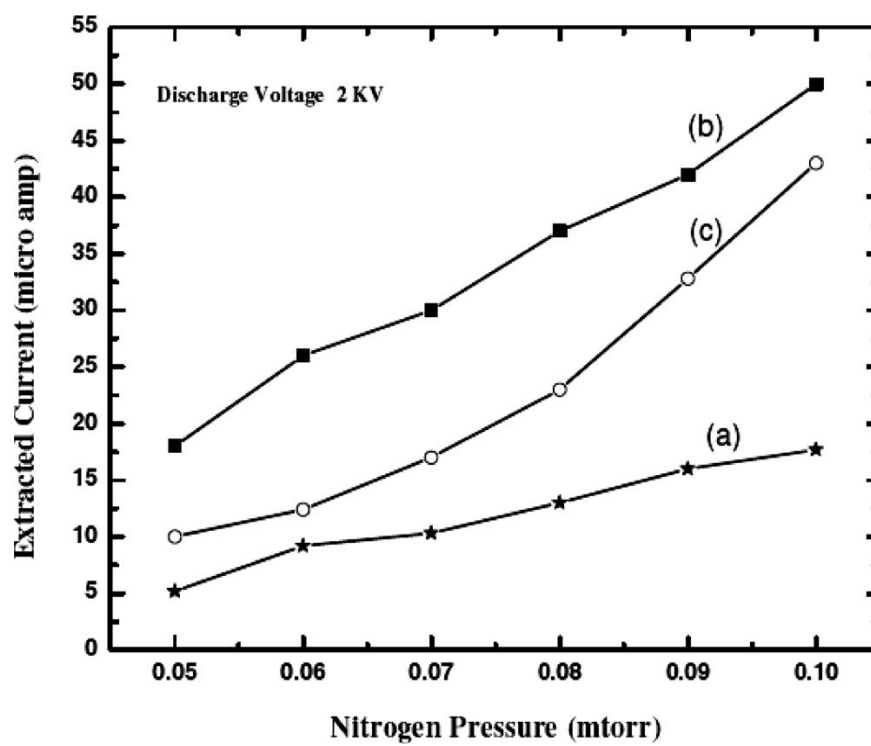
در چشمه یونی پنینگ کاتد سرد با استخراج محوری، آنتی کاتد مانند کاتد می باشد با این تفاوت که در آنتی کاتد یک روزنه برای استخراج یون از پلاسمای تشکیل شده وجود دارد. لازم به ذکر است از آنجاییکه جنس کاتد و آنتی کاتد یکی می باشد، پس در این بخش هندسه ی این المان را در چشمه یونی بررسی می کنیم. هندسه ی آنتی کاتد (یا کاتد پلاسما) نقشه مهمی در استخراج یون ها ایفا می کند. داس^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به طور تجربی سه هندسه ی مختلف را برای آنتی کاتد مورد بررسی قرار دادند که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. بر اساس نمودار داده شده در شکل ۷-۲ بیشترین جریان استخراج شده برای چشمه یونی پنینگ بر حسب فشار گاز نیروژن برای هندسه ی b شکل ۶-۲ بدست آمد است. همچنین در شکل ۸-۲ برای هندسه ی b شکل ۶-۲ سه زاویه ۲۰ درجه، ۳۰ درجه و ۴۰ درجه را مورد بررسی قرار داده اند و به این نتیجه رسیده اند که میزان جریان یون استخراج شده در زاویه ۴۰ درجه نسبت به زاویه ۲۰ درجه ۲۳ درصد افزایش می یابد [۱۱،۲۰].

^۱ Tantalum

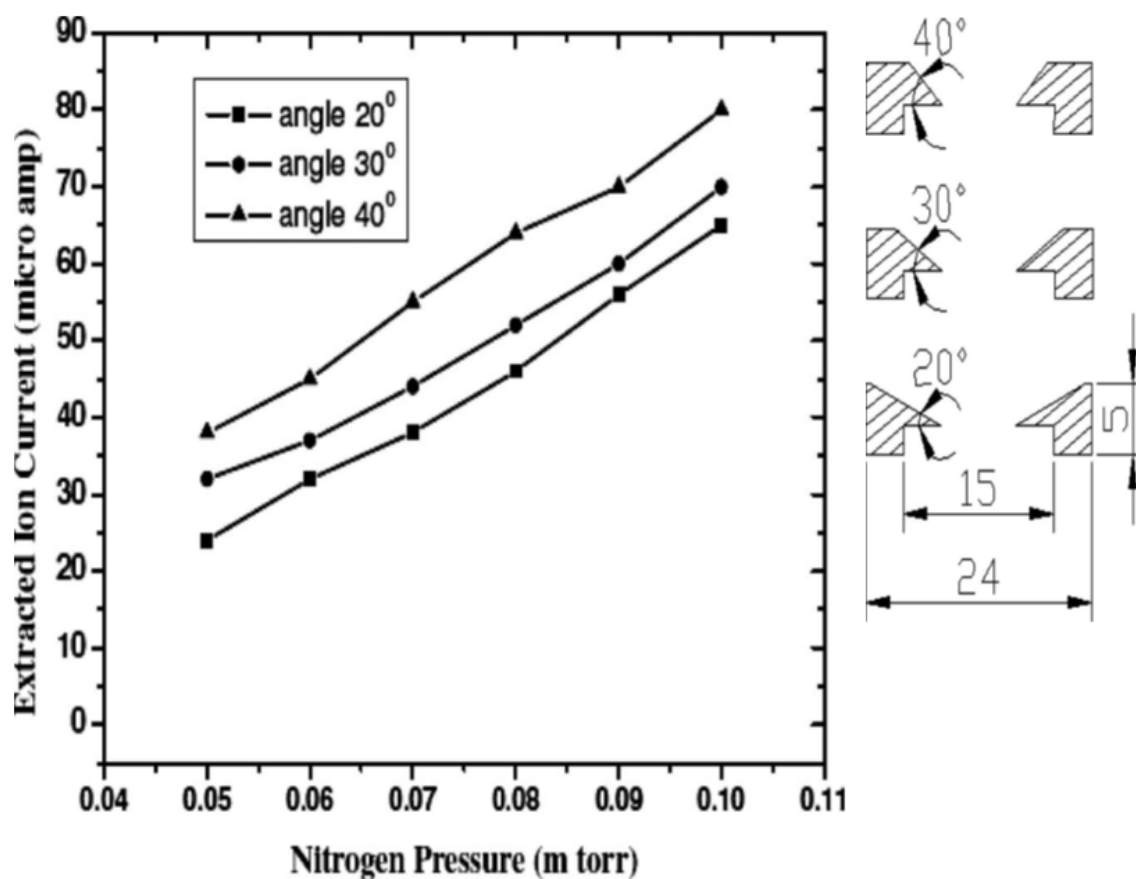
^۲ B. K. Das



شکل ۲-۶: نمایی از هندسه‌های مختلف برای آنتی کاتد [۲۰]



شکل ۲-۷: نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب فشار برای هندسه‌ی مختلف آنتی کاتد در ولتاژ تخلیه ۲ کیلوولت



شکل ۲-۸ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب فشار برای زوایای مختلف آنتی کاتد [۲۰]

۴-۱-۶ آهنربا

همانطور که در فصل یک بخش ۷-۲-۱ توضیح داده شد در یک پلازما که میدان مغناطیسی وجود دارد، حرکت یون ها و الکترون ها به صورت دایره ای با فرکانس لامور در صفحه عمود بر میدان مغناطیسی (یعنی جهت عرضی) صورت می گیرد. به طوری که ذرات به صورت مارپیچی حرکت می کند و تعداد برخوردها افزایش یافته در نتیجه یونیزاسیون افزایش می یابد [۱۰، ۱۲]. آهنرباها به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: آهنرباهای الکتریکی (یا سیم پیچ) که برای ایجاد میدان مغناطیسی به جریان الکتریکی خارجی نیاز دارند

و آهنرباهای دائمی که برای ایجاد میدان مغناطیسی به توان خارجی نیاز ندارند. اغلب در چشمه‌های یونی به دلیل استفاده راحت‌تر و هزینه‌ی کمتر از آهنربای دائمی استفاده می‌کنند. آهنرباهای دائمی براساس نوع به پنج دسته و براساس هندسه به سه دسته تقسیم می‌شوند که در ادامه به تشریح آن‌ها می‌پردازیم:

الف) آهنربای نئودیمیم (NdFeB): آهنرباهای دائمی نئودیمیم اولین بار در سال ۱۹۸۰ میلادی ساخته شدند آنها توسط فرآیند متالورژی پودر از نئودیمیم، اکسید آهن، بور و بعضی افزودنی‌ها تولید می‌شوند. حوزه استفاده از این نوع آهنربا در صنعت بسیار گسترده می‌باشد. از آنجا که این نوع آهنربا به آسانی زنگ می‌زند معمولاً با فلزاتی مثل: مس، روی، نیکل، طلا، قلع و یا روکش اپوکسی پوشش داده می‌شوند. با وجود قدرت بالا، مقاومتشان در برابر حرارت و خوردگی کمتر از آهنرباهای ساماریم کبالت است. ترکیب شیمیایی اصلی آن $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ است.

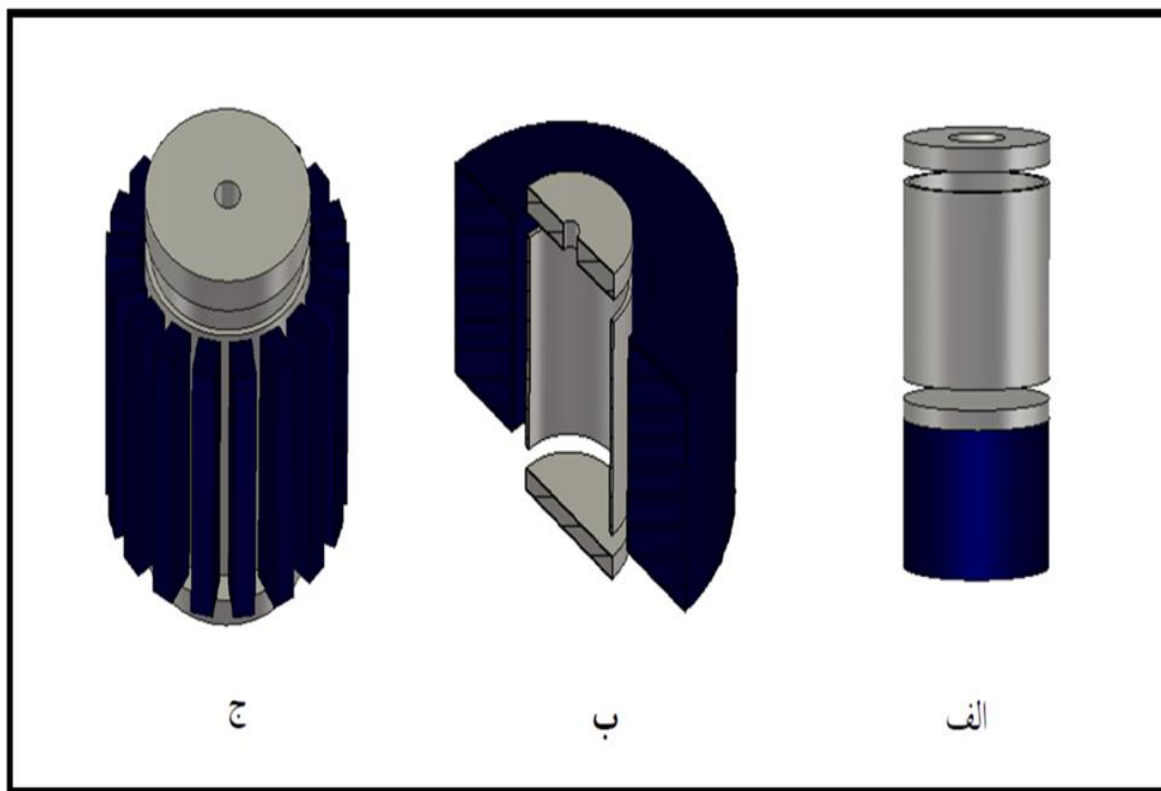
ب) آهنربای فریت (Ferrite): آهنرباهای فریت از مخلوط اکسید آهن، کربنات باریم یا کربنات استرانسیوم و برخی از مواد افزودنی مانند کبالت برای بهبود عملکرد مغناطیسی ساخته شده است. فریت‌ها در مجموع آهنرباهای قوی محسوب نمی‌شوند اما برخی ویژگی‌های خاص آن‌ها از جمله ارزان بودن، فراوان بودن مواد اولیه، سادگی روش تولید، مقاومت شیمیایی بالا، دمای کوری بالا و عایق یا رسانای بسیار ضعیف الکتریسیته باعث شده که کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف داشته باشند.

ج) آهنربای لاستیکی (Rubber): آهنرباهای لاستیکی با مخلوط کردن پودر آهنربای فریت یا نئودیمیم با لاستیک ساخته می‌شود. خاصیت مغناطیسی آهنرباهای لاستیکی که از لاستیک طبیعی ساخته شده است از آهنرباهای لاستیکی که با لاستیک ایزومر ساخته شده‌اند، ضعیف‌تر است. از ویژگی‌های این آهنربا می‌توان به انعطاف پذیری بالا، قیمت مناسب و تولید در اشکال مختلف اشاره کرد.

د) آهنربای آلنیکو (Alnico) : آهنربای آلنیکو عمدتاً از آلومینیوم، نیکل، کبالت تشکیل شده البته در ترکیب آن‌ها گاهی عنصرهای دیگری مانند مس یا تیتانیوم نیز به کار می‌رود. یکی از مزایای مهم این آهنرباها دمای کوری بالای آن‌ها است. آهنرباهای آلنیکو از نظر شیمیایی و فیزیکی بسیار مقاوم هستند توان آهنربایی آلنیکوها از فریت‌ها بیشتر و از آهنرباهای ساماریوم کبالت و نئودیمیم کمتر است. با این حال قیمت آن‌ها نسبتاً ارزان است و در ساخت و موتورها و ژنراتورهایی که در دماهای بالا کار می‌کنند، از آن‌ها استفاده می‌شود.

ه) آهنربای ساماریوم کبالت: عنصر اصلی تشکیل دهنده این آهنربا، ساماریوم است. دارای خواص مغناطیسی بالا، پایداری حرارتی فوق العاده (دماهای بالا تا حداکثر ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) ، مقاوم در برابر خوردگی و زنگ زدگی می‌باشد. هزینه‌ی تولید این آهنربا قابل ملاحظه است و همچنین دارای شدت مغناطیسی بالای می‌باشد به همین دلیل این آهنربا را در ابعاد کوچک می‌سازند. از آهنرباهای ساماریوم کبالت در جاهایی استفاده می‌شود که نیاز به پایداری مغناطیسی با تغییر دما وجود دارد. از معایب این آهنربا این است که ترد و شکننده است و در صورت ضربه خوردن یا افتادن می‌شکنند.

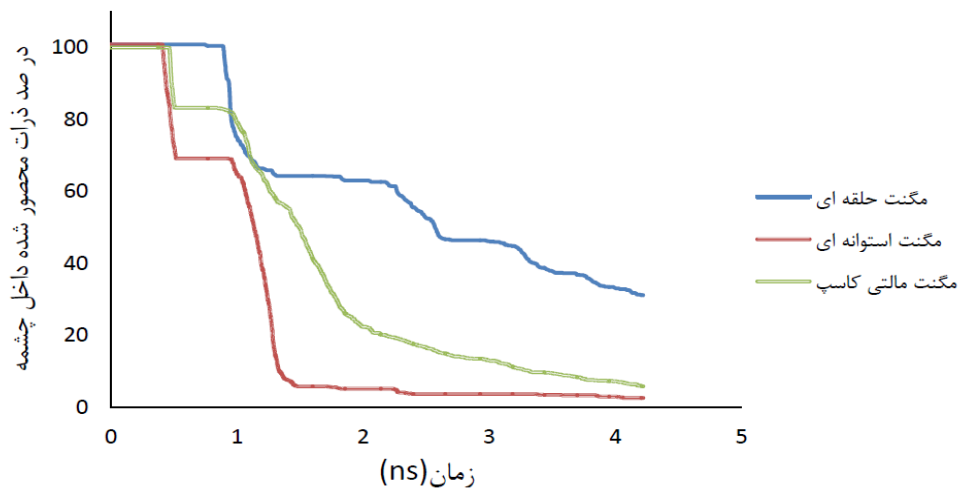
همانطور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است در چشمه یونی پنینگ آهنربای دائمی بر اساس هندسه به سه دسته تقسیم می‌شود: الف) آهنربای دائمی استوانه‌ای شکل که در پشت کاتد قرار می‌گیرد. ب) آهنربای حلقه‌ای که در اطراف آند قرار داد و می‌تواند از یک یا دو حلقه تشکیل شده باشد. ج) آهنربای مالتی کاسپ که چندین بلوک مستطیل شکل اطراف آند قرار می‌گیرند.



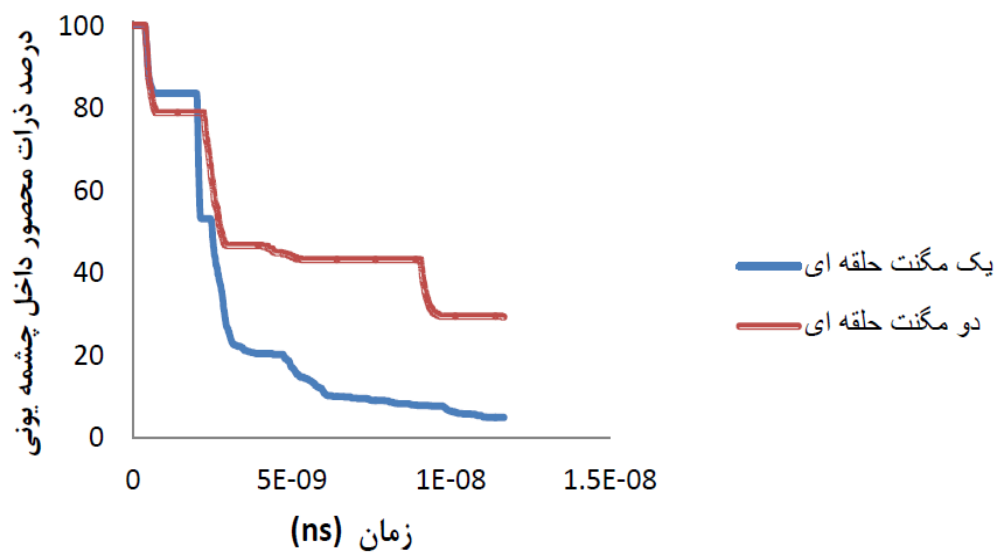
شکل ۹-۲ الف) چشمه یونی با آهنربای استوانه‌ای ب) چشمه یونی با آهنربای حلقه‌ای ج) چشمه یونی با آهنربای مالتی کاسپ [۱۸]

در سال ۲۰۱۷ فتحی^۱ و همکارانش درصد ذرات محصور شده در داخل چشمه یونی پنینگ نسبت به زمان با سه آهنربای دائمی استوانه‌ای، حلقه‌ای و مالتی کاسپ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آهنربای حلقه‌ای درصد ذرات محصور شده بیشتری نسبت به دو مدل دیگر دارد و همچنین آهنربای دوحلقه‌ای درصد ذرات محصور شده در داخل چشمه یونی پنینگ بیشتری نسبت به آهنربای تک حلقه‌ای دارد [۱۲، ۱۸].

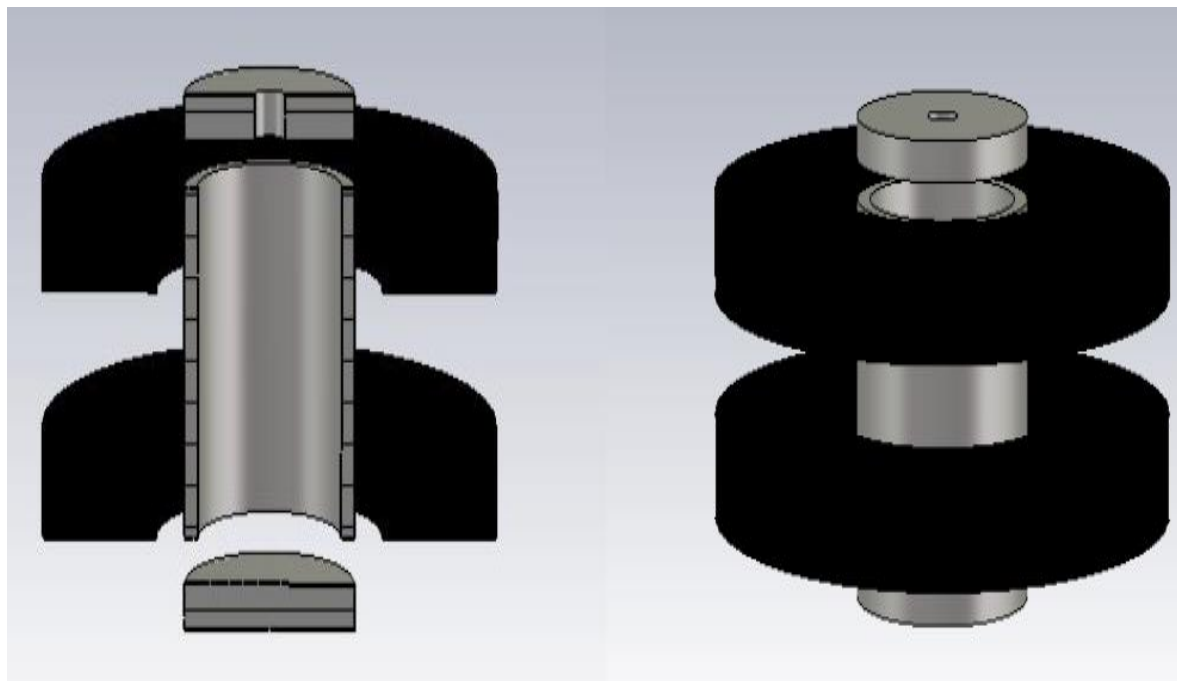
¹ A. Fathi



شکل ۲-۱۰ تعداد ذرات بر حسب نانوثانیه برای سه هندسه‌ی مختلف آهنربا [۱۸]



شکل ۲-۱۱ تعداد ذرات موجود در چشمه یونی بر حسب نانوثانیه برای دو هندسه‌ی تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای [۱۸]



شکل ۲-۱۲ چشمه یونی با آهنربای دائمی در اطراف آند [۱۸]

۲-۶-۲ سیستم استخراج

ذرات پلاسمای تولید شده در چشمه یونی پنینگ دارای حرکت کاتوره ای درون منبع می باشند، لذا برای استخراج یون ها از چشمه و هدایت آنها به سمت هدف، از میدان های الکتروستاتیکی استفاده می کنیم. یکی از مهمترین قسمت های چشمه یونی سیستم استخراج یون می باشد که به شدت بر خواص باریکه ی استخراجی اثر می گذارد. این قسمت از چشمه یونی معمولاً با اتکا به شبیه سازی ها و آزمایش های تجربی بهینه می شود. سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ از یک الکتروود صفحه ای شامل روزنه ی خروج و حداقل یک الکتروود دیگر تشکیل شده است. اختلاف پتانسیل بین الکتروودها، میدان الکتریکی لازم برای شتاب گرفتن و استخراج ذرات باردار از چشمه یونی را فراهم می کند. سیستم استخراج می تواند شامل الکتروودهای

بیشتری نیز باشد. برحسب کاربرد باریکه و متناسب با طراحی های متفاوت الکترودهای استخراج می تواند بعد از اتاقک یونش وظیفه استخراج و متمرکز کردن باریکه را برعهده داشته باشد [۱،۱۲،۱۳،۳۹].

در سال ۱۳۹۶ مسلمی پورکانی^۱ در دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از برنامه‌ی شبیه‌سازی CST تاثیر عوامل مختلف روی باریکه یون خروجی از چشمه یونی پنینگ را مورد بررسی قرار داده است و همچنین با بررسی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ اعلام کردند که در بحث اپتیک باریکه و لنز الکترواستاتیکی برای کانونی کردن باریکه سیستم تریودی نسبت به سیستم دیودی بهینه تر و مفید تر می‌باشد [۴۲].

ساختار و عملکرد دقیق سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ توسط خانم فتحی در پایان نامه ایشان تحت عنوان طراحی و ساخت سیستم استخراج باریکه یونی یک چشمه یونی پنینگ به صورت کامل بررسی شده است.

۷-۲ مدل انتخابی برای ساخت چشمه یونی پنینگ

در این پایان نامه با توجه به خصوصیات ذکر شده برای انواع چشمه یونی پنینگ و امکانات موجود، چشمه‌ی یونی کاتد سرد با استخراج محوری برای طراحی و ساخت انتخاب شده است.

¹ M. Moslemi Poorkani

فصل سوم: شبیه سازی چشمه یونی پستیک

۳-۱ مقدمه

با طراحی و شبیه سازی چشمه های یونی در نرم افزارهایی که بدین منظور ایجاد شده است می توان قبل از ساخت و انجام آزمایش های فیزیکی راه را برای ساخت چشمه ای با کارایی بالاتر هموار کرد.

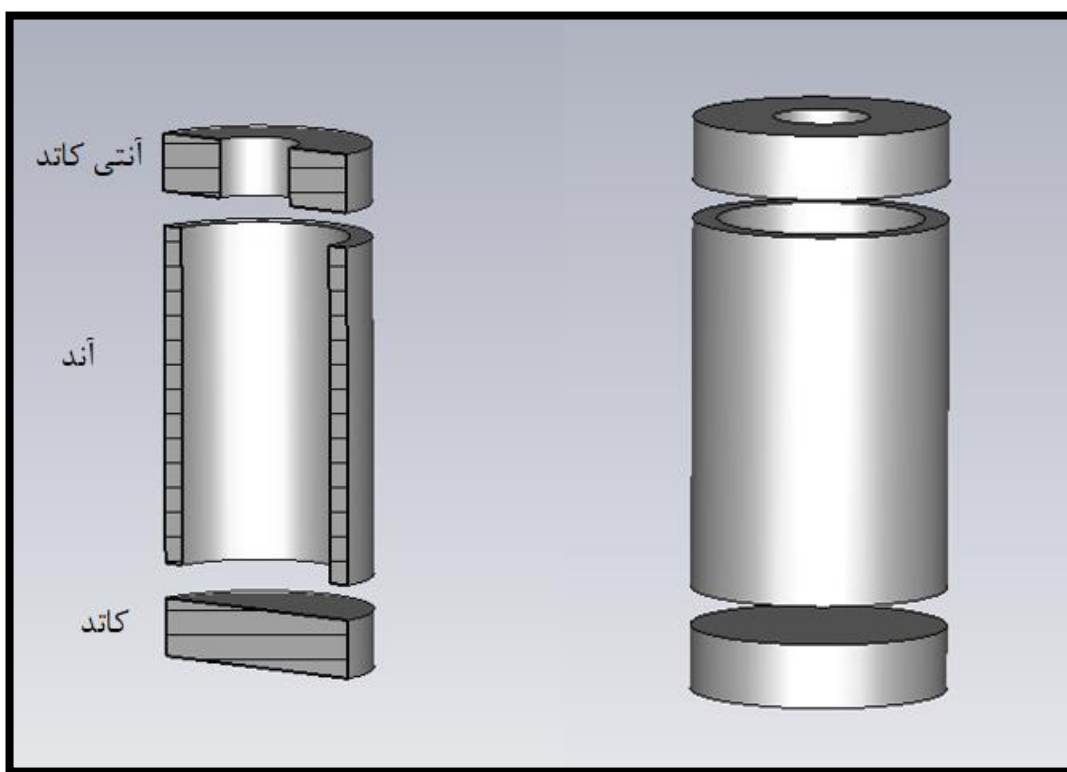
در این فصل چشمه یونی پنینگ با استفاده از برنامه شبیه سازی CST STUDIO SUITE شبیه سازی شده است [۲۶]. در ادامه فصل ضمن معرفی این نرم افزار، قسمت های مختلف چشمه یونی پنینگ که شبیه سازی شده است به تفصیل بررسی خواهد شد.

۳-۲ معرفی برنامه شبیه سازی CST STUDIO SUITE

CST بر گرفته از Computer Simulation Technology ، یک نرم افزار قدرتمند در زمینه شبیه سازی برای حل انواع مسائل الکترومغناطیس و کاربردهای مرتبط است که برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ اولین نسخه این برنامه معرفی شد. این برنامه، محیطی کاربرپسند، برای مدیریت و کنترل چند پروژه به صورت همزمان دارد، که هر یک ممکن است دارای ماژول های مختلفی باشد. به این ترتیب طیف وسیعی از مسائل الکترومغناطیس از نور و میکروویو تا فرکانس های پایین، بردهای مدار چاپی، EMC و حتی مسائل الکترواستاتیک و حرارتی را پوشش می دهد. مجموعه نرم افزاری CST از ۷ ماژول تشکیل شده است که تقریباً تمام مسایل الکترومغناطیس را پوشش می دهند که بر اساس نیاز کاربر، ماژول مدنظر انتخاب می شود. بر همین اساس در این بخش ماژول CST PARTICLE STUDIO را که اختصاصاً برای شبیه سازی سه بعدی میدان های الکترومغناطیس مرتبط با ذرات باردار استفاده می شود، انتخاب کرده ایم [۲۷، ۲۸]

۳-۳ شبیه سازی چشمه یونی پنینگ

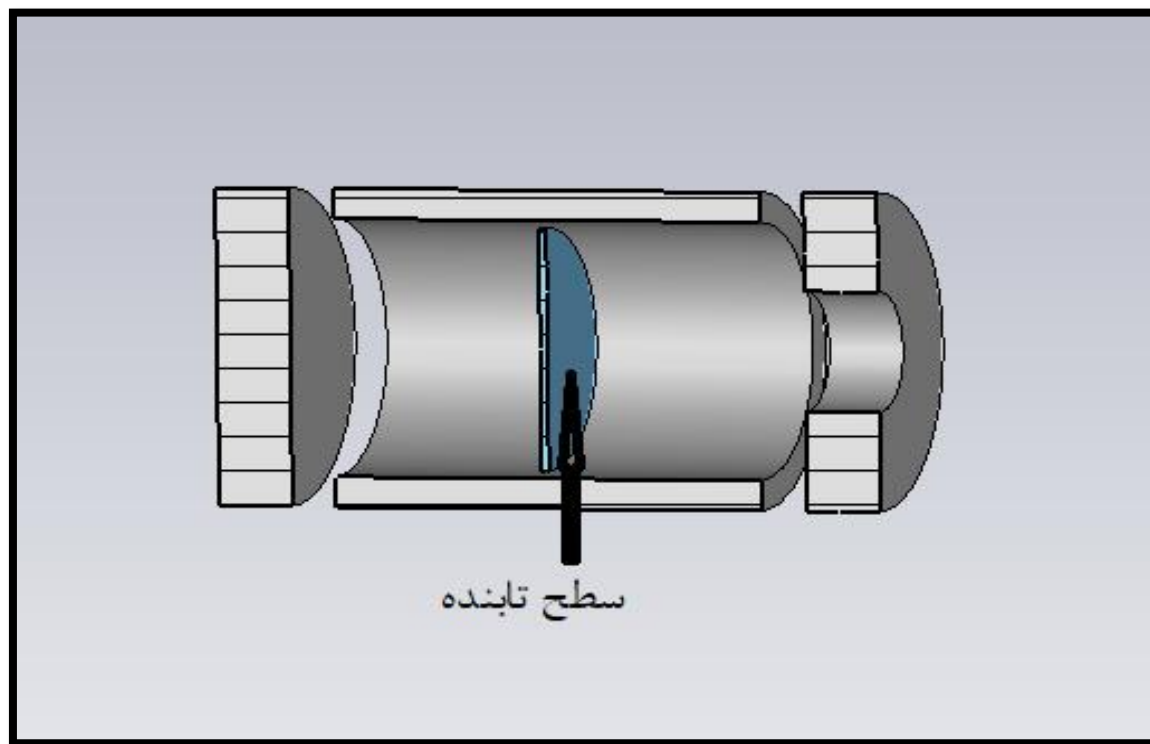
همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ به طور کلی از آند، کاتد، آنتی کاتد، آهنربا و عایق‌ها تشکیل شده است. در این فصل هدف شبیه سازی اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ در بهینه‌ترین حالت ممکن بر اساس محدودیت‌های ابعاد آهنربای موجود در بازار می‌باشد. همانطور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌کنید برای شروع شبیه سازی به یک چشمه‌ی یونی نیاز داریم که دارای دو کاتد مسطح و آند استوانه‌ای توخالی می‌باشد.



شکل ۳-۱ چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده در برنامه CST

لازم به ذکر است در نرم افزار CST امکان شبیه سازی پلاسما وجود ندارد بر همین اساس در گام اول یک سطح تابنده استوانه‌ای با شعاع ۸ mm ، ارتفاع ۰/۵ mm و انرژی ۹۰ الکترون ولت در نظر گرفته‌ایم.

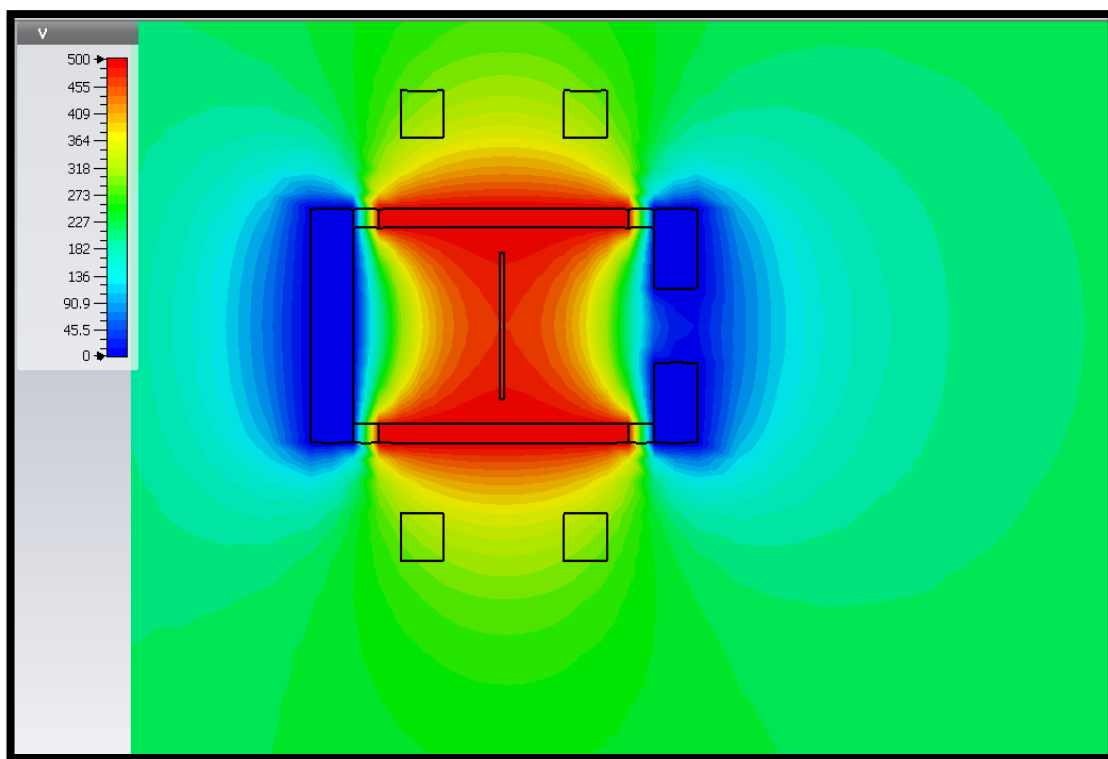
شکل ۲-۳ برش مقطعی از چشمه‌ی یونی شبیه سازی شده می‌باشد که محل قرار گیری سطح تابنده مشخص شده است.



شکل ۲-۳ سطح تابنده ذرات باردار که به عنوان پلاسمای درون چشمه یونی شبیه سازی شده است

برای شکل گیری میدان الکتریکی جهت هدایت ذرات باردار به سمت آنتی کاتد و خروج از دیافراگم یا روزنه‌ی استخراج، پتانسیل بین آند و کاتدها اعمال می‌کنیم همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد این

ولتاژ بسته به مشخصات هندسه‌ی چشمه‌ی یونی بین ۵۰۰ - ۵۰۰۰ ولت می‌باشد که پتانسیل آند ۵۰۰ ولت، کاتد و آنتی کاتد صفر (به زمین متصل شده) انتخاب شده است. شکل ۳-۳ خطوط هم پتانسیل چشمه یونی پنینگ را نشان می‌دهد.



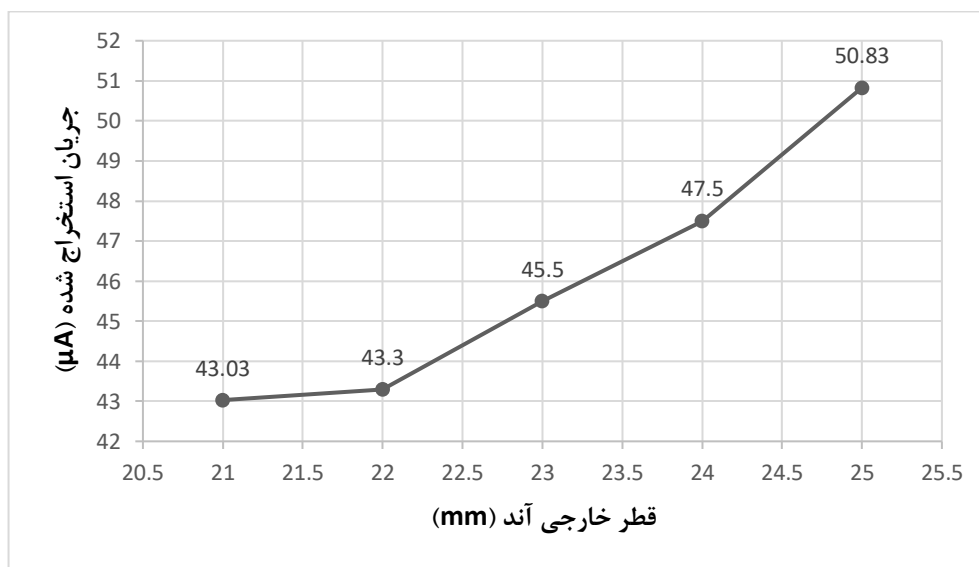
شکل ۳-۳ خطوط هم پتانسیل چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده در برنامه CST

۳-۳-۱ شبیه سازی آند

آند حجمی است که در آن پلاسما تشکیل می‌شود به همین خاطر از اهمیت فراوانی برخوردار است. در ابتدا قطر خارجی آند استوانه‌ای توخالی مورد بررسی قرار گرفته است. که به صورت پیش فرض ارتفاع آند mm

۲۷، ضخامت دیواره آند و کاتدها به ترتیب ۲ mm و ۵ mm و قطر روزنه استخراج ۸ mm در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنید با افزایش قطر خارجی آند میزان جریان استخراج شده در فاصله ۱۵۰ mm از آنتی کاتد نیز افزایش می‌یابد همچنین به علت محدودیت در ابعاد آهنربای موجود در بازار، قطر خارجی آند را نمی‌توانیم از ۲۵ mm بیشتر در نظر بگیریم در نتیجه قطر خارجی آند را ۲۵ mm انتخاب می‌کنیم.

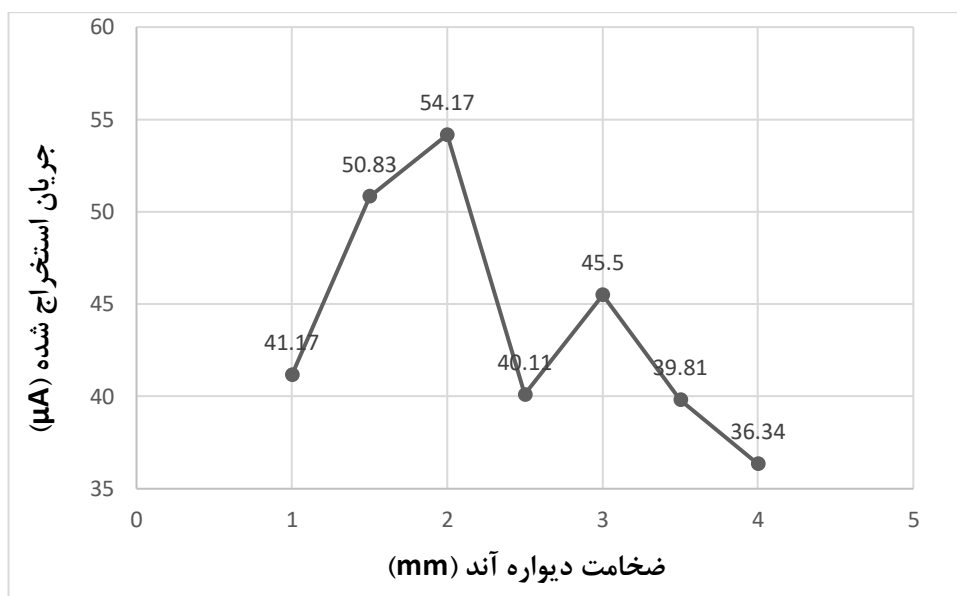
پس از بررسی و انتخاب قطر خارجی آند، برای بدست آمدن قطر داخلی آند ضخامت دیواره آند را مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۴ نمودار جریان استخراج شده بر حسب به قطر خارجی آند چشمه یونی پنینگ

شکل ۳-۵ نمودار شدت جریان استخراج شده بر حسب به ضخامت‌های مختلف دیواره آند را در فاصله‌ی ۱۵۰ mm از آنتی کاتد نشان می‌دهد که ضخامت ۲ mm دیواره آند بیشترین میزان جریان استخراج شده را

به ما می‌دهد. البته لازم به ذکر است ضخامت دیواره آند کمتر از ۲ mm از لحاظ ساخت چشمه و تراشکاری کاری دشوار و پر هزینه می‌باشد همچنین در ضخامت بیشتر از ۲ mm احتمال برخورد ذرات به دیواره آند افزایش می‌یابد در نتیجه جریان استخراج شده کاهش می‌یابد پس ضخامت دیواره آند را ۲ mm در نظر خواهیم گرفت [۳۳، ۱۸]



شکل ۳-۵ نمودار جریان استخراج شده بر حسب به ضخامت دیواره آند

نتایج تجربی نشان می‌دهد که نسبت بهینه ارتفاع آند به قطر داخلی آند ۱،۲۵ تا ۲ برابر می‌باشد [۴۱]. بر همین اساس ارتفاع آند را ۲۷ mm در نظر می‌گیریم.

۲-۳-۳ طراحی و شبیه سازی کاتد

در اجسام رسانا بار الکتریکی همواره در سطح خارجی توزیع می‌شود؛ اگر جسمی همگن باشد بار به طور یکنواخت در آن رسانا توزیع می‌شود و اگر جسم ناهمگن باشد توزیع بار در قسمت نوک تیز دارای تراکم

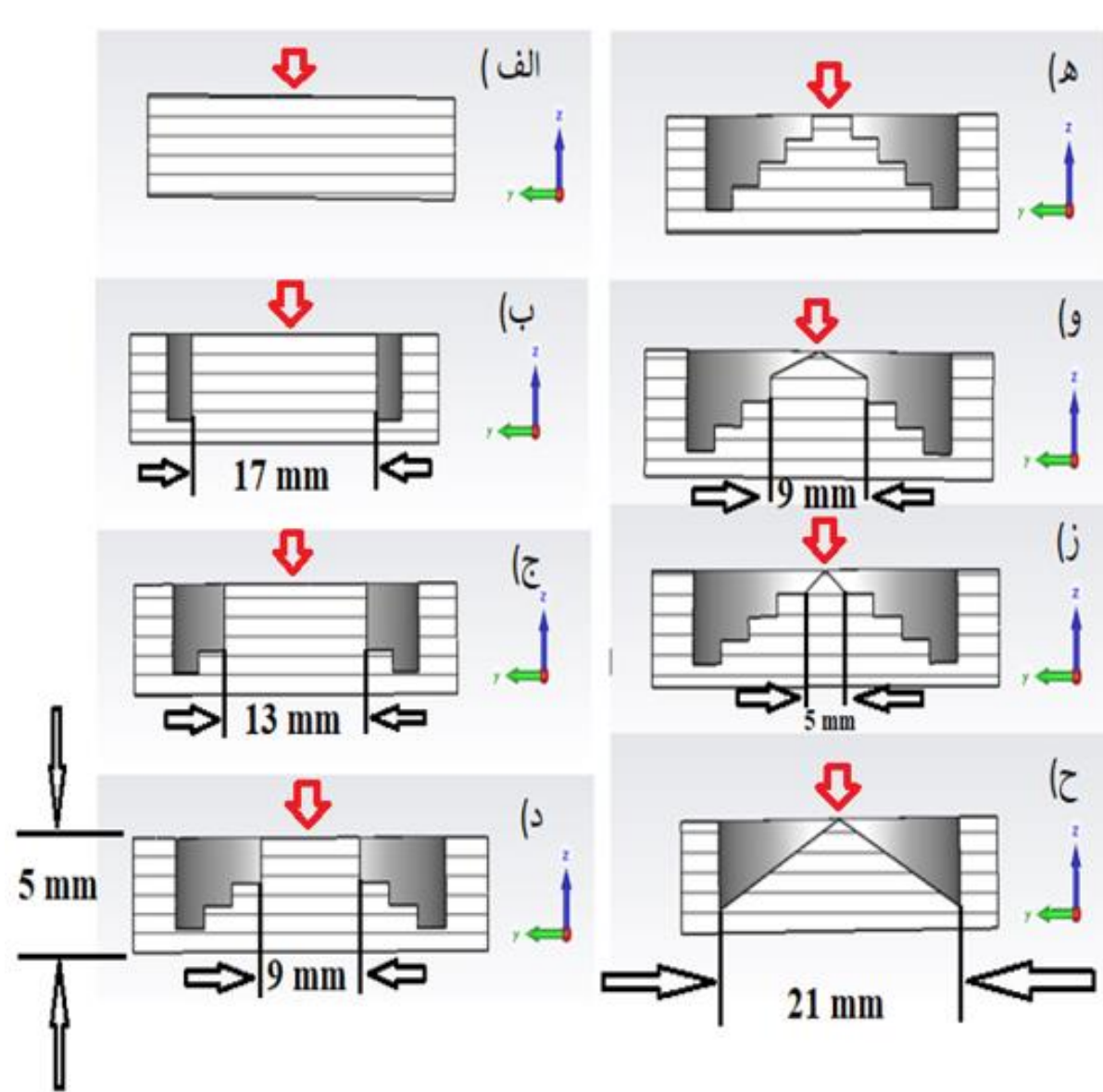
بیشتری خواهد بود. بر همین اساس تغییراتی در شکل کاتد چشمه یونی پنینگ ایجاد کرده ایم. مشخصات کاتدهای طراحی شده در جدول ۱-۳ آورده شده است. این تغییرات، که شامل فرورفتگی‌هایی و ایجاد مخروط‌هایی بر روی سطح کاتد می‌باشند، در شکل ۳-۶ نشان داده شده است. خطوط هم‌پتانسیل مدل‌های مختلف کاتدهای طراحی شده در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات تغییرات ایجاد شده در هندسه‌ی کاتدها

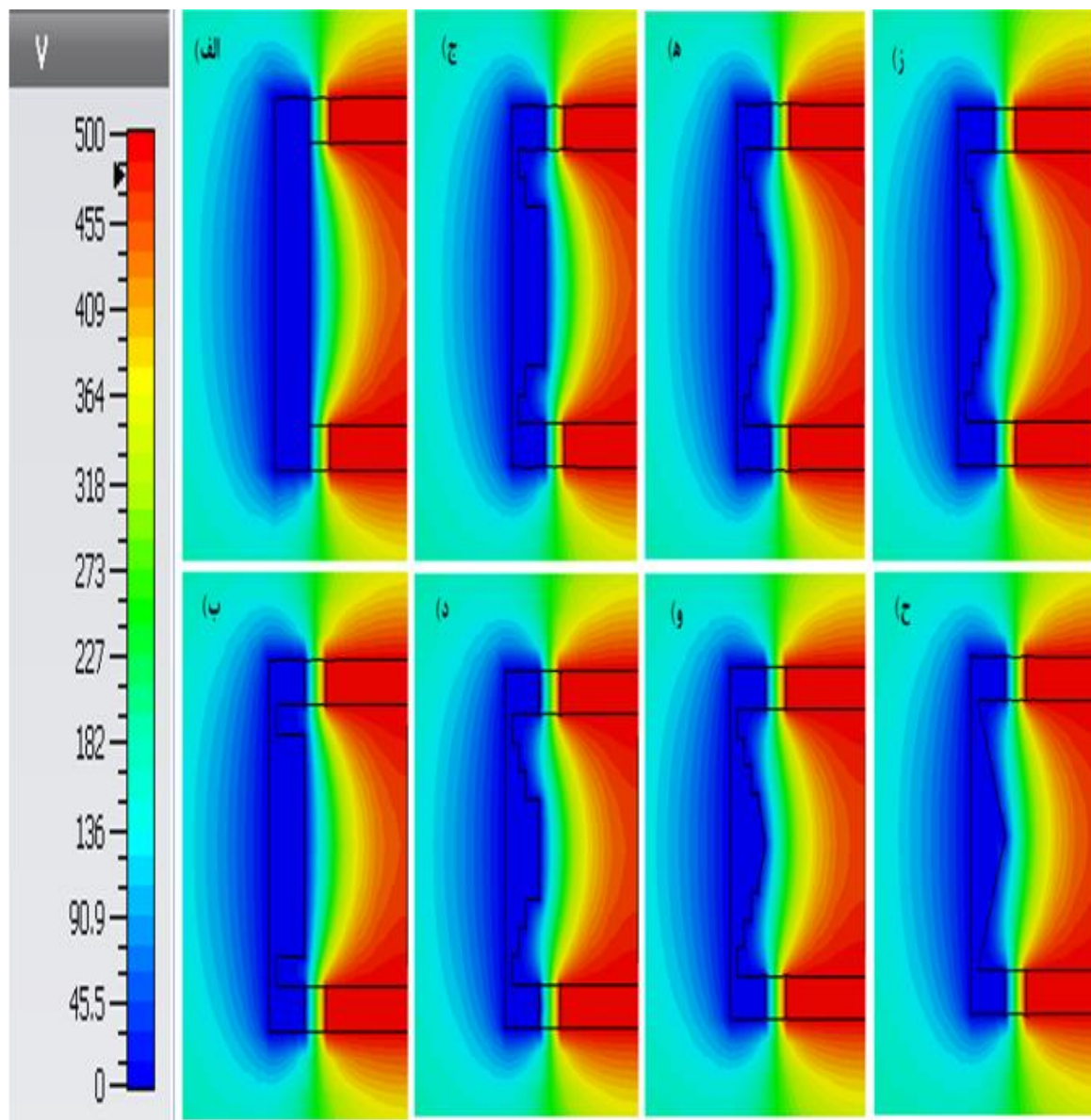
مدل کاتد	ارتفاع پله (mm)	قطر پله (mm)	قطر قاعد مخروط (mm)	ارتفاع مخروط (mm)
صفحه‌ای ساده	-	-	-	-
یک پله‌ای	۴	۱۷	-	-
دو پله‌ای	۳	۱۳	-	-
سه پله‌ای	۲	۹	-	-
چهار پله‌ای	۵	۱	-	-
دو پله‌ای مخروطی	-	-	۹	۱
سه پله‌ای مخروطی	-	-	۵	۱
مخروطی	-	-	۲۱	۴

حداقل ولتاژ اشتعال چشمه یونی پنینگ حدود $V 500$ می‌باشد [۱۲]. هدف ما روشن کردن چشمه در ولتاژ کمتر از $V 500$ است و چون در برنامه‌ی شبیه سازی CST امکان شبیه سازی پلازما وجود ندارد بر همین اساس میدان الکتریکی را در سطح کاتدهای طراحی شده (سطح‌هایی که با فلش قرمز در شکل ۳-۶ نشان داده شده است) اندازه‌گیری کردیم، بر اساس نمودار شکل ۳-۸ میدان الکتریکی مدل کاتد سه پله‌ای

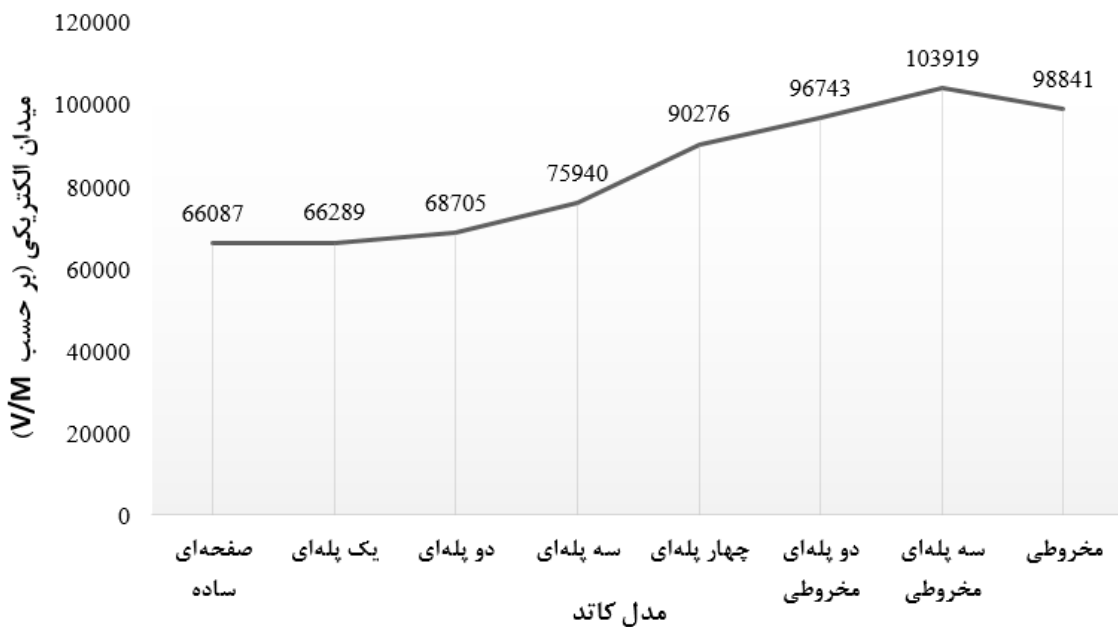
مخروطی نسبت به مدل کاتد صفحه‌ای ساده 37832 V/m افزایش یافته. در نمونه‌ی شبیه‌سازی شده ولتاژ آند چشمه یونی پنینگ با کاتد سه پله‌ای مخروطی را 185 ولت کاهش داده و با کاهش ولتاژ، اندازه میدان الکتریکی این مدل را به اندازه میدان الکتریکی مدل کاتد صفحه‌ای ساده رسانده‌ایم.



شکل ۳-۶ مدل کاتدهای شبیه‌سازی شده در برنامه شبیه‌سازی CST (الف) کاتد صفحه‌ای ساده (ب) کاتد یک پله‌ای (ج) کاتد دو پله‌ای (د) کاتد سه پله‌ای (ه) کاتد چهار پله‌ای (و) کاتد دو پله‌ای مخروطی (ز) کاتد سه پله‌ای و مخروطی (ح) کاتد مخروطی ساده



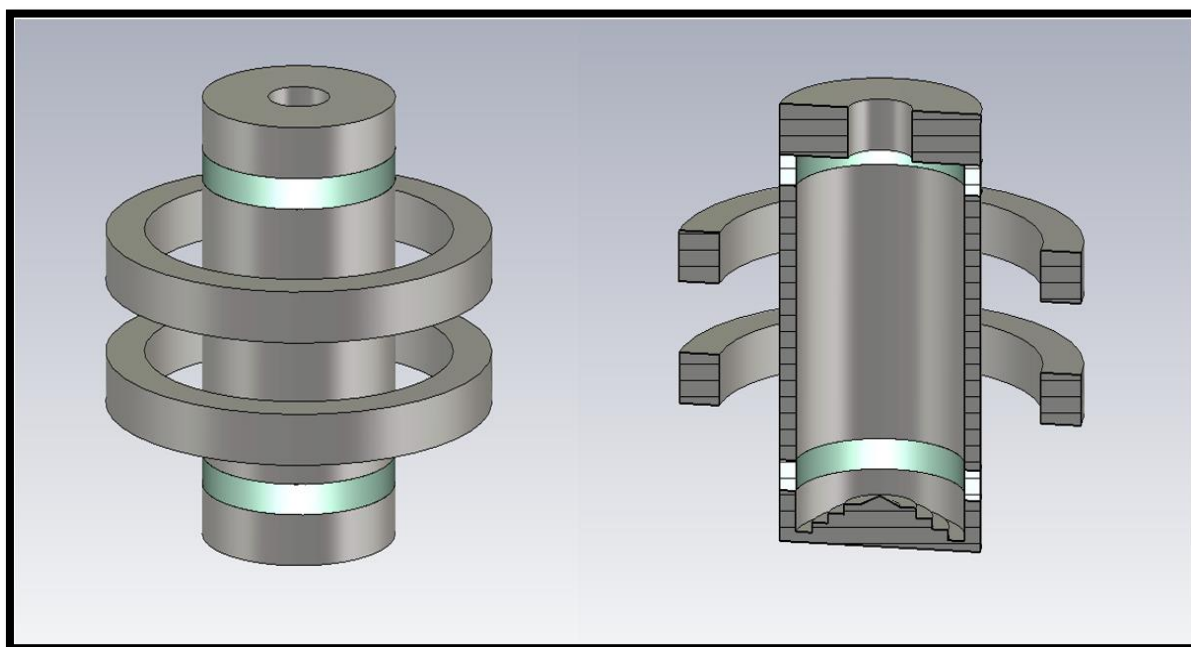
شکل ۳-۷ خطوط هم پتانسیل مدل کاتدهای شبیه سازی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) کاتد صفحه‌ای ساده (ب) کاتد یک پله‌ای (ج) کاتد دو پله‌ای (د) کاتد سه پله‌ای (ه) کاتد چهار پله‌ای (و) کاتد دو پله‌ای مخروطی (ز) کاتد سه پله‌ای و مخروطی (ح) کاتد مخروطی ساده



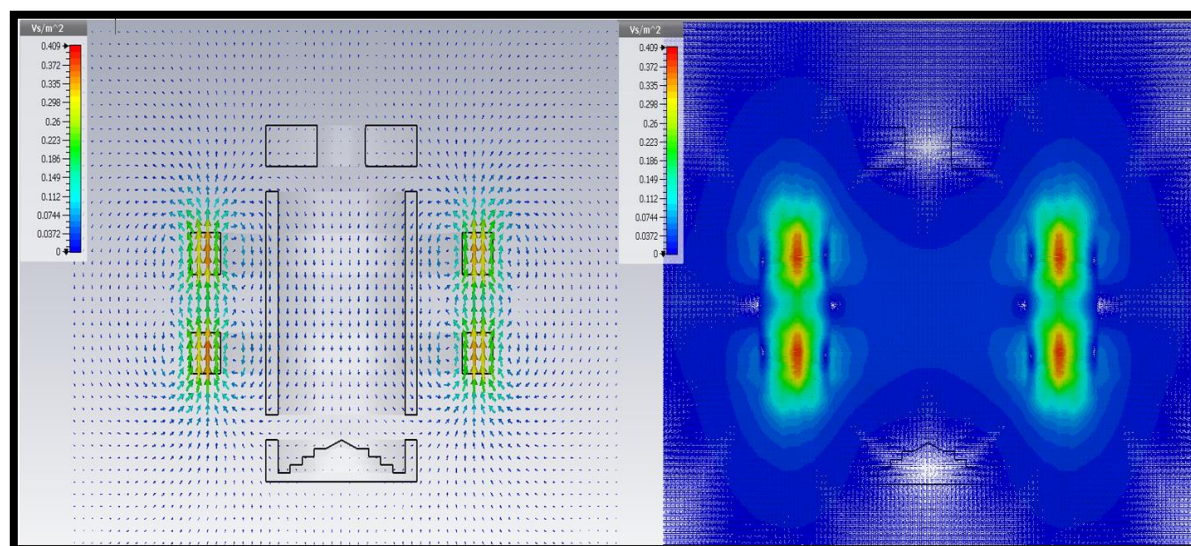
شکل ۳-۸ نمودار میدان الکتریکی بر حسب به مدل کاتدهای طراحی شده

۳-۳-۳ شبیه سازی آهنربا

میدان مغناطیسی باعث می‌شود که یون‌ها و الکترون‌ها در صفحه عمود بر میدان مغناطیسی (یعنی جهت عرضی) به صورت مارپیچی حرکت می‌کند و ذرات را مدت زمان بیشتری درون چشمه نگه می‌دارد پس تعداد برخوردها افزایش یافته در نتیجه یونیزاسیون افزایش می‌یابد. شکل ۳-۹ چشمه‌ی یونی با دو آهنربا حلقه‌ای اطراف آند با قطر خارجی ۵۰ mm، قطر داخلی ۴۰ mm و ارتفاع ۵ mm که از هم ۷ mm فاصله دارند، نشان داده شده است. شبیه سازی‌ها آهنربا بر اساس آهنرباهای موجود و خریداری شده صورت گرفته است.

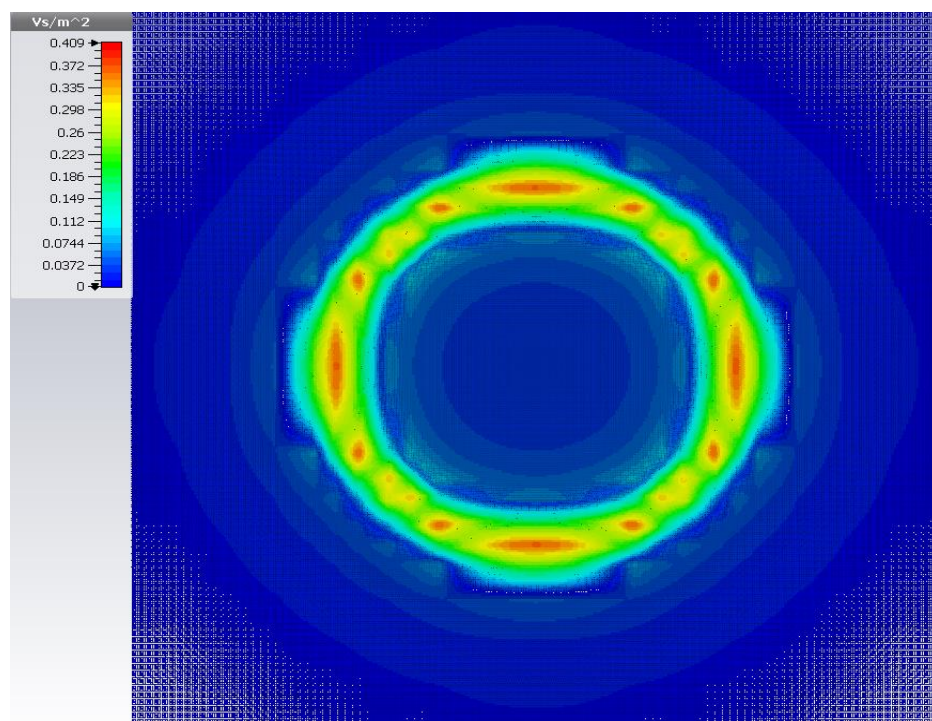


شکل ۳-۹ چشمه یونی با دو آهنربا حلقه‌ای اطراف آند



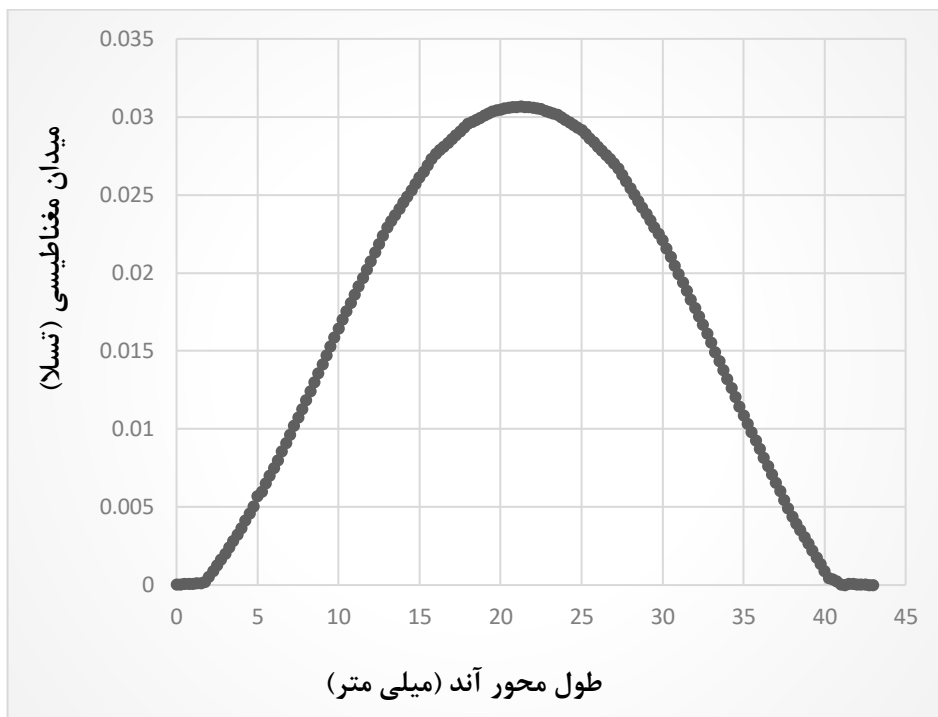
شکل ۳-۱۰ خطوط میدان مغناطیسی شبیه سازی شده ناشی از دو آهنربای حلقه‌ای در صفحه X-Z برای چشمه یونی پنینگ

شکل ۳-۱۰ خطوط میدان مغناطیسی ناشی از دو آهنربای حلقه‌ای در صفحه‌ی $x-z$ را نشان می‌دهد که استوانه توخالی آند را به دو قسمت مساوی تقسیم کرده است. شکل ۳-۱۱ خطوط میدان مغناطیسی در صفحه‌ی $x-y$ در وسط آند بین دو آهنربای حلقه‌ای را نشان می‌دهد. تراکم بالای خطوط میدان مغناطیسی در اطراف آند نشان دهنده‌ی افزایش میدان مغناطیسی در این نواحی می‌باشد در این نواحی شعاع لامور حرکت ذرات کم شده در نتیجه میزان برخورد ذرات به دیواره آند کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۱۱ خطوط میدان مغناطیسی شبیه سازی شده ناشی از دو آهنربای حلقه‌ای در صفحه $x-y$ برای چشمه یونی پنینگ

نمودار شکل ۳-۱۲ میدان مغناطیسی در طول محور آند را نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی در مرکز محور آند استوانه‌ای ۳۰۰ گوس می‌باشد.

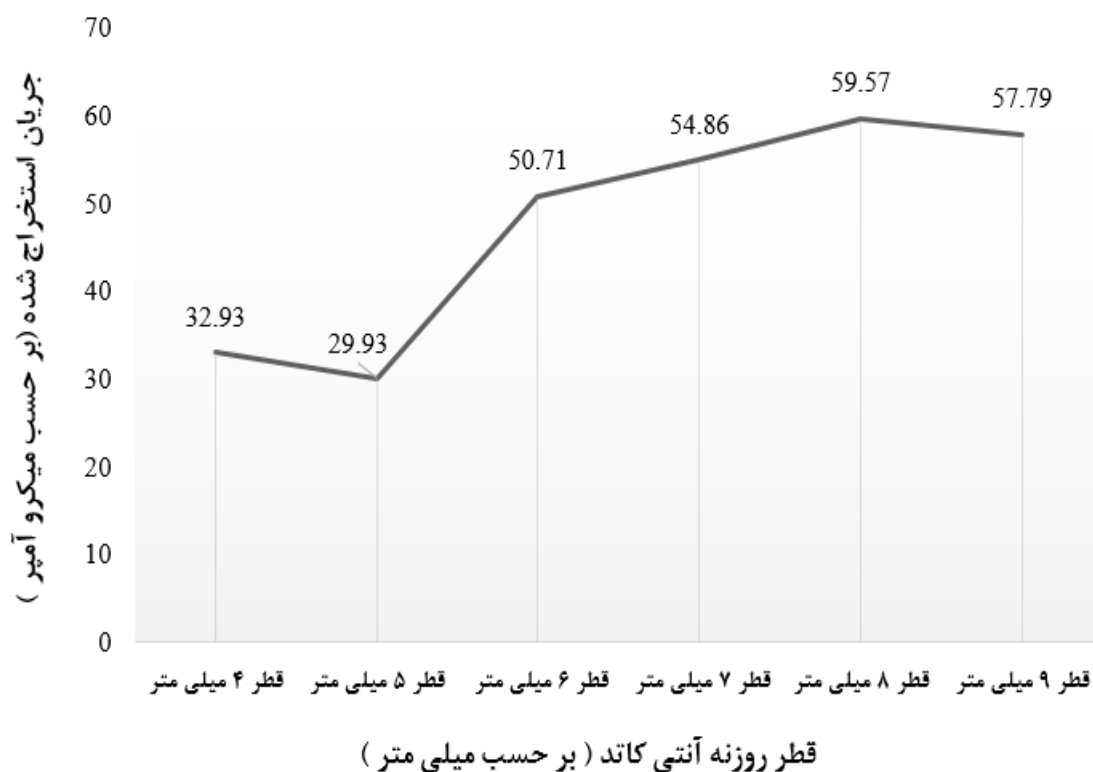


شکل ۳-۱۲ نمودار میدان مغناطیسی بر حسب طول محور آند

۳-۳-۴ طراحی و شبیه سازی آنتی کاتد

هندسه‌ی آنتی کاتد و روزنه‌ی استخراج نقش مهمی در استخراج یون‌ها ایفا می‌کند پس هندسه آنتی کاتد از اهمیت فراوانی برخوردار است.

هدف ما ابتدا بررسی قطر روزنه استوانه‌ای ساده آنتی کاتد می‌باشد که قطر ۴-۹ mm شبیه سازی شده و در ادامه مدل آنتی کاتدهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است.

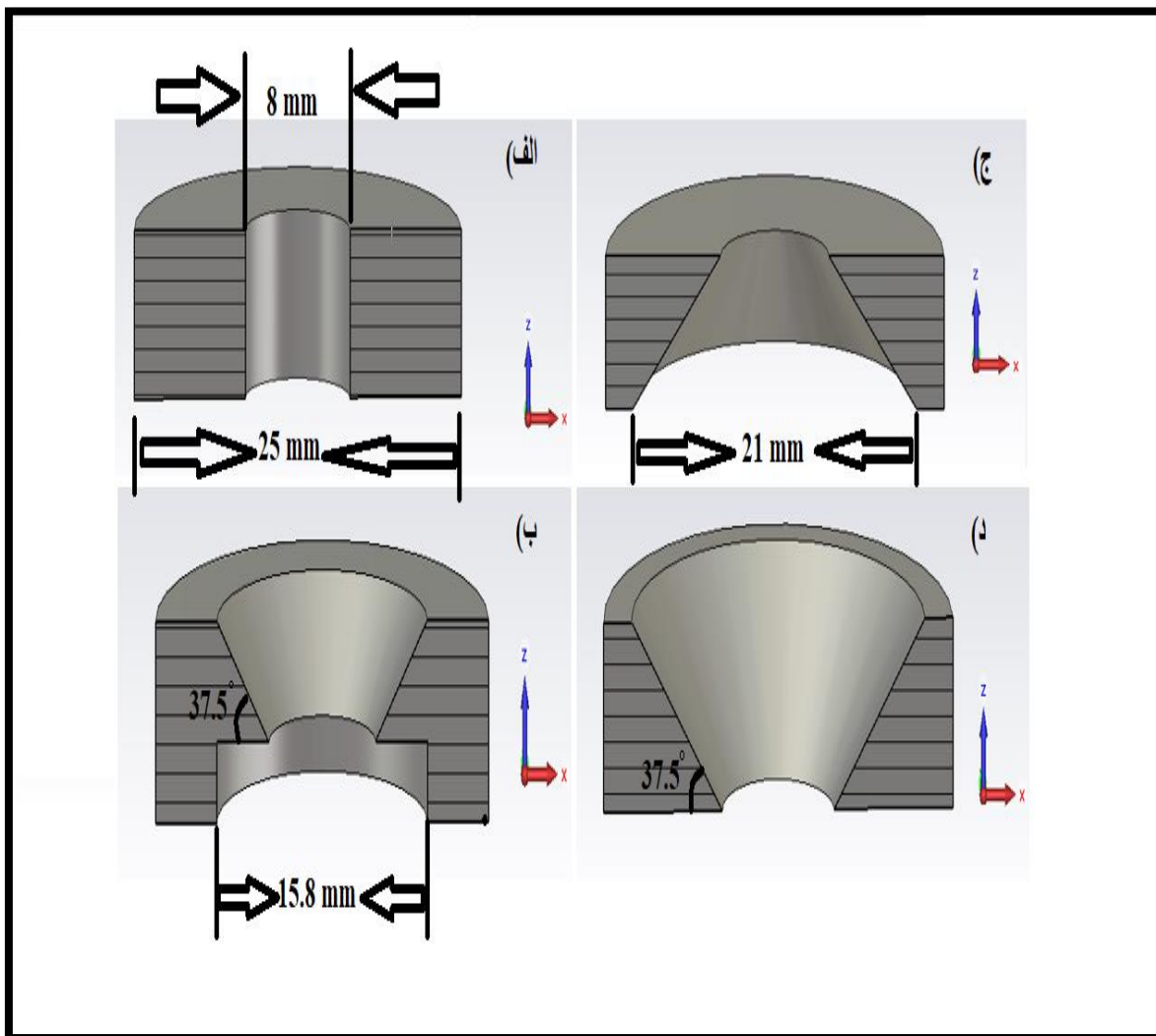


شکل ۳-۱۳ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب به قطر روزنه استخراج آنتی کاتد

نمودار شکل ۳-۱۳ جریان یون استخراج شده در فاصله ۱۵۰ mm از آنتی کاتد ارائه شده است که در نمونه شبیه سازی شده روزنه ی استخراج آنتی کاتد با قطر ۸ mm بیشترین جریان یون استخراج شده را نشان می دهد لازم به ذکر است که با افزایش قطر روزنه ی استخراج میزان فشار داخل چشمه افزایش می یابد و احتمال خروج گاز تزریق شده داخل چشمه نیز افزایش می یابد که نتیجه مطلوبی نمی باشد.

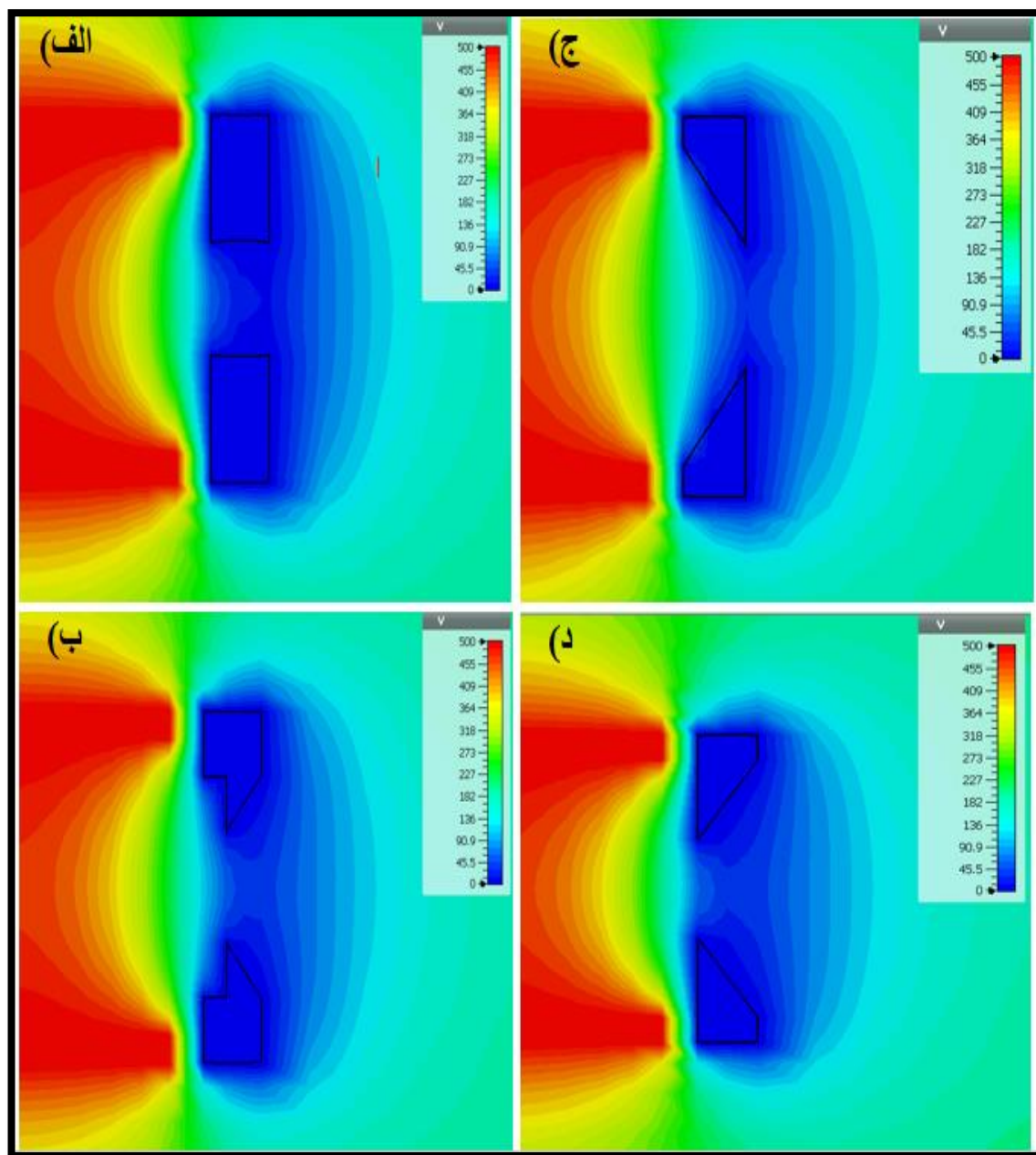
در نتیجه قطر روزنه ی استخراج آنتی کاتد را ۸ mm برای نمونه شبیه سازی شده انتخاب می کنیم و مدل های دیگر آنتی کاتد طراحی شده که در ادامه فصل به تفصیل بحث خواهیم کرد بر همین اساس می باشد.

جریان یون استخراج شده برای چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده در برنامه CST با مدل آنتی کاتدهای طراحی شده که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است بررسی شده است.

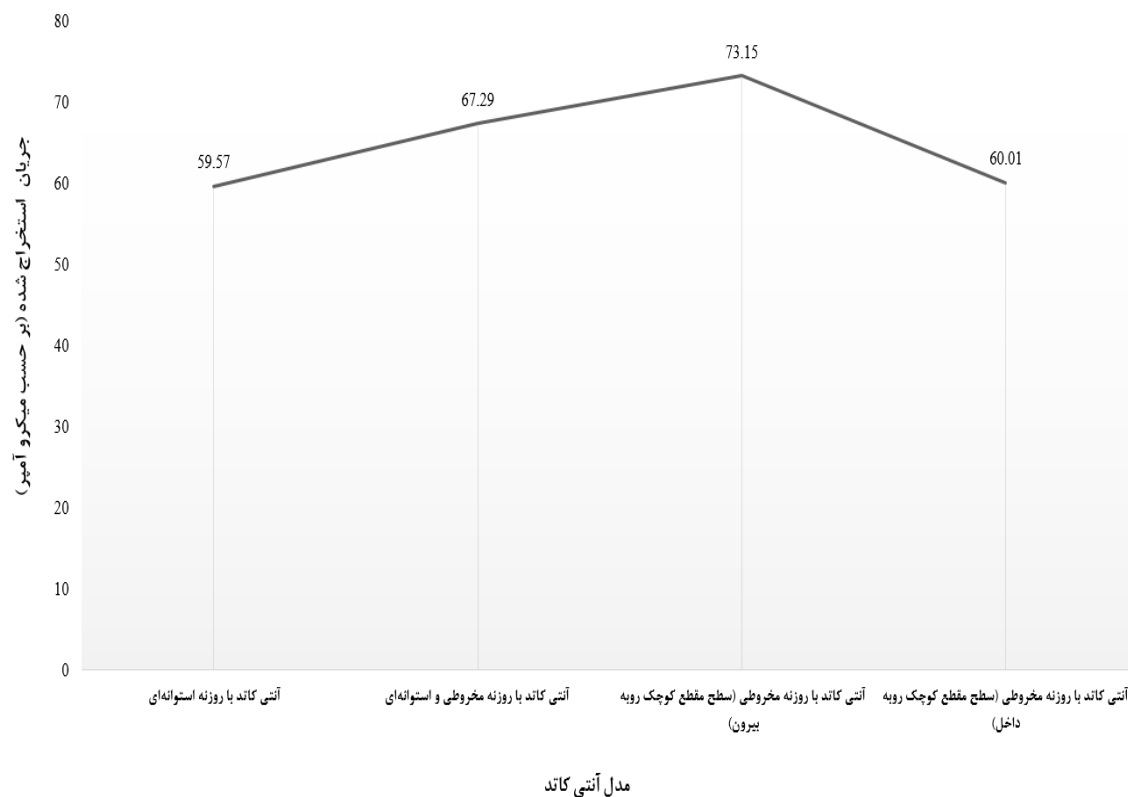


شکل ۳-۱۴ مدل آنتی کاتدهای طراحی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) آنتی کاتد با روزنه استوانه‌ای (ب) آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای (ج) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) (د) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه داخل چشمه)

شکل ۳-۱۵ خطوط هم پتانسیل برای مدل های مختلف آنتی کادهای طراحی شده را نشان می دهد.



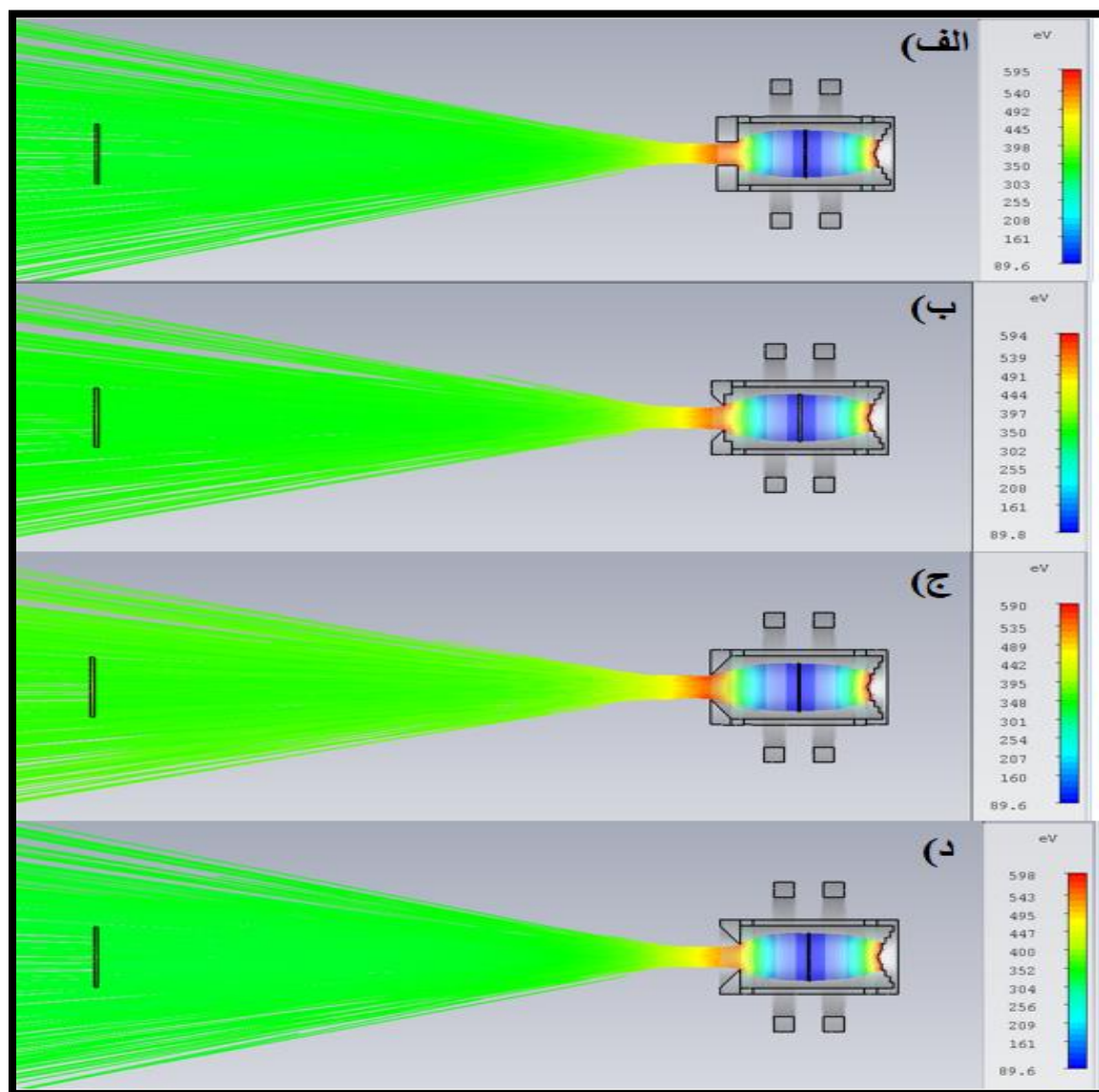
شکل ۳-۱۵ خطوط هم پتانسیل مدل آنتی کادهای طراحی شده در برنامه شبیه سازی CST (الف) آنتی کاتد با روزنه استوانه ای (ب) آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه ای (ج) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) (د) آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به داخل چشمه)



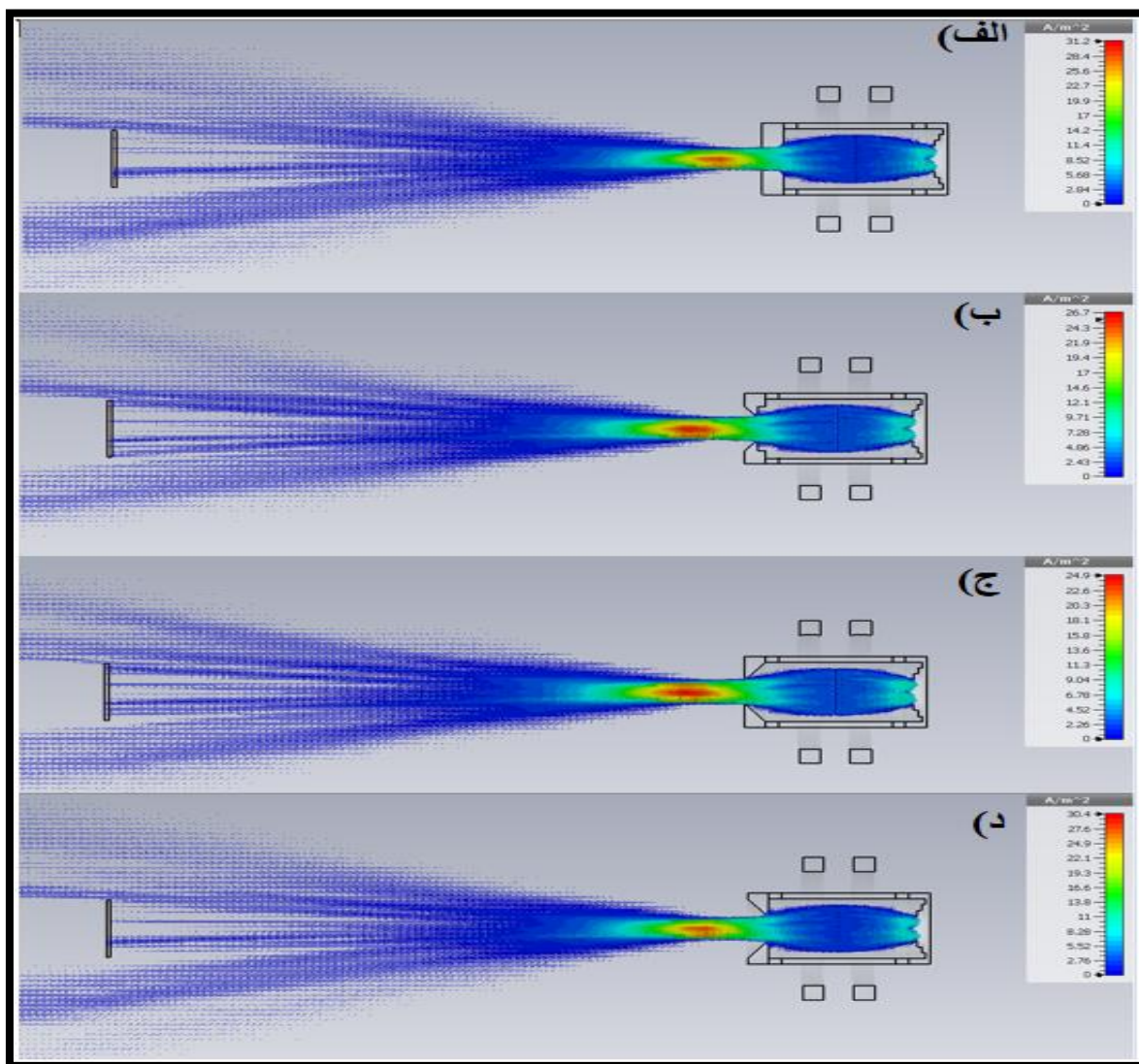
شکل ۳-۱۶ نمودار جریان یون استخراج شده برحسب به مدل آنتی کاتدهای طراحی شده

نمودار شکل ۳-۱۶ جریان یون استخراج شده برای مدل‌های آنتی کاتدهای طراحی شده را نشان می‌دهد که جریان یون استخراج شده در مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) نسبت به مدل‌های دیگر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. شکل ۳-۱۷ شکل باریکه خروجی برای مدل آنتی کاتدهای طراحی شده در برنامه شبیه سازی CST را نشان می‌دهد که در مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) باریکه کمترین برخورد به دیواره آنتی کاتد را نسبت به مدل‌های دیگر دارد. شکل ۳-۱۸ خطوط چگالی جریان در جهت محور استخراج باریکه برای چشمه‌ی یونی با مدل آنتی کاتدهای مختلف طراحی شده را نشان می‌دهد. در مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه

بیرون) باریکه یون استخراج شده بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر به سطحی با قطر ۲۰ mm که در فاصله ۱۵۰ mm از آنتی کاتد قرار دارد، برخورد کرده است.

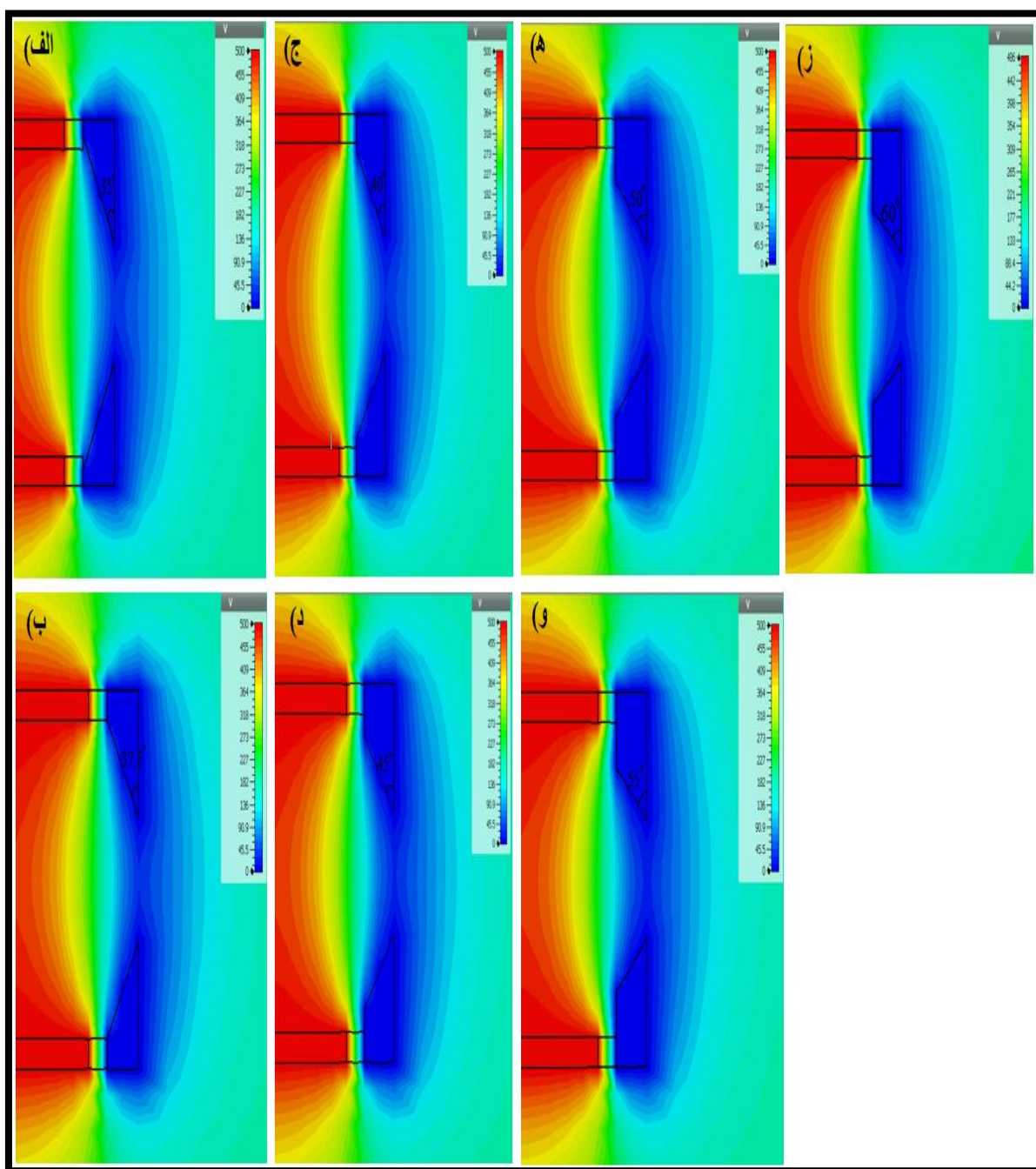


شکل ۳-۱۷ شکل باریکه خروجی از چشمه یونی پنینگ برای مدل آنتی کاتدهای طراحی شده الف) چشمه یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه استوانه‌ای ب) چشمه یونین پنینگ با آنتی کاتد روزنه مخروطی و استوانه‌ای ج) چشمه یونی با آنتی کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) د) چشمه یونی با آنتی کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به داخل چشمه)



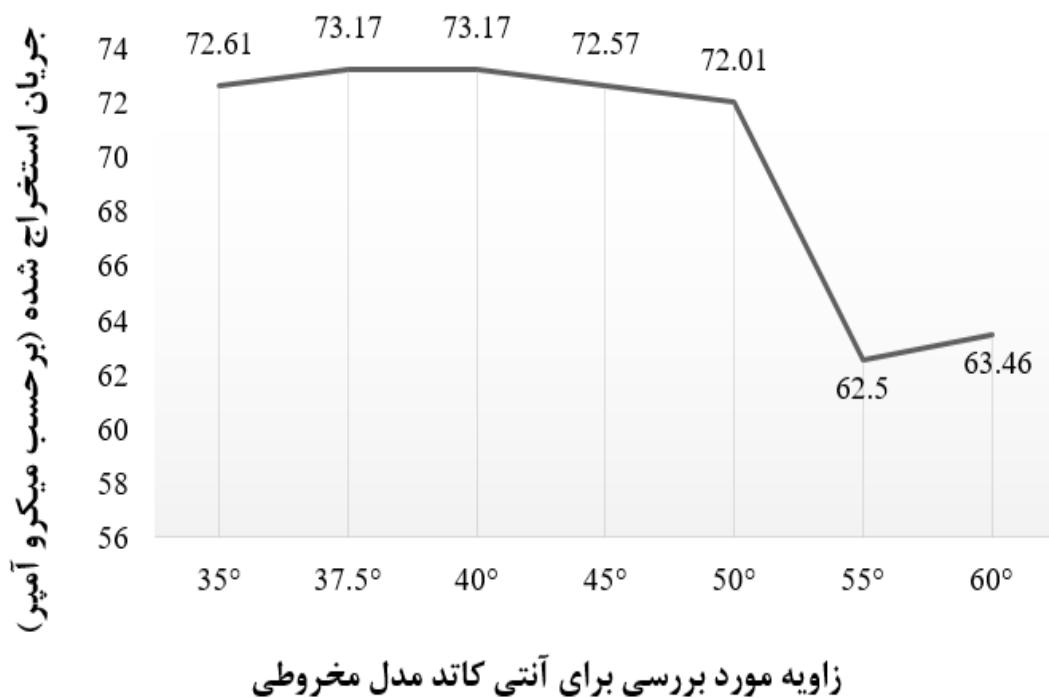
شکل ۳-۱۸ خطوط چگالی جریان چشمه یونی پنینگ برای مدل آنتی کاتدهای طراحی شده (الف) چشمه یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه استوانه‌ای (ب) چشمه یونی پنینگ با آنتی کاتد روزنه مخروطی و استوانه‌ای (ج) چشمه یونی با آنتی کاتد روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به داخل چشمه)

بر اساس مدل‌های مختلف آنتی کاتد شبیه سازی شده در مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) نتایج بهتری نسبت به مدل‌های شبیه سازی شده دیگر بدست آمد در نتیجه این مدل را برای چشمه یونی پنینگ انتخاب و زاویه‌های مختلف را برای مدل انتخابی مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۱۹ خطوط هم پتانسیل چشمه یونی شبیه سازی شده با آنتی کاتد مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) در زاویه های مختلف الف) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۳۵ درجه ب) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۳۷/۵ درجه ج) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۴۰ درجه د) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۴۵ درجه ه) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۵۰ درجه و) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۵۵ درجه ز) آنتی کاتد مخروطی با زاویه ۶۰ درجه

شکل ۳-۱۹ خطوط هم پتانسیل چشمه‌ی یونی با آنتی کاتد طراحی شده در زاویه‌های مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است بر اساس توابع مثلثاتی، حداقل زاویه‌ای که برای هندسه‌ی طراحی شده می‌توان در نظر گرفت ۳۵ درجه می‌باشد در غیر اینصورت باید قطر خارجی آنتی کاتد تغییر داد شود.



شکل ۳-۲۰ نمودار جریان یون استخراج شده بر حسب به زاویه‌های مختلف برای مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون)

نمودار شکل ۳-۲۰ جریان استخراج شده در فاصله ۱۵۰ mm از آنتی کاتد را نشان می‌دهد که آنتی کاتد با زاویه ۳۷/۵ و ۴۰ درجه بیشترین جریان استخراج شده را نشان می‌دهد.

۴-۳ نتیجه گیری

بر اساس شبیه سازی‌های انجام شده ابعاد چشمه یونی پنینگ را مورد بررسی قرار دادایم و با طراحی جدید و شبیه سازی کاتد و آنتی کاتد مقدار میدان الکتریکی و جریان باریکه استخراج شده چشمه یونی پنینگ طراحی شده نسبت به نمونه‌های قبلی افزایش یافته است.

فصل چہارم: طراحی و ساخت چشمہ یونی پینک

۴-۱ مقدمه

همان طور که در فصل قبل بیان کردیم برای بهبودی عملکرد چشمه یونی پنینگ لازم است که چشمه را شبیه سازی کنیم و قبل از ساخت چشمه یی یونی لازم است که طراحی دقیق از قطعات صورت بگیرد. طراحی و مدلسازی کامپیوتری قطعات چشمه یی یونی می تواند آخرین مرحله از شبیه سازی و طراحی، قبل از ساخت و ترشکاری قطعات چشمه یی یونی به منظور بهبود در عمل کرد، طراحی و تسريع در روند ساخت باشد.

در این پایان نامه طراحی ها بر اساس نتایج شبیه سازی شده در برنامه CST STUDIO SUITE که در فصل قبل بیان کردیم و مدلسازی به کمک برنامه SolidWorks صورت گرفته است.

SolidWorks یک نرم افزار مدل ساز و طراحی به کمک رایانه است که بر روی ویندوز اجرا می شود و برای مدلسازی جامدات است و از رویکرد پارامتری مبتنی بر ویژگی برای ساخت مدل ها و مونتاژها استفاده می کند. این برنامه از سه محیط پارت^۱، اسمبلی^۲ و دراوینگ^۳ تشکیل شده است که محیط اول برای رسم قطعه بوده، در محیط دوم قطعات یک ساختار بر روی هم سوار شده و در محیط آخر از آن ها نقشه مهندسی (معمولاً برای نسخه چاپی) تهیه می شود.

در ادامه فصل به تفصیل در مورد مدلسازی و ساخت قطعات اصلی اتاقک یونش چشمه یی یونی، قطعه نگه دارنده اتاقک یونش، نگه دارنده آهنربا و فلنج بحث خواهیم کرد.

۴-۲ طراحی چشمه یونی پنینگ

بر اساس شبیه سازی های انجام شده در فصل قبل به ترتیب موارد زیر را مورد بررسی قرار می دهیم:

۱- مدلسازی و ساخت اجزای اصلی اتاقک یونش

^۱ Part

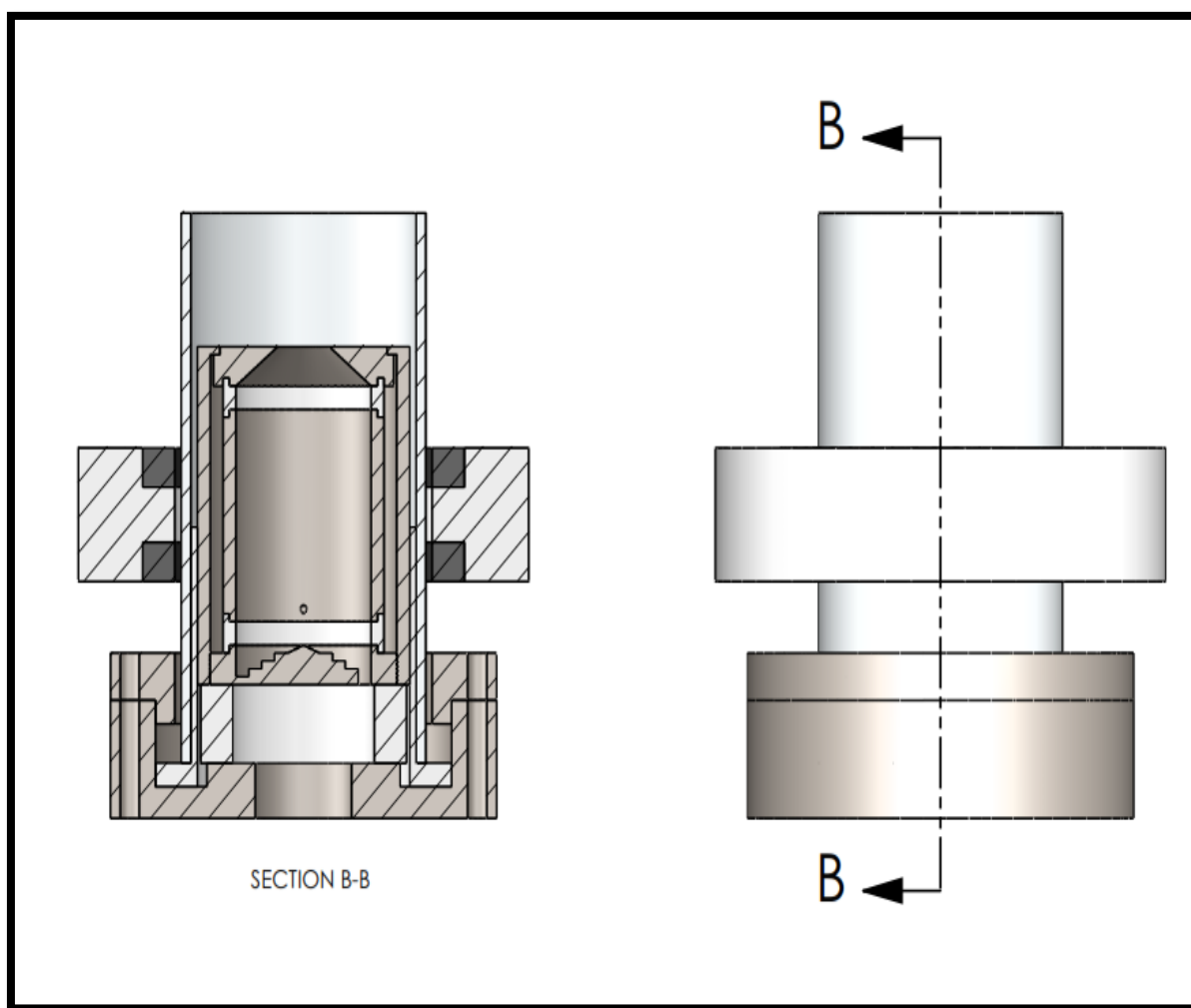
^۲ Assembly

^۳ Drawing

۲- طراحی و ساخت پوسته نگهدارنده اتاقک یونش

۳- طراحی و ساخت فلنچ‌ها

شکل ۴-۱ طرحی است که برای ساخت انتخاب شده است. در مورد هر یک از اجزای چشمه یونی در ادامه توضیح داده شده است.



شکل ۴-۱ طرح اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ مدل‌سازی شده برای ساخت

۴-۲-۱-۱ مدلسازی و ساخت اجزای اصلی اتاقک یونش

آهنربا، آند، کاتد، آنتی کاتد و عایق بین آند و کاتدها قطعات اصلی تشکیل دهنده اتاقک یونش چشمه‌ی یونی می‌باشد.

۴-۲-۱-۱-۱ آهنربا و مدلسازی قطعه نگهدارنده آهنربا

مطابق با شکل ۲-۴، برای ایجاد میدان مغناطیسی ۳۰۰ گوس در طول محور آند، از دو آهنربای نئودیمیم (NdFeB) حلقه‌ای با قطر خارجی ۵۰ mm، قطر داخلی ۴۰ mm و ارتفاع ۵ mm که توسط یک قطعه نگهدارنده PTFE (با ضخامت ۷ mm) از هم جدا شده اند، استفاده شده است.

پلی تترافلوئورو اتیلن یا به اختصار PTFE یک فلوئوروپلیمر مصنوعی از تترافلوئورو اتیلن است که کاربردهای بسیار فراوانی دارد. PTFE از زنجیر اصلی کربن تشکیل شده که به هر کربن آن، دو اتم فلوئور متصل است. از جمله ویژگی‌های آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

مقاوم در برابر حرارت (۳۲۷ درجه سانتیگراد)

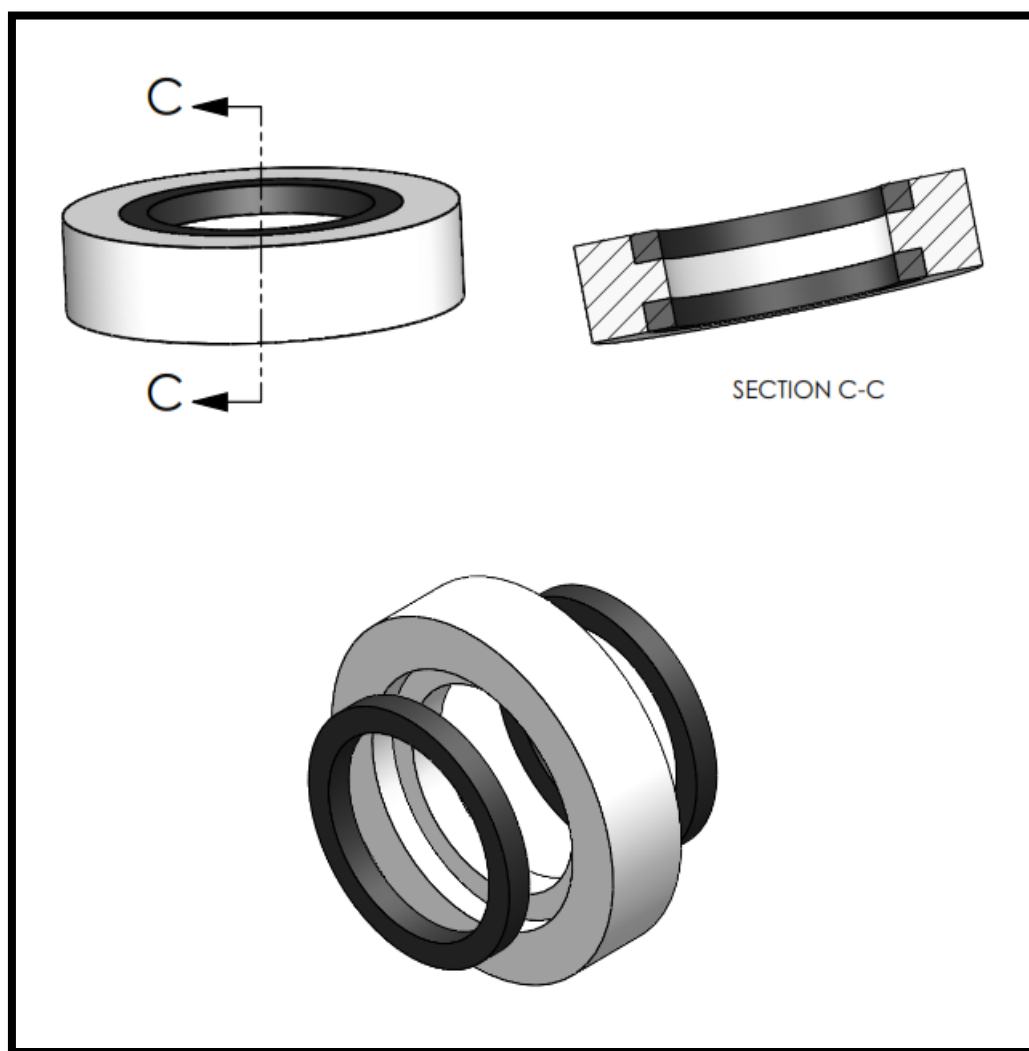
مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی

مقاومت بالا در برابر سایش و خوردگی

ضریب اصطکاک پایین

وزن سبک با استحکام بالا

خواص دی الکتریک بالا (عایق الکتریکی)



شکل ۴-۲ دو آهنربای حلقه‌ای و قطعه نگهداره PTFE مدل‌سازی شده

۴-۲-۱-۲ مدل‌سازی و ساخت کاتد

بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده کاتد سه پله‌ای و مخروطی نسبت به مدل‌های دیگر بررسی شده دارای میدان الکتریکی بهینه‌تری می‌باشد. شکل ۴-۳ کاتد سه پله‌ای و مخروطی را با ضخامت ۵ mm ، قطر خارجی ۲۹ mm ، پله‌ها و مخروط که ابعاد آن در جدول ۴-۱ توضیح داده شد است را نشان می‌دهد. جنس

کاتد از استنلس استیل ۳۰۴^۱ می باشد. در سطح کاتد سه روزنه‌ی لوبیای شکل برای ایجاد خلا بهتر در داخل اتاقک یونش چشمه‌ی یونی در نظر گرفته‌ایم و یک لبه برای نصب بر روی عایق بین کاتد و آند و هم محور بودن کاتد با آند و آنتی کاتد طراحی کردیم. سطح خارجی کاتد استوانه‌ای را با رزوه برای پیچ شدن در داخل پوسته نگهدارنده اتاقک یونش که در ادامه فصل به تفصیل توضیح داده خواهد شد، مدلسازی کرده‌ایم.

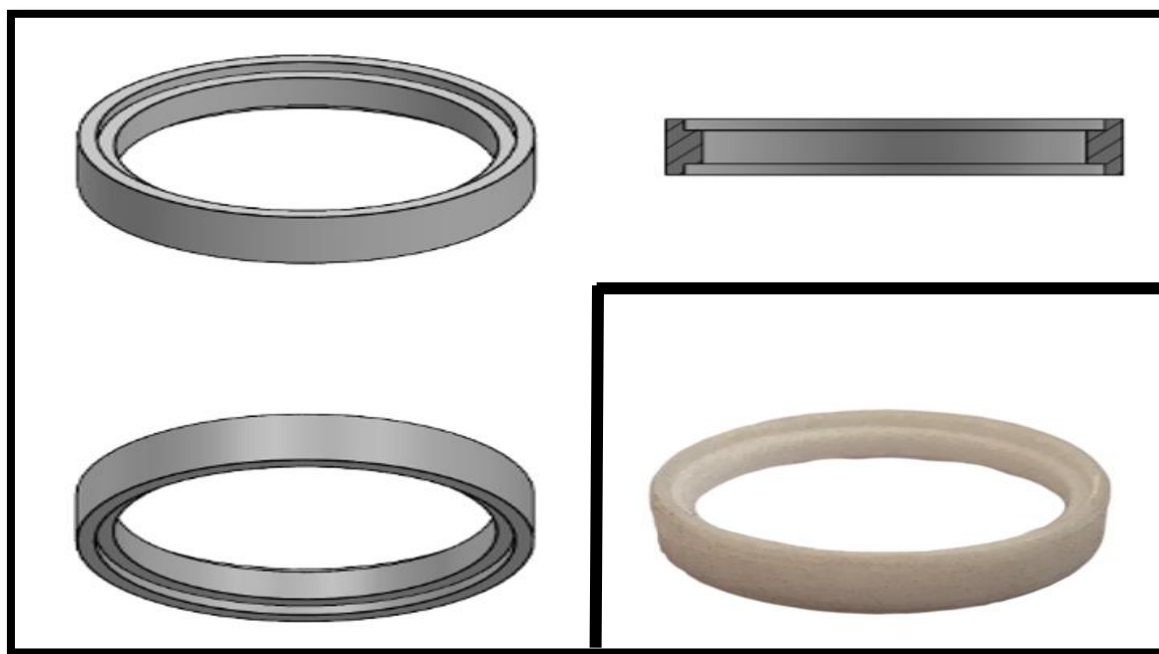


شکل ۳-۴ طرح کاتد سه پله‌ای و مخروطی و نمونه ساخته شده

¹ Stainless Steel 304L

تمام فولادها از ترکیب آهن و فولاد ساخته می‌شود اما فولاد ضد زنگ یا استنلس استیل^۱ به عنوان مثال استنلس استیل ۳۰۴ و استنلس استیل ۳۱۶^۲ علاوه بر این ترکیب دارای مقداری کروم می‌باشد. کروم آلیاژی است که به فولاد مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی و زنگ زدگی می‌دهد. این آلیاژها به استنلس استیل نگیر مشهور هستند. در واقع، نگیر بودن، نشان دهنده خواص غیرمغناطیسی این آلیاژ می‌باشد.

شکل ۴-۴ عایق بین آند و کاتدها با قطر خارجی و داخلی به ترتیب ۲۵ میلی‌متر و ۲۱ میلی‌متر و ارتفاع ۵ میلی‌متر که از جنس PTFE می‌باشد را نشان می‌دهد. این عایق آند و کاتدها را در فاصله‌ی ۳ میلی‌متر از هم نگه می‌دارد. در دو طرف عایق یک لبه بروی سطح داخلی برای نصب شدن بر روی کاتدها و آند طراحی شده است.



شکل ۴-۴ طرح عایق بین آند و کاتدها و نمونه ساخته شده

^۱ Stainless Steel

^۲ Stainless Steel 316L

۳-۱-۲-۴ مدلسازی و ساخت آند

شکل ۴-۵ آند که از جنس استنلس استیل ۳۰۴ ساخته شده است را نشان می‌دهد. همانگونه که در فصل قبل ذکر شد قطر خارجی آند ۲۵ میلی‌متر، ضخامت ۲ میلی‌متر و ارتفاع ۲۷ میلی‌متر می‌باشد. در ارتفاع ۱ میلی‌متری پوسته آند بر روی لبه که در سطح خارجی آند ایجاد شده (برای نصب آند بروی عایق بین آند و کاتدها) یک روزنه با قطر ۱ میلی‌متر برای اتصال سیم جهت اتصال الکتریکی در نظر گرفته‌ایم.

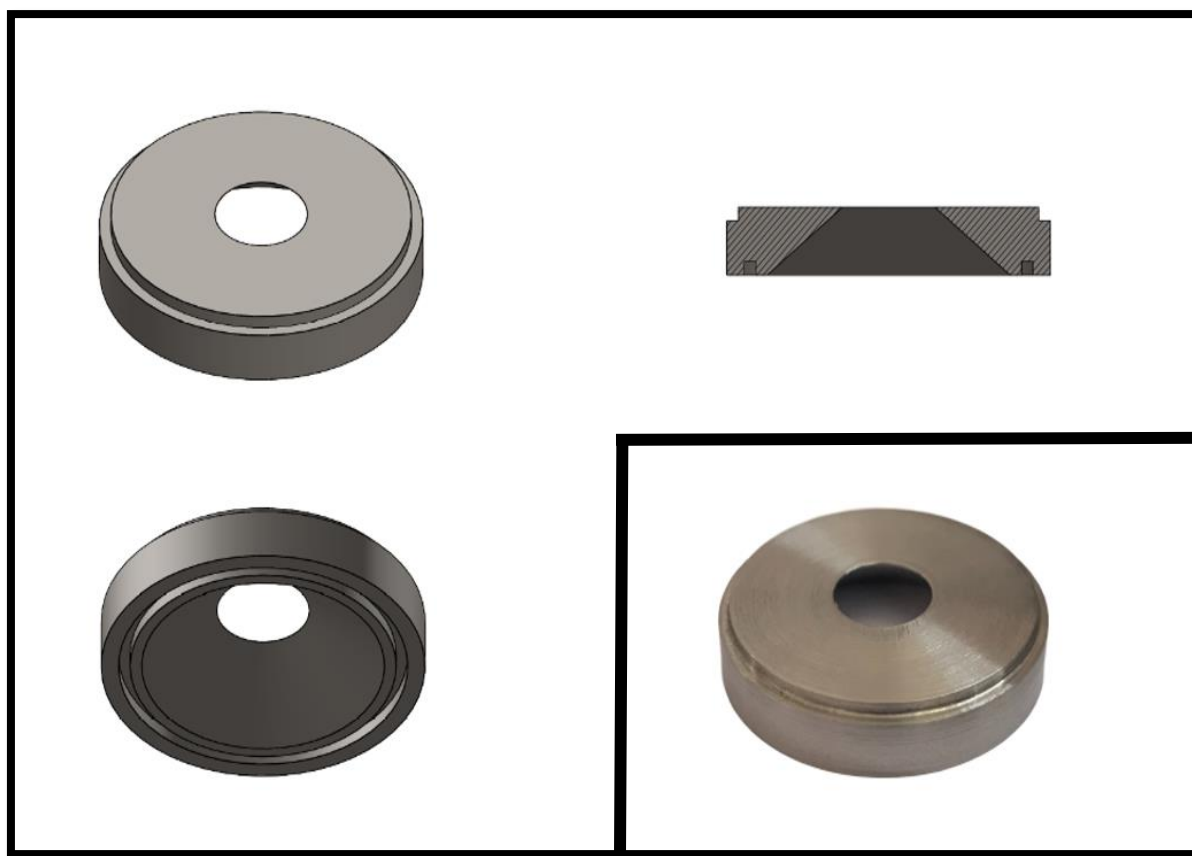


شکل ۴-۵ طرح آند (سمت راست) و نمونه ساخته شده (سمت چپ)

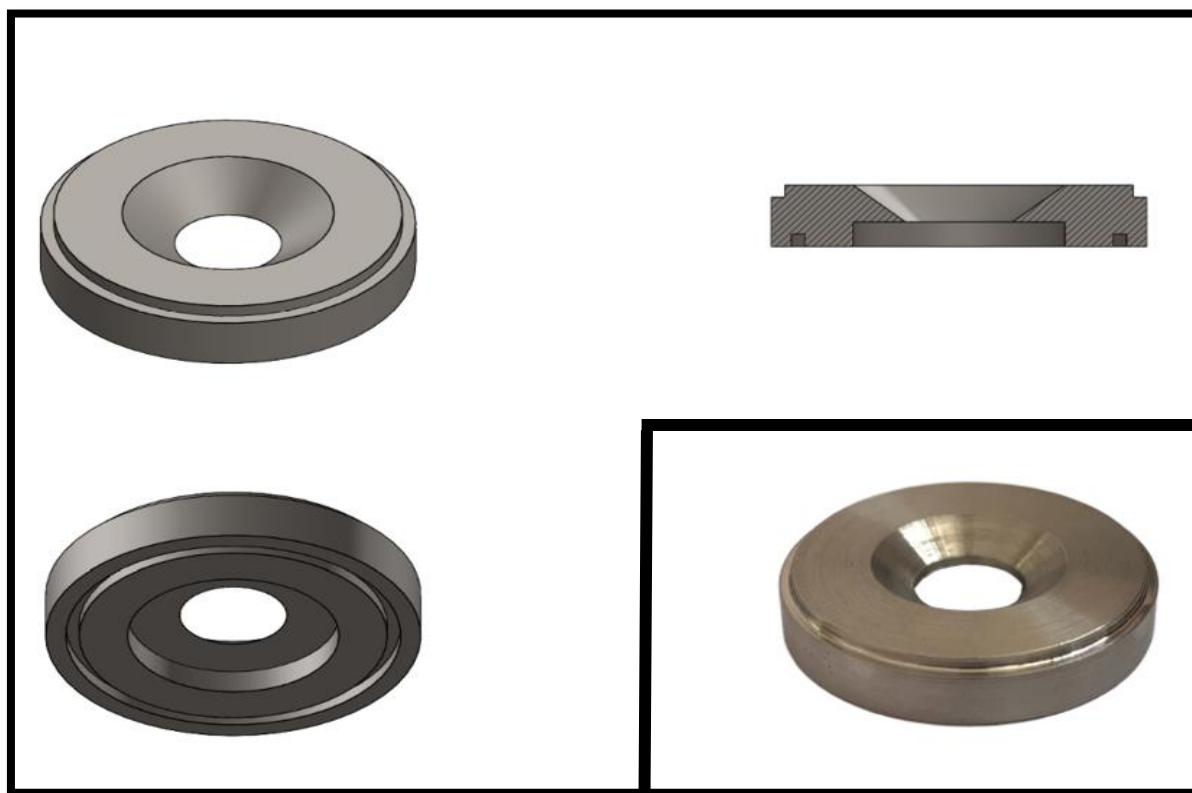
۴-۱-۲-۴ مدلسازی و ساخت آنتی کاتد

در فصل قبل مدل‌های مختلف آنتی کاتد را در ابعاد و هندسه‌های مختلف شبیه‌سازی کردیم و مورد بررسی قرار دادیم. براساس نتایج بدست آمده جریان یون استخراج شده در مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح

مقطع کوچک رو به بیرون) نسبت به مدل‌های دیگر آنتی کاتد شبیه سازی شده دارای مقدار بیشتری می‌باشد. هدف بررسی دو مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) و آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای به صورت تجربی می‌باشد بر همین اساس این دو طرح را مدلسازی کرده‌ایم. شکل ۴-۶ آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) را نشان می‌دهد. شکل ۴-۷ آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای را نشان می‌دهد. ضخامت هر دو مدل آنتی کاتد طراحی شده ۵ میلی‌متر و شیب دهانه آنها ۳۷/۵ درجه می‌باشد. لبه‌های طراحی شده برای نصب بر روی پوسته نگهدارنده اتاقک یونش و عایق بین آند و آنتی کاتد در نظر گرفته شده است. جنس آنتی کاتد از استنلس استیل ۳۰۴ می‌باشد.



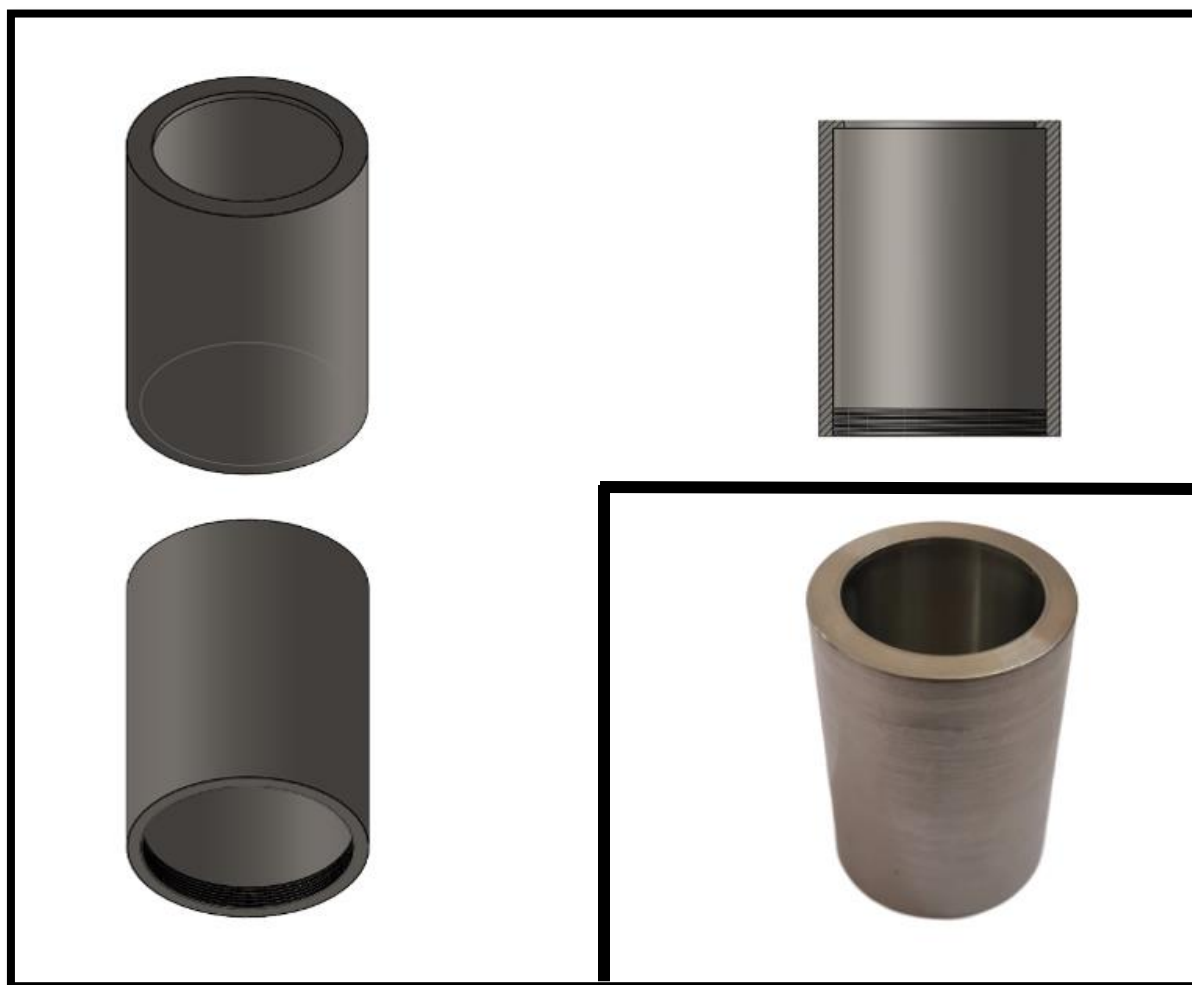
شکل ۴-۶ طرح آنتی کاتد با روزنه مخروطی (سطح مقطع کوچک رو به بیرون) و نمونه ساخته شده



شکل ۴-۷ طرح آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای و نمونه ساخته شده

۴-۲-۲ طراحی و ساخت پوسته نگهدارنده اتاقک یونش

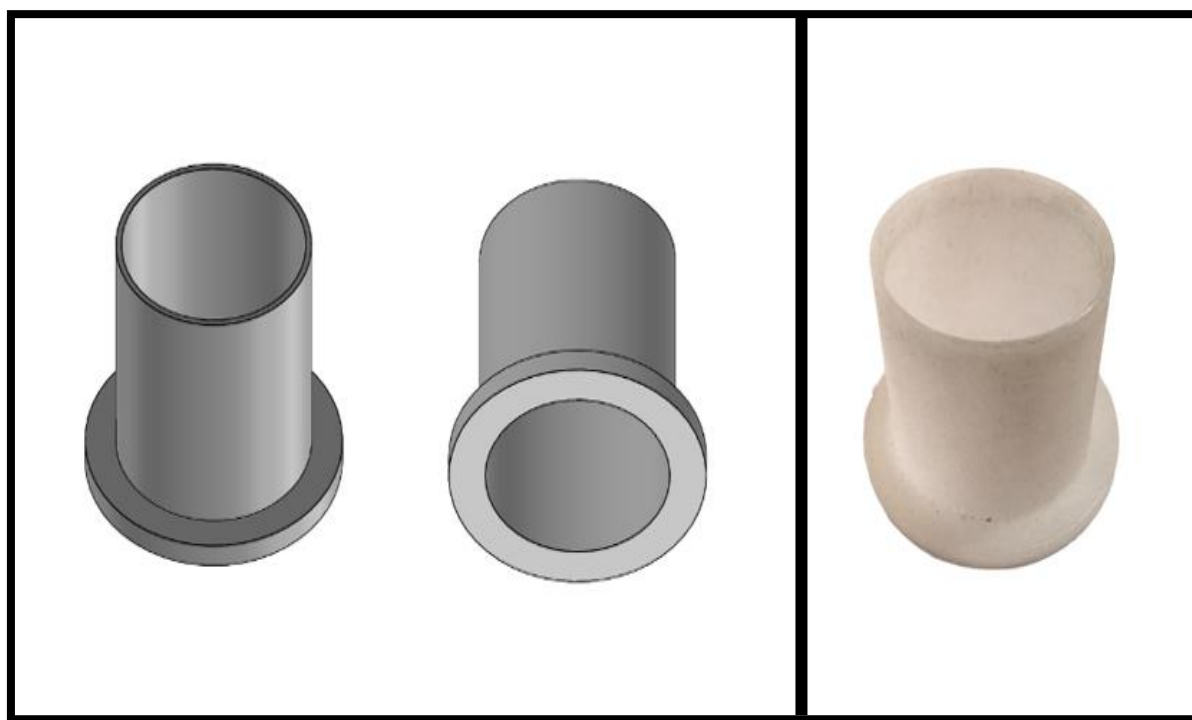
شکل ۴-۸ پوسته نگهدارنده اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ را نشان می‌دهد. این پوسته نقش ثابت نگه داشتن اجزای اصلی اتاقک یونش در یک راستا را بر عهده دارد. در قسمت بالای پوسته یک لبه برای اتصال به آنتی کاتد طراحی شده است. داخل پوسته قسمت پایین را با رزوه (برای پیچ شده کاتد) مدلسازی کرده‌ایم. هدف از طراحی این قطعه استفاده نکردن از چسب بین قطعات، قابل تعویض بودن همه‌ی قطعات تشکیل دهنده اتاقک یونش و ایجاد اتصال الکتریکی بین کاتد و آنتی کاتد می‌باشد.



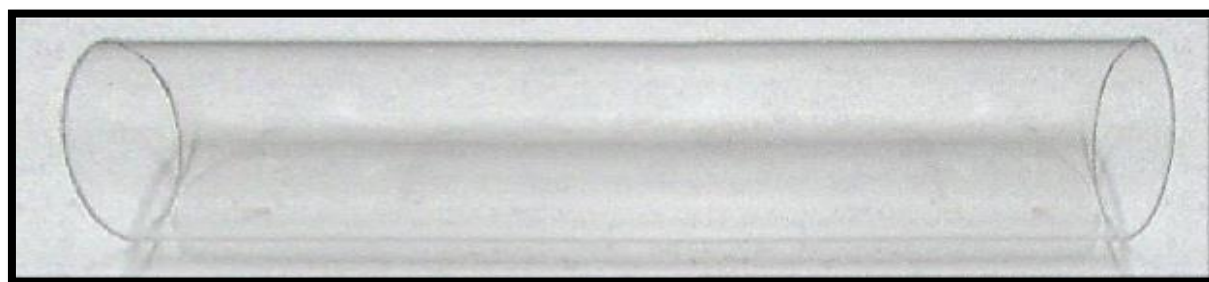
شکل ۴-۸ طراحی پوسته نگهدارنده اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ و نمونه ساخته شده آن

کل اتاقک یونش قرار گرفته در پوسته نگهدارنده با استفاده از یک قطعه PTFE که در شکل ۴-۹ نشان داده شده، در داخل لوله شیشه‌ای پیرکس قرار گرفته است. قطعه نگهدارنده PTFE به گونه‌ای طراحی شده است که فاصله‌ی بین شیشه و پوسته نگهدارنده اتاقک یونش را پر و چشمه‌ی یونی را به صورت ثابت نگه می‌دارد. همچنین قسمت پایین قطعه نگهدارنده PTFE دارای قطری بیشتر نسبت به قسمت بالای قطعه می‌باشد که درون فلنج پایین قرار می‌گیرد و از قرار گرفتن شیشه به روی استیل فلنج و شکستن شیشه

جلوگیری می کند. شکل ۴-۱۰ لوله شیشه‌ای پیرکس با قطر خارجی ۳۸ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۵ میلی‌متر نشان داده شده است.



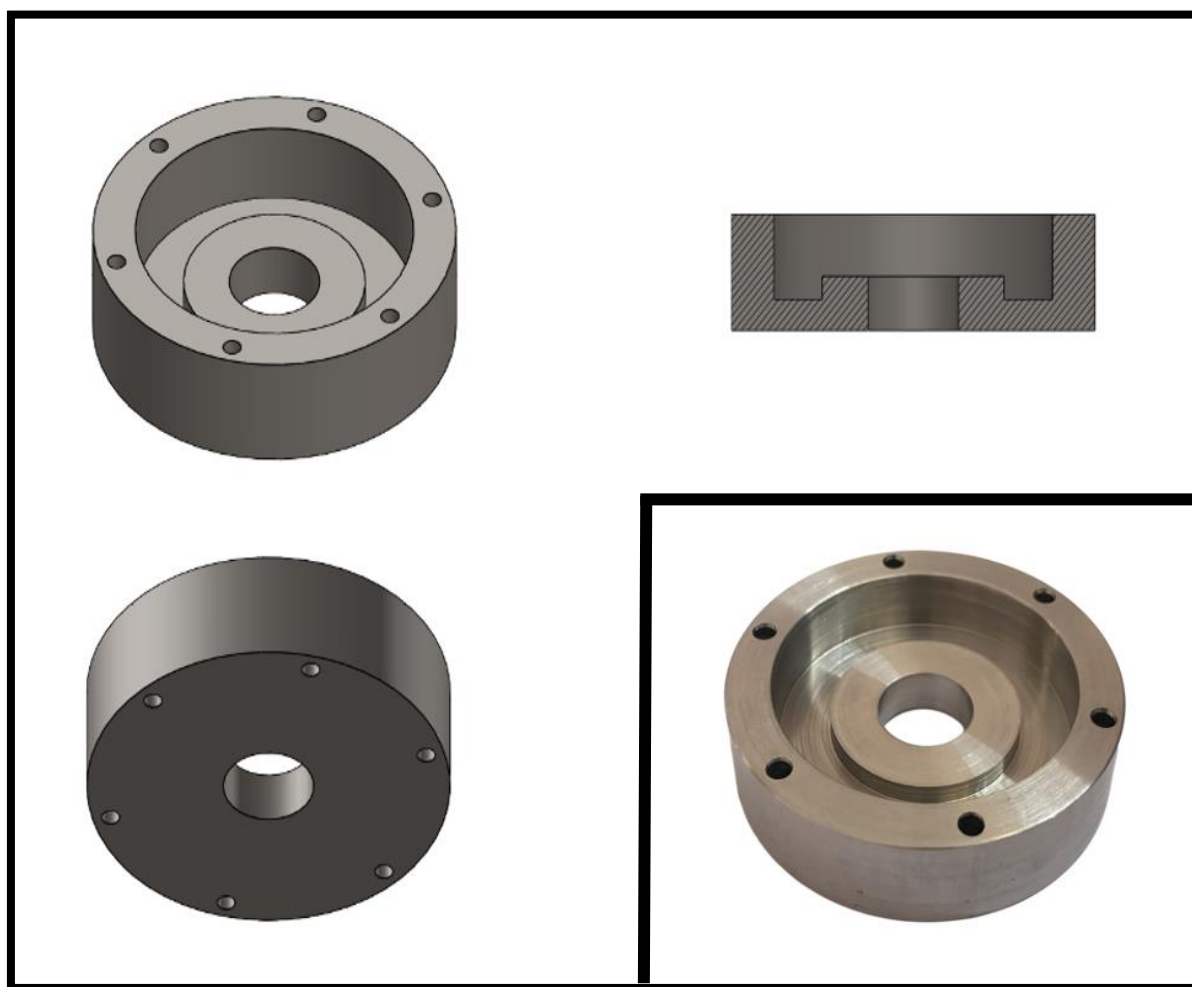
شکل ۴-۹ طرح قطعه PTFE نگهدارنده پوسته (سمت چپ) و نمونه ساخته شده آن (سمت راست)



شکل ۴-۱۰ لوله شیشه‌ای پیرکس استفاده شده

۴-۲-۳ طراحی و ساخت فلنج

برای ثابت نگهداشتن لوله شیشه‌ای پیرکس و چشمه‌ی یونی و همچنین حفظ خلا در داخل لوله شیشه‌ای فلنج‌هایی را طراحی کرده‌ایم. شکل ۴-۱۱ فلنج پایین نشان داده شده است که یک روزنه به قطر ۱۵ میلی‌متر برای نصب فیدترو^۱ و تزریق گاز در نظر گرفته‌ایم.



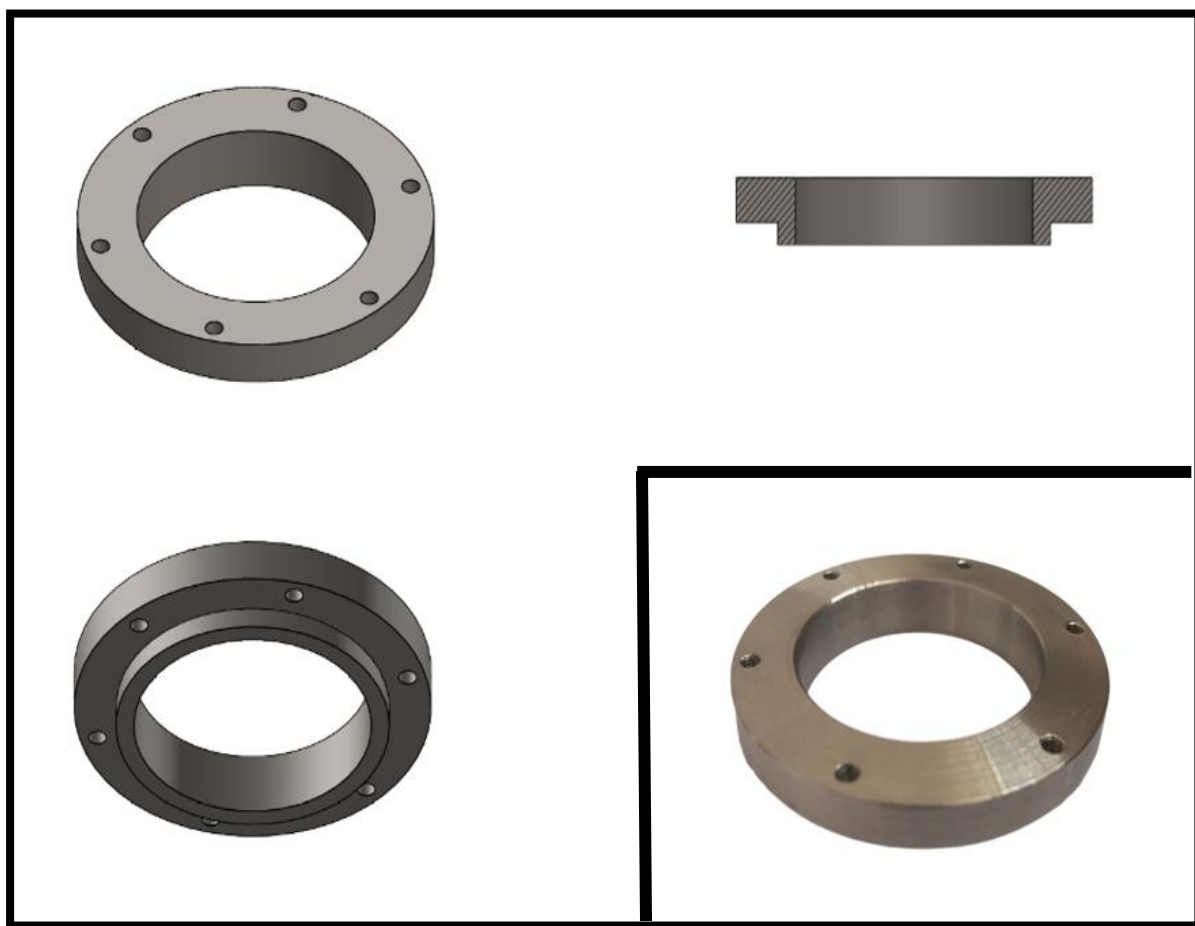
شکل ۴-۱۱ طراحی فلنج پایین و نمونه ساخته شده

^۱ Feedthrough

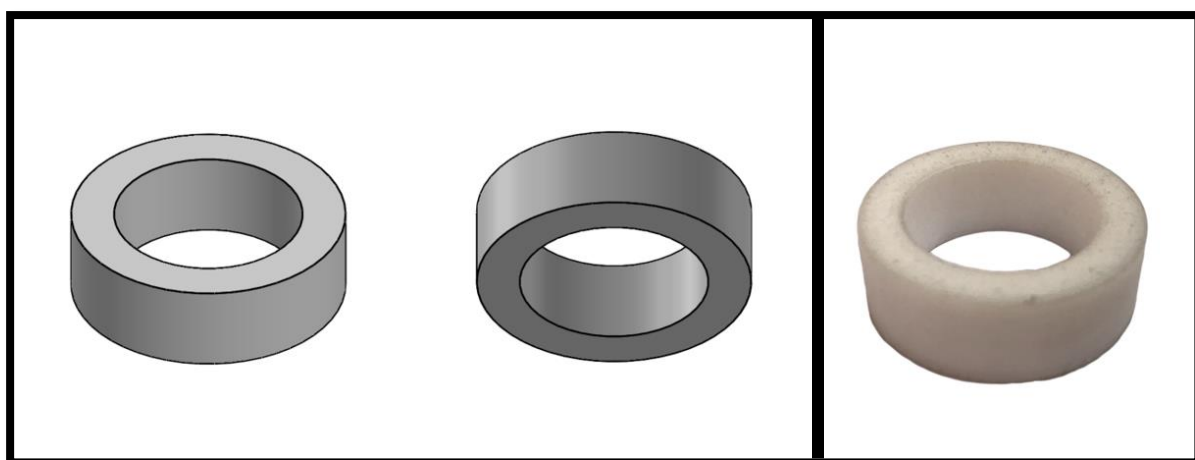
در بسیاری موارد در کاربردهای خلأ، نیاز است تا سیگنال های الکتریکی به داخل محفظه خلأ برده شوند و یا از آن بیرون آید. در اینگونه موارد از فیدتروهای الکتریکی خلأ استفاده می کنند که در آنها اتصال الکتریکی به صورت عایق شده و کاملاً درزبندی شده به داخل محفظه وارد می شوند. شکل ۴-۱۳ فلنج بالای که بر روی فلنج پایین پیچ می شود را نشان می دهد. برای قرارگیری پوسته اتاقک یونش چشمه ی یونی در انتهای چشمه یک قطعه تفلونی استوانه ای مطابق شکل ۴-۱۴ با قطر خارجی ۳۲ میلی متر، ضخامت ۵ میلی متر و ارتفاع ۱۰ میلی متر طراحی شده است.



شکل ۴-۱۲ لوله تزریق گاز و فید ترو

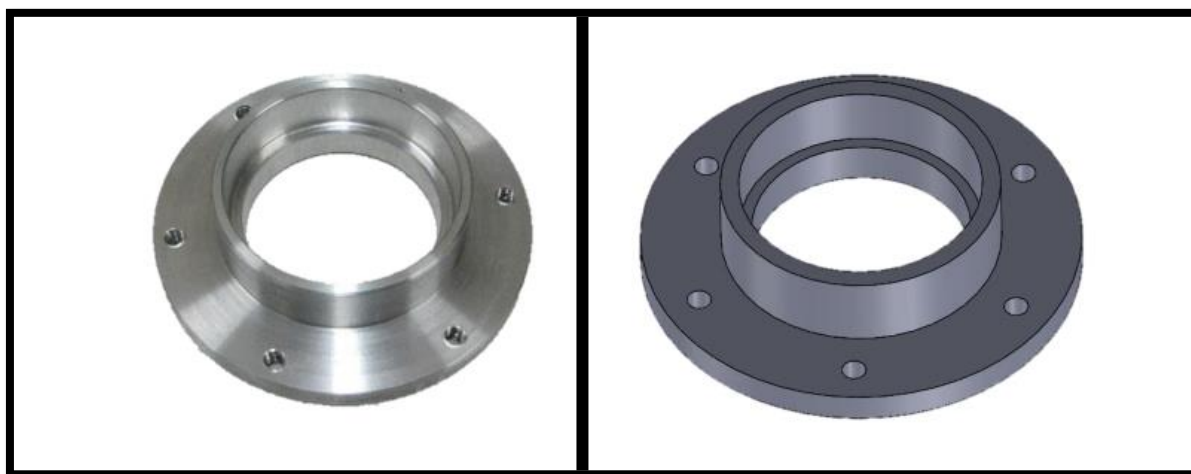


شکل ۴-۱۳ طراحی فلنج بالا و نمونه ساخته شده



شکل ۴-۱۴ طراحی قطعه تفلونی استوانه‌ای (سمت چپ) و نمونه ساخته شده (سمت راست)

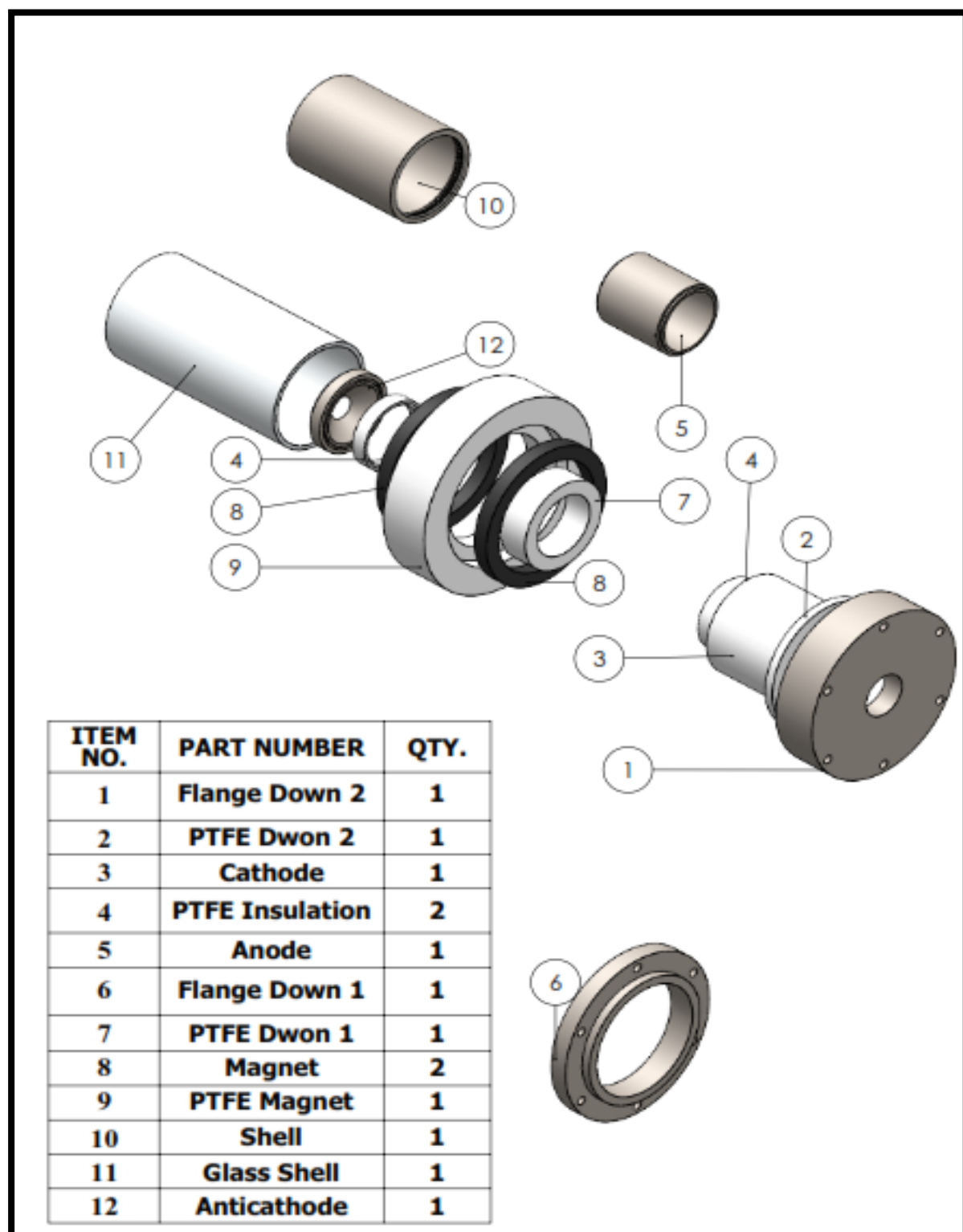
شکل ۴-۱۵ فلنج طراحی و ساخته شده برای انتهای لوله شیشه‌ای را نشان می‌دهد. این فلنج برای اتصال به قطعه تفلونی T شکل که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده، طراحی شده است. قطعه تفلونی T شکل به منظور اتصال به فنجان فارادی و اتصالات پمپ خلا قرار داده شده است. نقشه نهایی چشمه یونی پنینگ در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



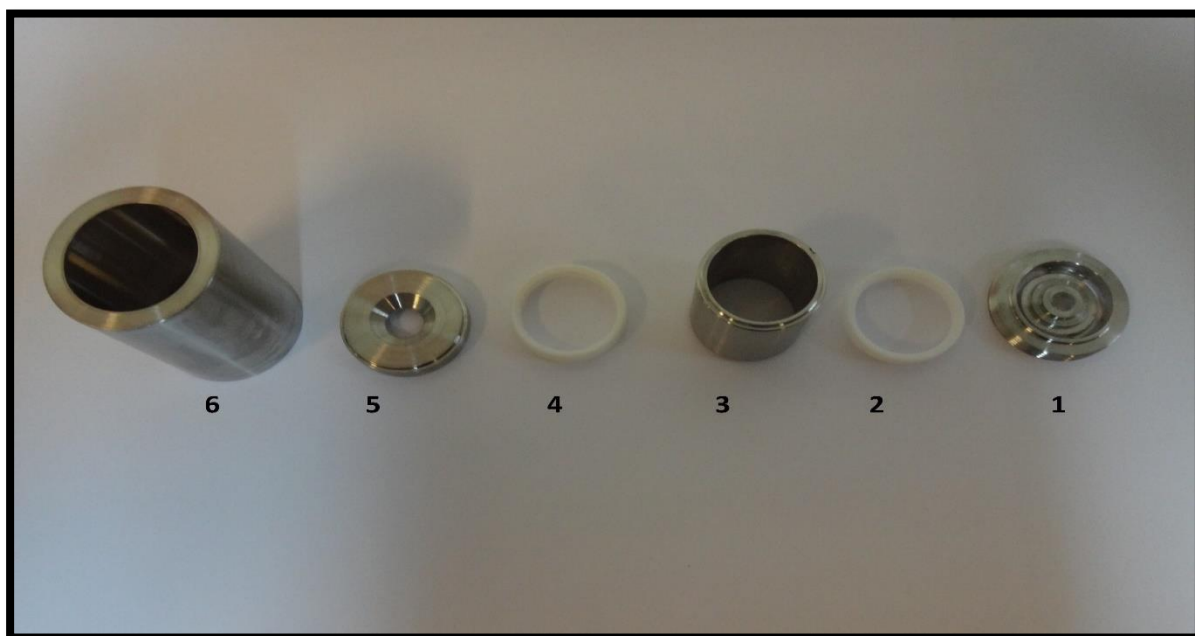
شکل ۴-۱۵ فلنج طراحی شده (سمت راست) و ساخته شده (سمت چپ) برای انتهای لوله شیشه‌ای



شکل ۴-۱۶ قطعه تفلونی T شکل متصل شده به فنجان فارادی و اتصالات پمپ خلا



شکل ۴-۱۷ نقشه انفجار اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ



شکل ۴-۱۸ قطعات اصلی اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ ۱- کاتد ۲- عایق بین آند و کاتدها ۳- آند ۴- عایق بین کاتدها و آند ۵- آنتی کاتد ۶- پوسته نگهدارنده اتاقک یونش



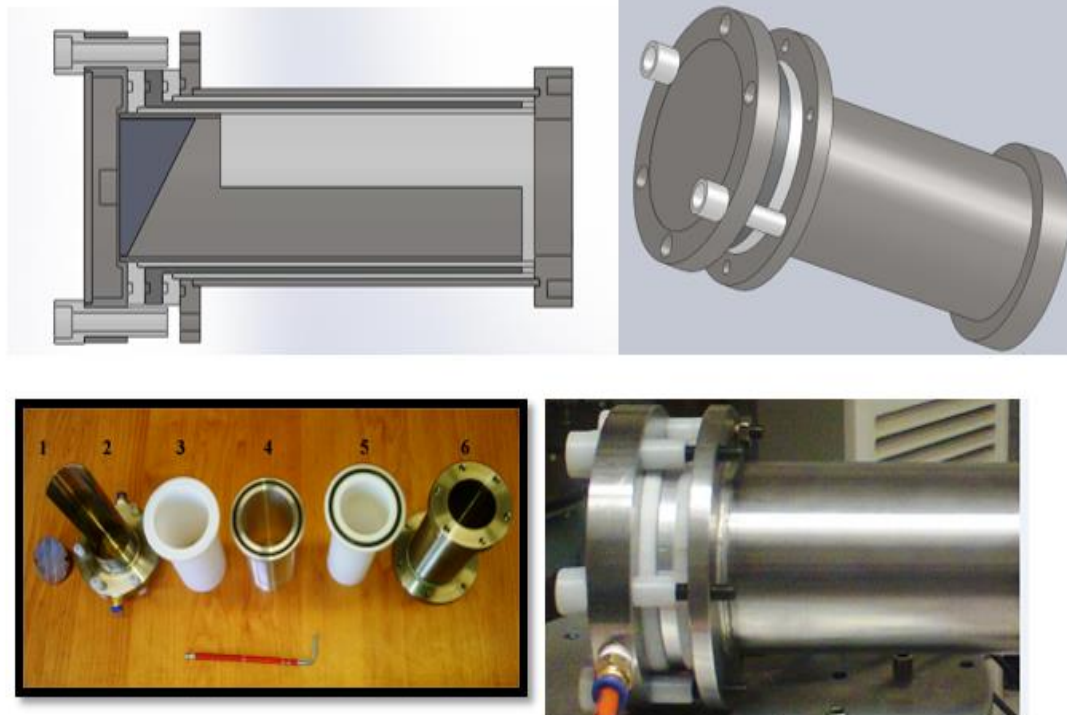
شکل ۴-۱۹ قطعات اصلی اتاقک یونش سرهم شده (سمت راست) پوسته نگهدارنده اتاقک یونش (سمت چپ)

۳-۴ فنجان فارادای^۱

برای اندازه گیری جریان باریکه یونی، روش‌های متعددی ارائه شده است. یکی از این روش‌ها آشکار سازی فنجان فارادی است. فنجان فارادی در دو مد کاری استاتیک و دینامیک به کار گرفته می‌شود.

در مد استاتیک، الکترو د داخلی به شکل یک فنجان ساخته می‌شود که یک انتهای آن بسته است. ذره باردار در داخل الکترو د جمع آوری کننده نفوذ می‌کند و شدت باریکه از طریق انتقال بار تعیین می‌شود. در مد دینامیک، ذره باردار با فنجان فارادی تماس ندارد. الکترو د داخلی فنجان به شکل یک استوانه با دو انتهای باز ساخته می‌شود. متناظر با مقدار بار عبوری از میان این الکترو د، بار الکتریکی بر روی این الکترو د القاء می‌شود. با آشکار سازی جریان این بار القا شده، شدت باریکه باردار گذرنده از فنجان فارادی محاسبه می‌گردد. از لحاظ هندسی فنجان فارادی شامل یک الکترو د داخلی (به عنوان جمع کننده یون) و یک الکترو د خارجی (به عنوان حفاظ) است، مابین این دو از یک دی‌الکتریک با ثابت معین پر می‌شود. شکل کلی الکترو دها ممکن است به صورت تخت، استوانه ای یا مخروطی باشد. برای آشکار سازی جریان باریکه بر روی اسیلوسکوپ وجود یک مدار الکتریکی ضروری است [۴۰، ۴۱]. برای اندازه گیری جریان باریکه این چشمه ی یونی از فارادی کاپی طراحی و ساخته شده در مرجع [۴۰] استفاده شده است.

¹ Faraday cup



شکل ۴-۲۰ قسمت های اصلی فارادی کاپ به ترتیب از چپ به راست: ۱- ساختار نیمه مخروطی ۲- فارادی کاپ نیمه استوانه ای ۳- عایق بین فارادی کاپ نیمه استوانه ای و بازدارنده ۴- بازدارنده ۵- عایق بین بازدارنده و لوله رانش ۶- لوله رانش [۴۰]

فصل پنجم: آزمایش و اندازه گیری

۵-۱ مقدمه

در این فصل ، نحوه تمیزکاری و سرهم کردن قطعات توضیح داده شده است. پس از سرهم کردن قطعات و آزمایش خلا با اعمال ولتاژ، چشمه‌ی یونی راه اندازی شده است. سپس ولتاژ اشتعال، شدت جریان تخلیه و استخراج شده چشمه‌ی یونی عنوان شده است.

۵-۲ تمیزکاری قطعات

برای تمیز کردن و برداشتن روغن تراشکاری از روی قطعات با آب صابون و استون تمام قطعات تراشکاری شده شستشو داده شده است. شکل ۵-۱ برای تمیز کردن کثیف‌هایی که با آب صابون تمیز نشده است تمام قطعات را به مدت ۶۰ دقیقه در دستگاه التراسونیک^۱ قرار می‌دهیم.

حمام التراسونیک در واقع یک ظرف فلزی است که مقداری الکل داخل آن می‌باشد که با استفاده از امواج التراسونیک ذرات چربی و آلودگی‌هایی را که روی سطح جسم قرار گرفته جدا کرده و جسم را پاک می‌کند. اصول کلی این روش مبتنی بر غوطه وری قطعات مورد نظر در یک مایع واسطه می‌باشد که این مایع توسط یک مولد امواج التراسونیک با فرکانس و شدت بسیار بالایی مرتعش شده و هنگامی که حفره‌سازی بوجود می‌آید، عمل شستشو و پاک کردن قطعه را انجام می‌دهد.

^۱ Ultrasonic



شکل ۵-۱ قطعات چشمه یونی پنینگ قرار گرفته در دستگاه التراسونیک

۳-۵ سرهم کردن قطعات

پس از تمیزکاری قطعات تراشکاری شده مطابق با شکل ۵-۲ قطعات بر روی یکدیگر سوار شدند. قطعات اتاقک یونش چشمه‌ی یونی در داخل پوسته نگهدارنده اتاقک یونش قرار می‌گیرند. برای جلوگیری از تخلیه بار الکتریکی یا تولید پلاسما در بین دیواره داخلی پوسته نگهدارنده اتاقک یونش و دیوار خارجی آند، دیواره خارجی آند را با عایق الکتریکی مایلار پوشانده‌ایم.



شکل ۵-۲ اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ سرهم شده

اتصال الکتریکی بین کاتد و آنتی کاتد از طریق پوسته نگهدارنده که بر روی فلنج قرار دارد به زمین متصل شده است و اتصال الکتریکی آند از طریق سیم مسی به فیدترو متصل شده است. همانطور که در فصل قبل ذکر شد اتاقک یونش قرار گرفته در پوسته نگهدارنده با استفاده از یک قطعه تفلونی در داخل لوله شیشه‌ای پیرکس قرار گرفته است. لوله شیشه پیرکس در داخل فلنج پایین قرار گرفته و فلنج بالا بر روی فلنج پایین پیچ شده و لوله شیشه‌ای پیرکس با استفاده از اورینگ^۱ حلقه‌ای درزبندی شده است.

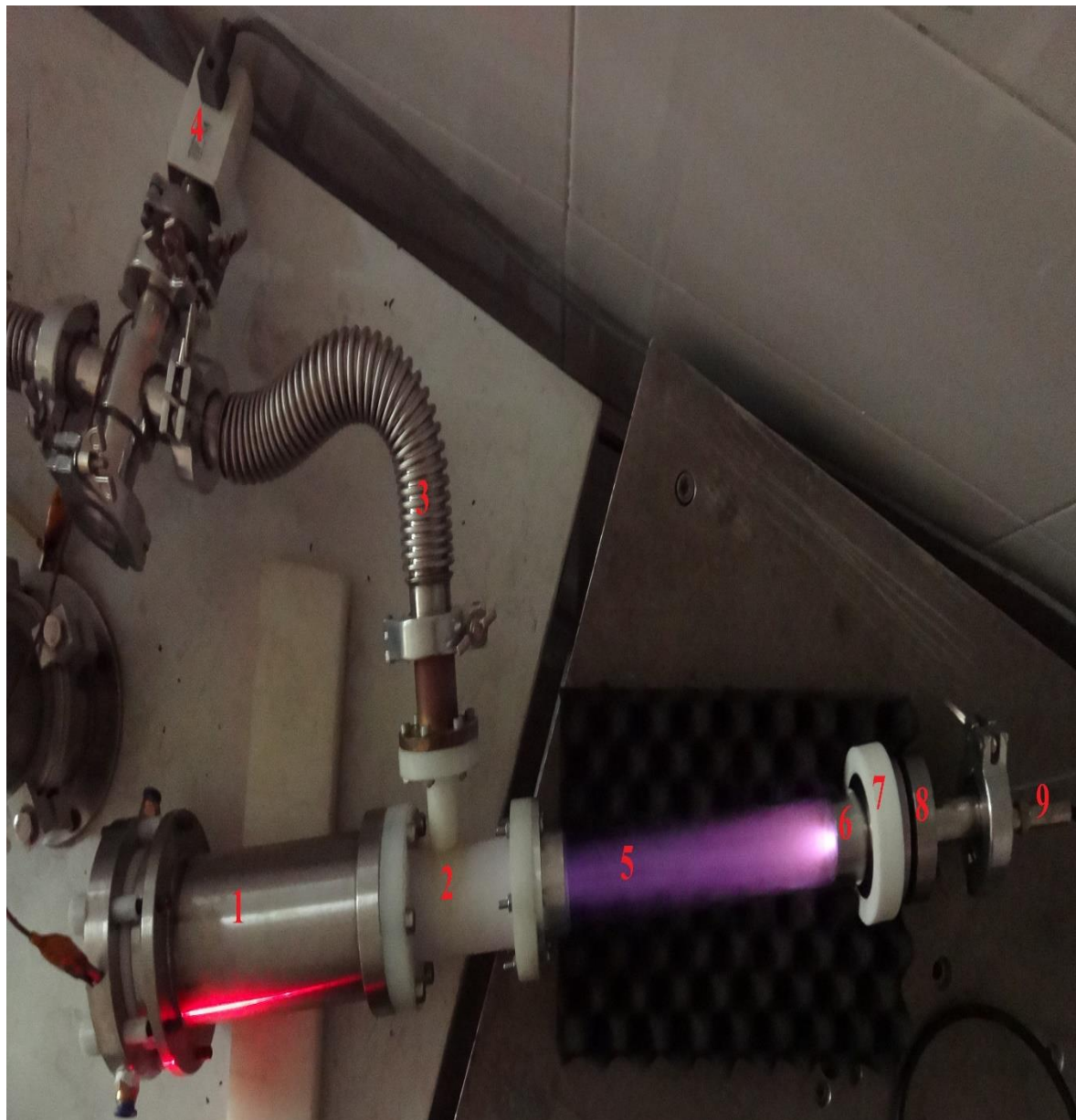
^۱ O-ring



شکل ۳-۵ اتاقک یونش قرار گرفته در فلنج پایین با استفاده از یک قطعه تفلونی
(سمت چپ) اورینگ قرار گرفته در لوله شیشه‌ای پیرکس و فلنج بالا (سمت راست)

در انتهای فلنج پایین فیدترو و لوله تزریق گاز قرار داده شده است. لوله تزریق گاز به محفظه گاز که دارای شیر سوزنی می‌باشد متصل شده است. محفظه و رگلاتور متصل به کپسول گاز هیدروژن فشار کسپول را از ۱۰۰ bar به ۳ bar کاهش می‌دهد. در انتهای لوله شیشه‌ای برای اتصال به قطعه تفلونی T شکل یک فلنج

به لوله شیشه چسب شده است. قطعه تفلونی T برای اتصال به فنجان فارادی و پمپ خلا در نظر گرفته شده است. در شکل ۴-۵ مجموعه کلی چشمه یونی پنینگ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ مجموعه کلی چشمه یونی پنینگ ۱- فنجان فارادی ۲- قطعه تفلونی T شکل ۳- اتصالات پمپ خلا ۴- فشار سنج پیرانی ۵- لوله شیشه‌ای پیرکس ۶- اتاقک یونش چشمه یونی قرار گرفته در پوسته نگهدارده ۷- آهنربای حلقه‌ای قرار گرفته در قطعه نگهدارده تفلونی ۸- فلنج انتهای چشمه ۹- لوله تزریق گاز و سیم متصل شده به فیدترو

۴-۵ آزمایش خلا و نشت یابی

قبل از تزریق گاز و دادن پتانسیل به آند برای روشن شدن چشمه آزمایش خلا را انجام می‌دهیم. برای اطمینان از نگه داری خلا مجموعه چشمه‌ی یونی ابتدا با روشن کردن پمپ خلا روتاری^۱ و بعد از حصول اطمینان از رسیدن خلا به $2 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ پمپ خلا توربومولکولار^۲ را برای فشار خلا بالا 10^{-6} mbar روشن می‌کنیم. فشار گاز با فشارسنج پیرانی اندازه‌گیری می‌شود. در صورت نرسیدن فشار خلاء مجموعه چشمه‌ی یونی به محدوده‌ی مد نظر با استفاده از الکل نشت یابی می‌کنیم در صورت درز یا نشتی در هر قسمتی از چشمه‌ی یونی که الکل ریخته شود در صورت نفوذ الکل به داخل چشمه میزان فشار خلاء سریع پایین می‌آید که باید مشکل درز را با چسب یا خمیر خلاء بر طرف کرد. شکل ۵-۵ میزان فشار خلا مجموعه چشمه یونی پنینگ اندازه‌گیری شده با فشارسنج پیرانی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵ فشار خلا مجموعه چشمه یونی پنینگ قرائت شده

^۱ Rotary

^۲ Turbo molecular

۵-۵ روشن کردن چشمه

پس از حصول اطمینان از خلاء چشمه‌ی یونی و آزمایش آن، پمپ توربومولکولار را خاموش کرده و فشار خلا را به فشار محدود کاری یعنی $3 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ تا $3 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ می‌رسانیم و گاز هیدروژن را تزریق می‌کنیم. برای انجام عملیات پرجینگ^۱ یا پاکسازی قطعات داخل خلا (به منظور پاکسازی و تخلیه هوای اولیه داخل شیشه) و جلوگیری از اکسید شدن قطعات تزریق گاز هیدروژن را چندین بار انجام می‌دهیم. برای ایجاد یون و روشن کردن چشمه‌ی یونی از منبع تغذیه DC که می‌تواند حدوداً ۳۰۰۰ ولت پتانسیل و جریان ۱۰ میلی‌آمپر فراهم کند استفاده شده است. به منظور تشکیل پلازما و ساطع شدن نور از داخل چشمه میزان ولتاژ اعمال شده به آند را تغییر می‌دهیم شکل ۵-۶ لحظه روشن شدن چشمه‌ی یونی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶ لحظه روشن شدن چشمه یونی پنینگ

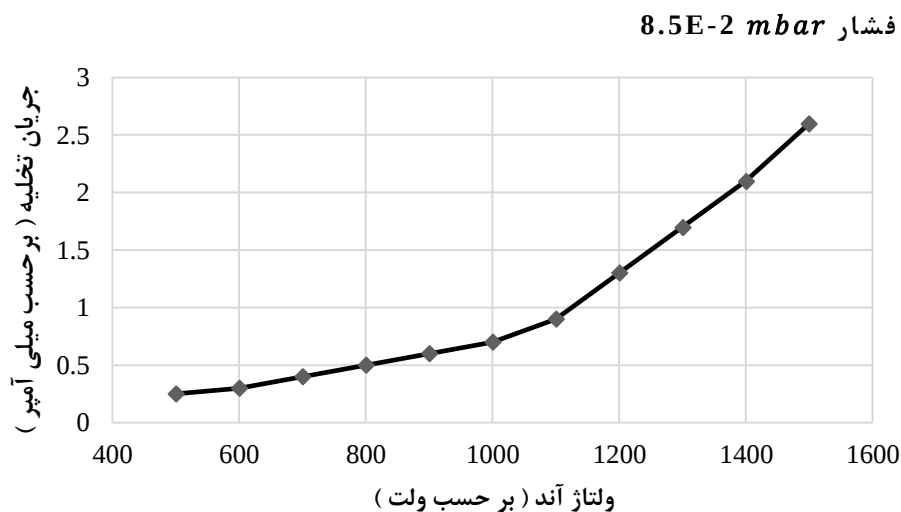
^۱ Purging

۵-۶ آزمایش و اندازه گیری

به منظور رعایت کردن فرآیند راه اندازی چشمه ی یونی مدتی چشمه را در حالت روشن می گذاریم و پس از اطمینان از حالت پایدار چشمه در تشکیل پلاسما آزمایش و اندازه گیری را انجام می دهیم. به طور کلی در اینجا چهار پارامتر فشار، ولتاژ، جریان تخلیه و جریان استخراج شده قابل اندازه گیری است که در ادامه فصل به تفصیل توضیح داده شده است.

۵-۶-۱ اندازه گیری جریان تخلیه در ولتاژهای مختلف

جریان تخلیه ناشی از برخورد الکترون ها به آند بوده که به منبع تغذیه دوباره برگردانده می شود و به راحتی توسط منبع تغذیه خوانده می شود. شکل ۵-۷ نمودار جریان تخلیه نسبت به تغییر ولتاژ آند را در فشار ثابت $8.5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ نشان می دهد. ولتاژ آند را از ۵۰۰ ولت تا ۱۵۰۰ ولت مورد بررسی قرار دادیم.



شکل ۵-۷ نمودار جریان تخلیه بر حسب ولتاژ آند

با افزایش ولتاژ الکترون‌ها انرژی بیشتری برای یونیزاسیون خواهند داشت بنابراین ذرات بیشتری را یونیزه خواهند کرد در نتیجه ذرات بیشتری به آند برخورد کرده و به منبع تغذیه بازگردانده خواهد شد پس در فشار ثابت با افزایش ولتاژ آند جریان تخلیه نیز افزایش می‌یابد.

۲-۶-۵ اندازه‌گیری فشار بر حسب ولتاژ اشتعال

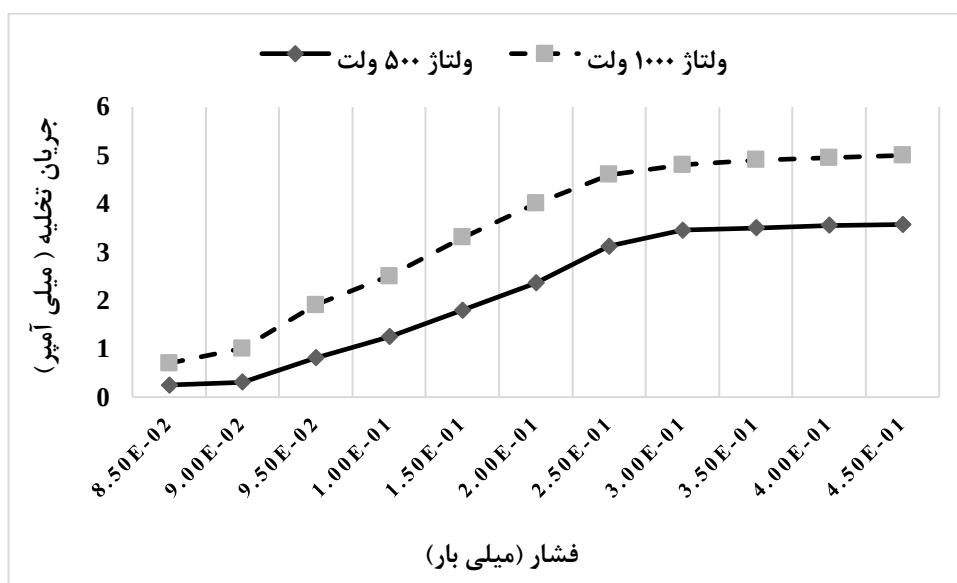
شکل ۵-۸ نمودار ولتاژ اشتعال بر حسب فشار نشان داده شده است که با افزایش فشار، ولتاژ اشتعال کاهش پیدا کرده است که دور از انتظار نمی‌باشد. زمانی پلاسما درون چشمه تولید می‌شود که تعداد کافی یون و الکترون درون چشمه وجود داشته باشد که با افزایش فشار، ذرات بیشتری درون چشمه وجود خواهد داشت که این امر شرایط و احتمال برخورد را بیشتر می‌کند پس در فشار بالا نسبت به فشار پایین‌تر ولتاژ کمتری برای تشکیل پلاسما و روشن شدن چشمه لازم است زیرا تعداد ذرات یونیزه در آن خیلی سریع افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۸ نمودار ولتاژ اشتعال بر حسب فشار

۳-۶-۵ اندازه‌گیری جریان تخلیه بر حسب فشار

در شکل ۵-۹ نمودار جریان تخلیه بر حسب فشار خلا در دو ولتاژ ۵۰۰ ولت و ۱۰۰۰ ولت نشان داده شده است با افزایش فشار تعداد ذرات باردار درون چشمه افزایش می‌یابد در نتیجه جریان تخلیه که جریان ناشی از برخورد الکترون‌ها به آند می‌باشد افزایش می‌یابد.



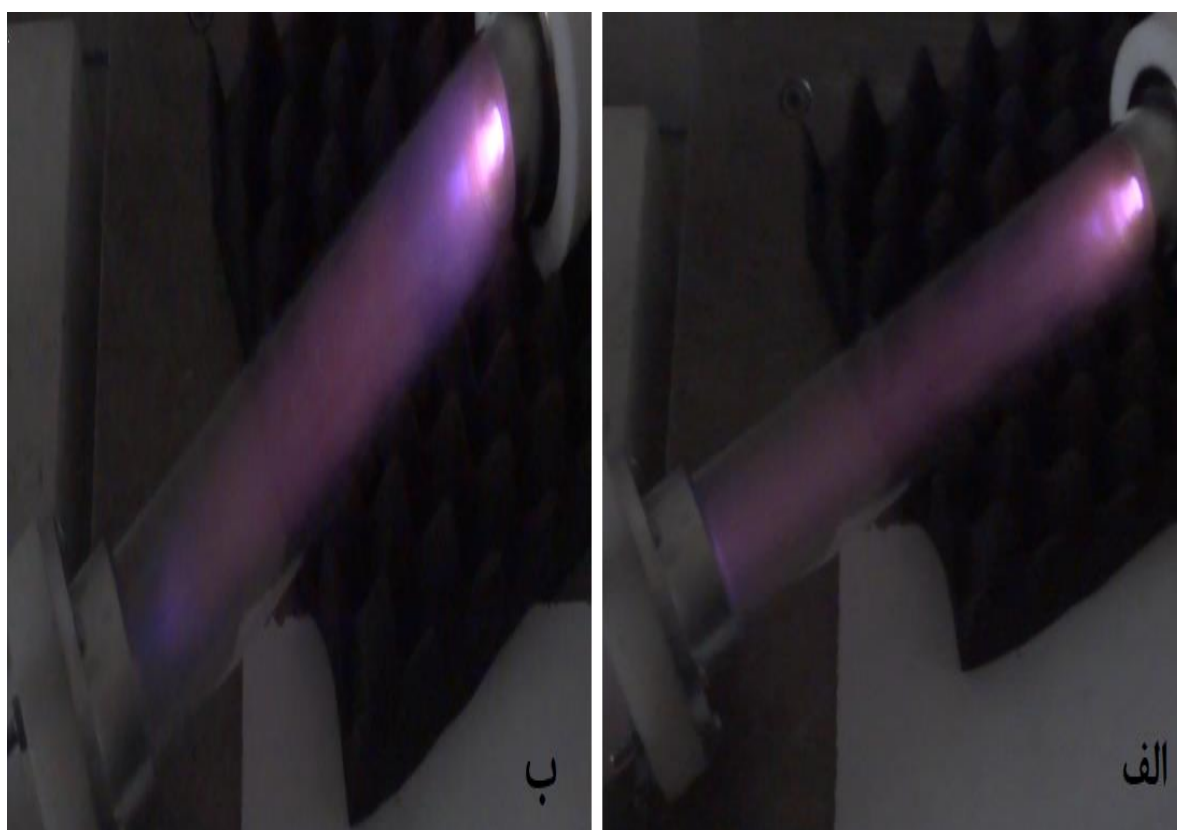
شکل ۵-۹ نمودار جریان تخلیه بر حسب فشار

۴-۶-۵ اندازه‌گیری جریان یون استخراج شده بر حسب فشار و ولتاژ آند برای دو

مدل آنتی کاتد

به منظور استخراج باریکه و برخورد با فنجان فارادی ولتاژ ۳۰۰ ولت بر روی فلنج انتهای لوله شیشه‌ای اعمال شده است. در شکل ۵-۱۰ تاثیر ولتاژ اعمال شده به فلنج انتهای لوله شیشه‌ای بر باریکه یونی استخراج

شده نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه سازی شده برخورد باریکه به دیواره آنتی کاتد در مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) نسبت به مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای کمتر می‌باشد هدف بررسی و اندازه‌گیری جریان یون استخراج شده بر حسب فشار و ولتاژ به صورت تجربی می‌باشد.



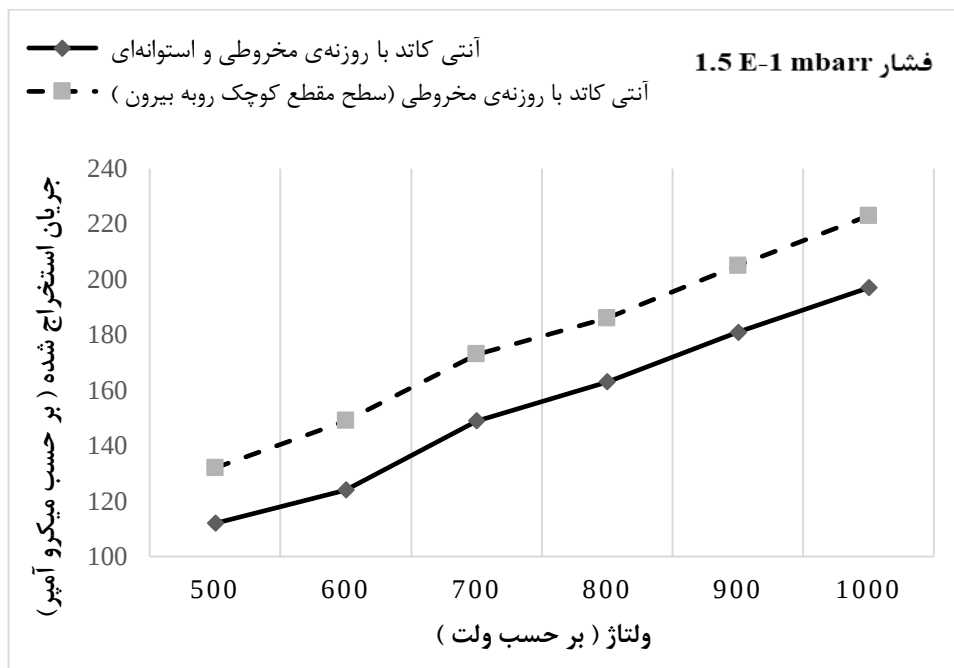
شکل ۵-۱۰ تاثیر ولتاژ اعمال شده به فلنج انتهایی لوله شیشه‌ای بر روی باریکه یونی استخراج شده (الف) ۳۰۰ ولت پتانسیل اعمال شده به فلنج (ب) پتانسیل اعمال نشده

شکل ۵-۱۱ جریان استخراج شده بر حسب فشار در ولتاژ ثابت ۷۰۰ ولت و شکل ۵-۱۲ جریان استخراج شده بر حسب ولتاژ در فشار ثابت $1.5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ برای چشمه‌ی یونی با دو مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) و مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی و استوانه‌ای در فاصله ۱۵۰ میلی‌متری از آنتی کاتد را نشان می‌دهد. مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) عملکرد بهتری نسبت به و مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی و استوانه‌ای دارد که با طراحی جدید باریکه یونی کمتری با دیواره داخلی آنتی کاتد برخورد می‌کند.



شکل ۵-۱۱ نمودار جریان استخراج شده بر حسب فشار در ولتاژ ۷۰۰ ولت برای مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح

مقطع کوچک روبه بیرون) و مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی و استوانه‌ای



شکل ۵-۱۲ نمودار جریان استخراج شده بر حسب ولتاژ در فشار $1.5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ برای مدل آنتی کاتد با روزنه‌ی

مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) و مدل آنتی کاتد با روزنه مخروطی و استوانه‌ای

۵-۷ نتیجه گیری

در این پایان نامه طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. برای بهینه‌سازی جریان استخراج و ولتاژ اشتعال چشمه یونی پنینگ استفاده از مدل آنتی کاتد و کاتد طراحی شده ضروری است. همچنین این چشمه به دلیل طراحی جدید و استفاده نکردن از چسب قابلیت تعویض تمام قطعات و نصب بر روی سیستم استخراج و شتابدهنده را داد. همچنین اندازه‌گیری جریان تخلیه، جریان استخراج، فشار و ولتاژ اشتعال چشمه یونی پنینگ مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده چشمه یونی پنینگ با کاتد سه پله‌ای و مخروطی و آنتی کاتد با روزنه‌ی مخروطی (سطح مقطع کوچک روبه بیرون) ولتاژ اشتعال کاهش و جریان استخراج افزایش می‌یابد.

۵-۸ پیشنهادات

برای تکمیل مطالعات صورت گرفته در این پایان نامه انجام موارد زیر پیشنهاد می گردد:

- ۱- آزمایش و اندازه گیری پارامترهای مختلف باریکه برای گازهای مختلف
- ۲- ساخت کاتد ساده و استفاده در چشمه به منظور مقایسه با کاتد سه پله ای و مخروطی
- ۳- نصب چشمه یونی پنینگ ساخت شده بر روی سیستم استخراج طراحی شده توسط خانم فتحی
- ۴- آزمایش و اندازه گیری پارامترهای مختلف باریکه چشمه ی یونی نصب شده بر روی سیستم

استخراج

مراجع

- [۱] I. G. Brown, (2004) "*The physics and technology of ion sources*", John Wiley & Sons, pp.8-17
- [۲] Chen. F.F, (1984) "*Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*" Plenum. Volume 1, New York, pp.1-8
- [۳] Jones, Roger M. (2009) "Wakefield suppression in high gradient linacs for lepton linear colliders." *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams* 12, no. 10.
- [۴] Bernhard Wolf, (1995) "*Handbook of ion sources*", CRC Press, pp.4-7
- [۵] R. Hellborg, (2005) "*electrostatic accelerators fundamentals and applications*" springer
- [۶] A. Fridman and L.A. Kennedy, (2004) "*Plasma Physics and Engineering*" Taylor and Francis, New York, pp.6-8
- [۷] Çınar, Kamil, (2011) "Design and construction of a microwave plasma ion source." *arXiv preprint arXiv:1103.1751*
- [۸] Mitsuharu Konuma. (1992) "*Film deposition by plasma techniques*", Vol. 10. Springer Verlag,
- [۹] Huashun Zhang, (1999) "*Ion Sources*", Springer, Berlin
- [۱۰] Faircloth, D. C. (2014). "Negative Ion Sources: Magnetron and Penning." *arXiv preprint arXiv:1404.0944*
- [۱۱] Das, B. K., R. Das, and A. Shyam. (2011) "Study of Compact Penning Ion Source for Material Studies." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 1349, no. 1, pp. 447-448. American Institute of Physics,
- [۱۲] Fathi, A., S. A. H. Fegghi, S. M. Sadati, and E. Ebrahimibasabi. (2017) "Magnetic field design for a Penning ion source for a 200 keV electrostatic accelerator." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 850 pp 1-6.
- [۱۳] عسگریور م، (۱۳۹۱) ، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهینه‌سازی جریان باریکه شتاب‌دهنده الکترواستاتیک ۲۰۰kV"، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[۱۴] قادری ر، یاری زاده ق، (۱۳۹۰)، آشنایی با شتابدهنده ذرات و کاربردهای آنها، ویرایش اول، انتشارات حدیث مهتاب، بابل

[۱۵] قره‌داغی بیاتی ن، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "مطالعه و بررسی عمق نفوذ یون نیتروژن در استیل ضد زنگ صنعتی و تعریف مدل با در نظر گرفتن تمامی اثرات سطحی" پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

[۱۶] Kiyotaka Wasa and Shigeru Hayakawa, (1993), 'Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Applications' NOYES PUBLICATIONS

[۱۷] مسلمی پورکانی م، ابراهیمی بسابی ا، سوهانی م، (۱۳۹۶)، "بررسی چیدمان‌های آهنربای دائمی در چشمه‌ی یونی پنینگ" سومین کنفرانس ملی شتابگرهای ذرات و کاربرد آن، دانشگاه صنعتی اصفهان ص ۲۵۰ تا ۲۵۳

[۱۸] فتحی ع، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ کاتد سرد" دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[۱۹] Miyamoto, N., Y. Demura, S. Imakita, T. Kasuya, M. R. Vasquez Jr, and M. Wada. (2011) "Development of a Compact Ion Source with a Hot Hollow Cathode." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 1321, no. 1, pp. 448-451. American Institute of Physics,

[۲۰] Das, Basanta Kumar, and Anurag Shyam. (2008) "Development of compact size penning ion source for compact neutron generator." *Review of Scientific Instruments* 79, no. 12 : 123305

[۲۱] Yeon, Y. H., M. Ghergherehchi, K. M. Gad, X. J. Mu, S. Y. Oh, Y. S. Lee, H. W. Kim et al. (2013) "Development Study of Penning Ion Source for Compact 9 MeV Cyclotron." *Science and Technology*, p.0925001.

[۲۲] Leimbach, David. (2011), PhD. Thesis, "Negative Ion Source Development and Photodetachment Studies at ISOLDE.", U. Gothenburg (main).

[୧୩] Rovey, Joshua L. (2008) "Design parameter investigation of a cold-cathode Penning ion source for general laboratory applications." *Plasma Sources Science and Technology* 17, no. 3. P.035009.

[୧୪] Rovey, Joshua L., Brandon P. Ruzic, and Thomas J. Houlahan. (2007) "Simple Penning ion source for laboratory research and development applications." *Review of Scientific Instruments* 78, no. 10: 106101.

[୧୫] Sy, A., Q. Ji, A. Persaud, O. Waldmann, and T. Schenkel. (2012) "Novel methods for improvement of a Penning ion source for neutron generator applications." *Review of Scientific Instruments* 83, no. 2. P.02B309.

[୧୬] Hamme, Frank, Ulrich Becker, and Peter Hammes. (2006) "Simulation of secondary electron emission with CST PARTICLE STUDIO™." In *Proc. ICAP*, pp. 160-163.

[୧୭] CST STUDIO SUITE manual, (2015)

[୧୮] CST PARTICLE SUITE manual, (2015)

[୧୯] Cun, Huanyao, Annina Spescha, Adrian Schuler, Matthias Hengsberger, Jürg Osterwalder, and Thomas Greber. (2016) "Characterization of a cold cathode Penning ion source for the implantation of noble gases beneath 2D monolayers on metals: Ions and neutrals." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 34, no. 2 p.020602.

[୨୦] He, W., H. W. Zhao, Zh W. Liu, H. Y. Zhao, Y. Cao, Z. M. Zhang, L. T. Sun et al. (2006) "Development of external electron-beam enhancement of the Penning ionization gauge ion source." *Review of scientific instruments* 77, no. 3 p.03A330.

[୨୧] Yeon, Y. H., M. Ghergherehchi, K. M. Gad, X. J. Mu, S. Y. Oh, Y. S. Lee, H. W. Kim et al. (2013) "Development Study of Penning Ion Source for Compact 9 MeV Cyclotron." *Science and Technology* 2012 p.0925001.

[୨୨] Jidong, L. O. N. G., Y. A. N. G. Zhen, D. O. N. G. Pan, H. E. Xiaozhong, and Z. H. A. N. G. Kaizhi. (2013) "Study on a cold-cathode H-PIG-type ion source." 《核技术》(英文版) 24, no. 4 p.40201-040201.

[۳۳] Grasso, D., Francesco Califano, Francesco Pegoraro, and F. Porcelli. (2000) "Ion Larmor radius effects in collisionless reconnection." *Plasma Physics Reports* 26, no. 6 p.512-518.

[۳۴] Schenkel, Thomas, Qing Ji, Arun Persaud, and Amy V. Sy. (2016) "Advanced penning ion source." U.S. Patent 9,484,176, issued November 1

[۳۵] Xiao, Kunxiang, Minggui Zhou, and Xiaohua Tan. (2004) "The design and capability test of miniature Penning ion source." In *IVESC 2004. The 5th International Vacuum Electron Sources Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04EX839)*, pp. 375-377. IEEE,

[۳۶] Sy, A. (2013). PhD. Thesis, "Advanced Penning-type ion source development and passive beam focusing techniques for an associated particle imaging neutron generator", UC Berkeley.

[۳۷] Rohwer, P., H. Baumann, W. Schütze, and K. Bethge. (1983) "Studies of the center potential in a penning discharge." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 211, no. 2-3: 543-546.

[۳۸] M. Nastasi, J.W. Mayer, (2006) "*Ion Implantation and Synthesis of Material*", Springer, Berlin Heidelberg, New York.

[۳۹] Radwan, Samah I., H. El-Khabeary, and A. G. Helal. (2018) "Improvement of extracted ion beam from cold cathode Penning ion source." *Radiation Physics and Chemistry* 144. p.351-355

[۴۰] ابراهیمی بسابی ا، (۱۳۹۴) ، رساله دکتری: " طراحی و ساخت فارادی کاب آرایه‌ای برای تشخیص

پروفایل باریکه در شتاب دهنده " دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[۴۱] Forck, Peter. (2011) "Lecture notes on beam instrumentation and diagnostics." *Joint Universities Accelerator School (JUAS 2010)*, <http://www-bd.gsi.de>

[۴۲] مسلمی پورکانی م، (۱۳۹۶) ، پایان نامه کارشناسی ارشد: " طراحی و شبیه‌سازی عوامل موثر بر

خروجی یک چشمه یونی پنینگ " دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود

Abstract

There are different types of ion source, one of the most important of which is Penning ion source. Due to the simplicity of design and operation, small size and low power consumption, Penning ion source have many applications in various fields such as particle accelerator, ion implantation and sputtering. In this thesis, the design, simulation and construction of cold cathode Penning ion source with axial extraction is described. First, the physical principles, structure and operation of this ion source are described. Based on the simulations results by CST software, the appropriate model is selected and the design and construction steps of this source are described. Ignition voltage and current extracted with changes in cathode geometry and ion source anticathode are the most important practical results obtained. Experimental results show that with the new design of the cathode and anticathode, the ignition voltage is reduced and the extracted current is increased.

Keywords: Plasma, Penning ion source, CST simulation, Ignition voltage, Extraction current



Shahrood University of
Technology

Faculty of Physics and Nuclear Engineering
M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

Design and Construction of a Penning Ion Source

By: Mazhar Fathi

Supervisor:

Dr. Ehsan Ebrahimibasabi

Advisor:

Dr. Seyyed Mostafa Sadati

February, 2021