

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

طراحی و ساخت سیستم استخراج باریکه یونی یک چشمه یونی پنینگ

نگارنده:

ندا فتحی امین

استاد راهنما

دکتر احسان ابراهیمی بسابی

استاد مشاور

دکتر سید مصطفی ساداتی

مهرماه ۱۴۰۰

شکر و قدردانی

حمد و ثنای خدای تعالی را که به فضلش آدمی را اندیشه و عمل عطا فرمود تا بجاود و بداند و از علم و آگاهیش چراغی برافروزد و هستی خویش را روشنی بخشد، خدای را شاکرم که به من فرصتی داد تا بخشی از زندگیم را با انسانهای فرهیخته و دانشمند سپری کنم و گامی در راستای اعتلای علم و ایران عزیز بردارم.

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

در ابتدا به محضر پدر و مادرم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یابوری و دلسو و خداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

برادر و همراه همیشگی و پشتیبانی زندگی من که مشوقم در امر پژوهش بودند.

همسر عزیزم به خاطر همه ی تلاش های محبت آمیزی که در فراز و نشیب این مسیر انجام داد و همواره یار و پشتیبانم بود که بدون وجود او طی این مسیر رویایی من نبود.

سپاس همواره زینده اوست که در آدمی میل به آموختن نهاد و پس سپاس شایسته نام آنان است که در لباسی از تار و پود علم به من آموختند چگونه اندیشه کنم. سر تواضع بر آستان استادان که راتقید که من را در این راه یاری کردند فرو می آورم و صمیمانه مراتب امتنان خود را به آنان تقدیم می دارم.

استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر احسان ابراهیمی بابایی، که با هدایت علمی خویش راهنمایی این پایان نامه را به عهده گرفتند، همچنین، استاذ بزرگوار، جناب آقای دکتر سید مصطفی ساداتی که با صبوری و دلسوزی مشاوره پایان نامه حاضر را به عهده گرفتند.

از داوران محترم این پایان نامه جناب آقای دکتر توکلی و جناب آقای دکتر سولمائی که عهده دار داوری پژوهش بودند کمال شکر را دارم.

توفیق روز افزون بزرگواران را از نگاه این دوستان مسالت دارم و خالصانه از تمامی استادان، معلمان و مدرسانی که در مباحث مختلف تحصیلی به من علم آموختند و مرا از سرچشمه دانایی سیراب کرده اند تشکر کنم.

تهدیه نامه

اینجانب ندا فتحی امین دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی و ساخت سیستم استخراج باریکه یونی یک 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 .

مهر ۱۴۰۰

ندا فتحی امین امضای دانشجو

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 است. در این پروژه هدف ما انتخاب هندسه مناسب سیستم استخراج یون است که بتواند باریکه‌ای با بیشترین جریان را از آن بدست آورد و رسیدن به این مقصود خود مستلزم طراحی و شبیه سازی و در نهایت ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ است. در این پایان نامه طراحی، شبیه سازی و ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ کاتد سرد با استخراج محوری توضیح داده شده است. ابتدا اصول فیزیکی، ساختار و عملکرد سیستم استخراج مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه بر اساس شبیه سازی‌های انجام شده توسط نرم افزار CST مدل مناسب انتخاب و مراحل طراحی و ساخت سیستم استخراج تشریح شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد، با طراحی جدید الکتروود استخراج و کندکننده، جریان استخراج شده، افزایش یافته است.

کلمات کلیدی : چشمه یونی پنینگ، سیستم استخراج، برنامه شبیه‌سازی CST، هندسه الکتروود، جریان استخراج

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- فتحی امین، ن. ابراهیمی بسابی، ا. ساداتی، س. فتحی، م. (۱۴۰۰)، "طراحی و شبیه سازی سیستم

استخراج چشمه یونی پنینگ" هشتمین کنفرانس مهندسی و فیزیک پلاسما، مازندران، ارائه به صورت

پوستر

فهرست مطالب

فصل اول: سیستم استخراج و اپتیک باریکه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ اپتیک باریکه	۲
۱-۳ مقایسه اپتیک نوری و اپتیک باریکه	۲
۱-۴ بار فضایی	۴
۱-۵ تشکیل باریکه یونی در سیستم استخراج	۶
۱-۶ قانون چایلد لنگمویر	۷
۱-۷ هلال پلاسما	۱۰
۱-۸ شدت نشر و میزان روشنایی	۱۲
۱-۹ سیستم متمرکزسازی در انتقال باریکه	۱۴
۱-۹-۱ عدسی‌های الکترواستاتیک	۱۷
۱-۹-۱-۱ عدسی‌های غوطه‌ور	۱۸
۱-۹-۱-۲ عدسی‌های اینزل	۲۲
۱-۹-۱-۳ عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیک	۲۵
۱-۹-۲ عدسی‌های مغناطیسی	۲۷
۱-۹-۲-۱ عدسی‌های سلونوئید	۲۷
۱-۹-۲-۲ عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی	۲۹
فصل دوم: سیستم استخراج و انتقال باریکه چشمه یونی پنینگ	۳۱
۲-۱ مقدمه	۳۲
۲-۲ سیستم استخراج باریکه	۳۳
۲-۳ ابیراهی کروی	۳۵

۳۶.....	۲-۴ ابیراهی رنگی
۳۷.....	۲-۵ ساختار سیستم استخراج
۳۸.....	۲-۶ هندسه الکترودها
۴۱.....	۲-۷ مدل انتخابی برای ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ
۴۳.....	۲-۸ نتیجه گیری
۴۵.....	فصل سوم: شبیه سازی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ
۴۶.....	۳-۱ مقدمه
۴۷.....	۳-۲ شبیه سازی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ
۴۸.....	۳-۲-۱ شبیه سازی الکترودها استخراج
۵۳.....	۳-۲-۱-۱ مدل انتخابی برای طراحی الکترودها استخراج
۶۱.....	۳-۲-۲ شبیه سازی الکترودها کندکننده
۷۴.....	۳-۲-۳ شبیه سازی الکترودها شتابدهنده
۸۱.....	۳-۳ نتیجه گیری
۸۳.....	فصل چهارم: مدلسازی و ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ
۸۴.....	۴-۱ مقدمه
۸۴.....	۴-۲ مدلسازی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ
۸۶.....	۴-۲-۱ مدلسازی و ساخت الکترودها استخراج
۸۷.....	۴-۲-۲ مدلسازی و ساخت الکترودها کندکننده
۸۹.....	۴-۲-۳ مدلسازی و ساخت الکترودها شتابدهنده
۹۰.....	۴-۲-۴ مدلسازی و ساخت عایق های بین الکترودها
۹۳.....	۴-۲-۵ قطعه تفلونی T شکل و فنجان فارادی
۹۴.....	۴-۲-۵-۱ فنجان فارادی
۹۵.....	فصل پنجم : آزمایش و اندازه گیری

۵-۱	مقدمه	۹۶
۵-۲	چشمه یونی پنینگ	۹۶
۵-۳	تمیزکاری قطعات	۹۷
۵-۴	سرهم کردن قطعات	۹۷
۵-۵	آزمایش خلأ	۱۰۰
۵-۶	روشن کردن چشمه یونی پنینگ	۱۰۲
۵-۷	اعمال ولتاژ به الکترودهای سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ	۱۰۷
۵-۸	آزمایش و اندازه گیری	۱۰۹
۵-۸-۱	اندازه گیری شدت جریان استخراج در ولتاژهای مختلف	۱۰۹
۹-۵	نتیجه گیری	۱۱۲
۱۰-۵	پیشنهادهات	۱۱۳
	مراجع	۱۱۴

فهرست جداول

جدول ۱-۳ نتایج الکترودهای استخراج مختلف شبیه سازی شده در نرم افزار CST ۵۷

جدول ۲-۳ نتایج بررسی پتانسیل های اعمالی به الکترودها ۷۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ فرآیند جبران اثر بار فضایی ۶
- شکل ۲-۱ تغییر پروینس باریکه با عدد جرمی برای گونه های یونی مختلف ۹
- شکل ۳-۱ سیستم استخراج دو الکترودی و نحوه تشکیل هلال پلاسما ۱۱
- شکل ۴-۱ شبیه سازی برای یک سیستم دو الکترودی باچگالی مختلف پلاسما ۱۱
- شکل ۵-۱ الگوهای شدت نشر شبیه سازی شده برای درجات مختلف همگرایی باریکه یونی ۱۳
- شکل ۶-۱ اصل کانونی کنندگی ۱۶
- شکل ۷-۱ عدسی غوطه‌ور برای افزایش سرعت ($V_2 > V_1$) و یا کاهش سرعت ($V_2 < V_1$) ۱۹
- شکل ۸-۱ مسیر ذرات در عدسی غوطه‌ور (الف) شتابدهنده و (ب) کند کننده ۲۱
- شکل ۹-۱ عدسی اینزل ساخته شده از سه الکتروود مسطح حلقه ای ۲۲
- شکل ۱۰-۱ وابستگی توان عدسی منفرد به پتانسیل الکتروود میانی V_L برای باریکه ای با انرژی eV_B ۲۳
- شکل ۱۱-۱ هندسه عدسی اینزل که الکتروود میانی در پتانسیل چشمه قرار دارد ۲۴
- شکل ۱۲-۱ هندسه مفید عدسی اینزل در حالت افزایش-کاهش شتاب ۲۵
- شکل ۱۳-۱ شکل عدسی چهارقطبی الکترواستاتیکی و نیروهای وارد بر یون‌های باردار مثبت در این میدان ۲۶
- شکل ۱۴-۱ (الف) خطوط هم‌پتانسیل و (ب) خطوط میدان در یک عدسی چهار قطبی الکترواستاتیکی ۲۶
- شکل ۱۵-۱ رفتار ذره در میدان سلونوئید، (الف) نیروی $qv \times B$ باعث چرخش محوری ذره در راستای میدان می‌شود. در نتیجه چرخش کل برابر است با $\Delta\theta \propto \int B_z dz$ ، (ب) نیروی $qv \times B$ الکترون‌ها را به سمت محور همگرا می‌کند ۲۸
- شکل ۱۶-۱ آرایش چهارقطبی مغناطیسی خاص، (الف) خطوط میدان، (ب) خطوط نیروی وارد بر ذره منفی ۲۹

- شکل ۱-۲ اثر ابیراهی کروی. باریکه‌هایی با زوایای بزرگ در نقاطی غیر از صفحه ایده‌آل تصویر به محور می‌رسند
۳۵.....
- شکل ۲-۲ زاویه پیرس در سیستم استخراج ۳۹
- شکل ۳-۲ شکل هندسی عدسی زوم الکترواستاتیک تریودی ۴۰
- شکل ۴-۲ عدسی دهانه‌ای تریودی..... ۴۰
- شکل ۱-۳ اجزای تشکیل دهنده سیستم استخراج به ترتیب الف) الکتروُد پلاسما ب) الکتروُد استخراج ج) الکتروُد کندکننده و د) الکتروُد شتاب دهنده ۴۸
- شکل ۲-۳ اتاقک یونش و سیستم استخراج (سمت راست) و برش مقطعی اتاقک یونش و سیستم (سمت چپ)
۴۸.....
- شکل ۳-۳ الکتروُد استخراج کننده استوانه ای (سمت راست) و برش مقطعی الکتروُد (سمت چپ) ۴۹
- شکل ۴-۳ نمودار انرژی باریکه استخراج شده بر حسب قطر خارجی الکتروُد استخراج ۵۰
- شکل ۵-۳ نمودار ارتفاع الکتروُد استخراج بر حسب شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ (خطوط بین نقاط برای هدایت چشم ۵۱
- شکل ۶-۳ نمودار فاصله بین آنتی کاتد و الکتروُد استخراج بر حسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm ۵۲
- شکل ۷-۳ نمودار فاصله بین آنتی کاتد و الکتروُد استخراج بر حسب شدت جریان برخوردی به الکتروُد استخراج ۵۲
- شکل ۸-۳ برش مقطعی الکتروُد استخراج مخروطی الف) روزنه الکتروُد به سمت آنتی کاتد، ب) روزنه الکتروُد به سمت فارادی کاپ ۵۳
- شکل ۹-۳ برش مقطعی الکتروُد استخراج استوانه ای با روزنه مخروطی، الف) روزنه به سمت فارادی کاپ، ب) روزنه به سمت آنتی کاتد ۵۳
- شکل ۱۰-۳ برش مقطعی الکتروُد استخراج استوانه‌ای مخروطی، الف) ارتفاع استوانه ۷ mm، ب) ارتفاع استوانه ۱۰ mm ۵۴

- شکل ۳-۱۱ برش مقطعی الکتروستخراج مخروطی استوانه‌ای، الف) ارتفاع استوانه ۲۰ mm، ب) ارتفاع استوانه ۱۰ mm ۵۴
- شکل ۳-۱۲ برش مقطعی الکتروستخراج استوانه‌ای با روزنه استوانه‌ای مخروطی ۵۵
- شکل ۳-۱۳ برش مقطعی الکتروستخراج استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار ۵۵
- شکل ۳-۱۴ خطوط هم‌پتانسیل الکترودهای استخراج شبیه سازی شده در نرم افزار CST، الف) الکتروستوانه‌ای ساده، ب) الکتروستوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار، پ) الکتروستوانه‌ای با روزنه استوانه‌ای مخروطی، ت) و ث) الکترو روزنه مخروطی، ج و چ) الکتروستوانه‌ای مخروطی، ح و خ) الکتروستوانه‌ای و د و ذ) الکتروستوانه‌ای ۵۶
- شکل ۳-۱۵ نمودار شدت جریان برخوردی به الکتروستخراج برحسب نوع الکتروستخراج شبیه سازی شده ۵۸
- شکل ۳-۱۶ نمودار شعاع باریکه برحسب نوع الکتروستخراج شبیه سازی شده ۵۸
- شکل ۳-۱۷ نمودار پتانسیل الکتروستخراج برحسب شعاع و انرژی باریکه ۶۰
- شکل ۳-۱۸ نمودار فاصله بین دو روزنه الکتروستخراج و الکتروکندکننده مخروطی برحسب شدت جریان برخوردی به FC ۶۱
- شکل ۳-۱۹ نمودار قطر روزنه الکتروکندکننده مخروطی برحسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm ۶۲
- شکل ۳-۲۰ نمودار قطر روزنه الکتروکندکننده مخروطی برحسب شدت جریان برخوردی به FC ۶۳
- شکل ۳-۲۱ نمودار ارتفاع استوانه الکتروستوانه‌ای برحسب شدت جریان برخوردی به FC ۶۴
- شکل ۳-۲۲ نمودار ارتفاع استوانه الکتروستوانه‌ای برحسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm ۶۴
- شکل ۳-۲۳ برش مقطعی الکتروکندکننده مخروطی استوانه‌ای با پله‌های محدب ۶۶
- شکل ۳-۲۴ نمودار مدل الکتروستوانه‌ای با پله‌های محدب برحسب شدت جریان برخوردی به FC و شعاع باریکه ۶۶

- شکل ۳-۲۵ الکتروند مخروطی استوانه‌ای با پله محدب، الف) الکتروند کندکننده سه پله ای که باریکه بدون برخورد به پله‌ها از آن خارج می‌شود، ب) الکتروند کندکننده چهار پله ای که باریکه به پله چهارم برخورد می‌کند و از آن خارج می‌شود ۶۷
- شکل ۳-۲۶ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای محدب با شعاع قوس $3/74 \text{ mm}$ ۶۸
- شکل ۳-۲۷ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای محدب با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ ۶۸
- شکل ۳-۲۸ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ و طول 3 mm ۶۹
- شکل ۳-۲۹ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ و طول 7 mm ۶۹
- شکل ۳-۳۰ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای قیفی شکل ۷۰
- شکل ۳-۳۱ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای تک پله ۷۰
- شکل ۳-۳۲ برش مقطعی الکتروند مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ و طول 7 mm تک پله‌ای ۷۰
- شکل ۳-۳۳ نمودار شدت جریان برخوردی به FC برحسب نوع الکتروند کندکننده شبیه سازی شده ۷۱
- شکل ۳-۳۴ نمودار شعاع باریکه برحسب نوع الکتروند کندکننده شبیه سازی شده ۷۱
- شکل ۳-۳۵ سطوح هم‌پتانسیل الکتروندهای کندکننده شبیه سازی شده در نرم افزار CST، الف) دوکوهانی با طول 3 mm ، ب) قیفی شکل، پ) محدب با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ ، ت و ث) سه پله و دو پله محدب، ج) دوکوهانی با طول 7 mm ، چ) دو پله ای (ح و خ) چهار و یک پله محدب، د، ذ و ر) یک، چهار و سه پله ای، ز) استوانه‌ای ساده، ژ) محدب با شعاع قوس $3/74 \text{ mm}$ ، س) مخروطی استوانه‌ای دوکوهانی تک پله‌ای و (ش) مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای ۷۳
- شکل ۳-۳۶ نمودار میدان الکتریکی بر حسب طول محور استخراج الکتروند کندکننده ۷۴
- شکل ۳-۳۷ نمودار قطر روزنه الکتروند شتابدهنده برحسب شعاع باریکه ۷۵
- شکل ۳-۳۸ نمودار قطر روزنه الکتروند شتابدهنده برحسب شدت جریان برخوردی به FC ۷۵

- شکل ۳-۳۹ نمودار ارتفاع استوانه الکتروود شتابدهنده استوانه‌ای بر حسب شعاع باریکه ۷۶
- شکل ۳-۴۰ نمودار ارتفاع استوانه الکتروود شتابدهنده استوانه‌ای بر حسب شدت جریان برخوردی به FC ۷۷
- شکل ۳-۴۱ برش مقطعی از سیستم استخراج شبیه سازی شده چشمه یونی پنینگ ۷۷
- شکل ۳-۴۲ پتانسیل اعمالی به الکتروودها بر حسب شعاع و انرژی باریکه ۷۹
- شکل ۳-۴۳ پتانسیل اعمالی به الکتروودها بر حسب شدت جریان برخوردی به FC ۷۹
- شکل ۳-۴۴ خطوط هم پتانسیل الکتروودهای شبیه سازی شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ ۸۰
- شکل ۳-۴۵ شکل باریکه نهایی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده ۸۰
- شکل ۴-۱ (الف) طرح اتاقک یونش و سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ مدلسازی شده برای ساخت، (ب) برش مقطعی از طرح اتاقک یونش و سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ مدلسازی شده برای ساخت، (۱) مجموعه اتاقک یونش، (۲) الکتروود استخراج کننده، (۳) عایق بین الکتروود استخراج و الکتروود کندکننده، (۴) الکتروود کندکننده، (۵) عایق بین الکتروود کندکننده و الکتروود شتابدهنده، (۶) الکتروود شتابدهنده ۸۵
- شکل ۴-۲ طرح الکتروود استخراج (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د) ۸۶
- شکل ۴-۳ طرح الکتروود کندکننده استوانه‌ای تک پله‌ای (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د) ۸۸
- شکل ۴-۴ طرح الکتروود کندکننده استوانه‌ای دوکوهانی تک پله‌ای (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د) ۸۸
- شکل ۴-۵ طرح الکتروود شتابدهنده (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د) ۸۹
- شکل ۴-۶ طرح عایق بین الکتروود استخراج (الف-ج) و الکتروود کندکننده و نمونه ساخته شده (د) ۹۱
- شکل ۴-۷ طرح عایق بین الکتروود کندکننده و الکتروود شتابدهنده (الف-ب) و نمونه ساخته شده (د) ۹۱

- شکل ۴-۸ قطعات اصلی ساخته شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ به صورت مجزا از یکدیگر ۱- الکتروود استخراج چسب شده به لوله شیشه‌ای پیرکس ۲- عایق بین الکتروودهای استخراج و کندکننده ۳- الکتروود کندکننده ۴- عایق بین الکتروودهای کندکننده و شتابدهنده ۴- الکتروود شتابدهنده ۹۲
- شکل ۴-۹ قطعات اصلی ساخته شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ به صورت سرهم شده ۹۳
- شکل ۴-۱۰ قطعه تفلونی T شکل ۹۴
- شکل ۴-۱۱ فنجان فارادی ۹۴
- شکل ۵-۱ مجموعه اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ، (۱) اتاقک یونش قرار گرفته در پوسته نگهدارنده، (۲) لوله شیشه‌ای پیرکس، (۳) فلنج انتهای لوله شیشه‌ای و (۴) فلنج ابتدای لوله شیشه‌ای ۹۶
- شکل ۵-۲ لوله شیشه‌ای پیرکس چسب شده به الکتروود استخراج کننده ۹۷
- شکل ۵-۳ نحوه قرارگیری اورینگ در داخل شیار الکتروودها که به عنوان مثال در این شکل، اورینگ در شیار الکتروود شتابدهنده نشان داده شده است ۹۸
- شکل ۵-۴ محفظه تزریق گاز (۱) و شیر نشتی متصل شده به لوله تزریق گاز (۲) ۹۹
- شکل ۵-۵ شکل نهایی قطعات سرهم شده مجموعه اتاقک یونش و سیستم استخراج و اتصالات مربوط به محفظه تزریق گاز ۱۰۰
- شکل ۵-۶ فشار خلأ به دست آمده توسط پمپ توربو ۱۰۲
- شکل ۵-۷ فشار خلأ به دست آمده توسط پمپ روتاری ۱۰۲
- شکل ۵-۸ روشن شدن چشمه یونی پنینگ بدون اعمال ولتاژ به الکتروودهای استخراج ۱۰۳
- شکل ۵-۹ تأثیرات فشار بر حسب شدت جریان تخلیه در ولتاژ ثابت ۱ کیلو ولت ۱۰۵
- شکل ۵-۱۰ تأثیرات ولتاژ بر حسب شدت جریان تخلیه در فشار ثابت 8×10^{-2} mbar در آزمایش اول ۱۰۶
- شکل ۵-۱۱ تأثیرات ولتاژ بر حسب شدت جریان تخلیه در فشار ثابت 8×10^{-2} mbar در آزمایش دوم ۱۰۶

- شکل ۵-۱۲ مقسم ولتاژ متصل شده به منبع تغذیه جریان بالای ۱۰۰ کیلو ولت ۱۰۷
- شکل ۵-۱۳ اتصالات الکترونیکی به مجموعه سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ، (الف) سوسماری سفید اتصال الکتریکی الکتروود استخراج، (ب) سوسماری قرمز اتصال الکتریکی الکتروود کندکننده، (ج) سوسماری مشکی اتصال الکتریکی الکتروود شتابدهند ۱۰۸
- شکل ۵-۱۴ مدار الکترونیکی متصل شده به مجموعه چشمه یونی پنینگ ۱۰۸
- شکل ۵-۱۵ تأثیر ولتاژهای مختلف الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای برحسب شدت جریان استخراج ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶ تأثیر ولتاژ الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای برحسب شدت جریان استخراج ۱۱۰
- شکل ۵-۱۷ تأثیرات ولتاژ الکتروود کندکننده برحسب شدت جریان استخراج برای دو مدل هندسه الکتروود کندکننده که ولتاژ الکتروود استخراج ۱۴۰۰- ولت و ولتاژ الکتروود شتابدهنده ۳۷۰۰- ولت ۱۱۱
- شکل ۵-۱۸ تأثیر ولتاژ اتاقک یونش برحسب شدت جریان استخراج شده در حضور سیستم استخراج و بدون آن ۱۱۲

فصل اول: سیستم استخراج واپتیک باریک

۱-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا توضیح مختصری در مورد اپتیک باریکه یونی و تفاوت‌ها و شباهت‌های اپتیک نوری با اپتیک ذرات باردار و تأثیر بار فضایی در اپتیک باریکه و روش‌های جبران این اثر داده می‌شود. سپس نحوه‌ی تشکیل باریکه در سیستم استخراج و برخی از قوانین فیزیکی موثر در آن، به طور مختصر ذکر می‌شود. در ادامه برای آشنایی با انواع مختلف سیستم‌های متمرکزسازی باریکه، آنها را به دو بخش عدسی‌های الکترواستاتیکی و مغناطیسی تقسیم بندی کرده و به بررسی عملکرد چند نمونه از هر کدام از آنها می‌پردازیم و در نهایت این فصل با مقایسه این عدسی‌ها پایان خواهد پذیرفت.

۱-۲ اپتیک باریکه

برای چندین دهه، فیزیکدانان از باریکه‌های یونی شتابدهنده‌ها برای تحقیق در مورد فرآیندهای فیزیک هسته‌ای، اتمی و ذرات استفاده می‌کنند. علاوه بر این بسیاری از علوم دیگر نظیر زیست شناسی، شیمی، مهندسی، پزشکی و غیره از باریکه‌های یونی یا الکترونی برای بررسی و درک جنبه‌های پدیدارشناختی بهره می‌برند. هدف کلی در اپتیک باریکه، هدایت ذرات باردار از یک نقطه به نقطه دیگر در امتداد مسیر دلخواه به واسطه‌ی مجموعه‌ای از مغناطیس‌های منحرف کننده و متمرکز کننده می‌باشد [۱-۳].

۱-۳ مقایسه اپتیک نوری و اپتیک باریکه

از تفاوت‌های اصلی میان اپتیک نوری و اپتیک باریکه، می‌توان به باردار بودن ذرات در اپتیک باریکه اشاره کرد. ذرات باردار نقش پرتوهای نور و الکتروادهای فلزی یا به عبارتی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از آنها نقش عدسی‌های نوری را ایفا می‌کنند. تفاوت‌های بسیار مهمی میان این دو بحث وجود دارد، ما در اینجا این تفاوت‌ها را در شرایط بدون بار فضایی و با حضور بار فضایی در ادامه بررسی بیان می‌کنیم.

در مواردی که چگالی جریان و بار ذرات کم باشد، می‌توان از اپتیکی مشابه با اپتیک نوری بهره گرفت، در غیر این صورت باید تاثیرات چگالی جریان و بار ذرات نیز در نظر گرفته شود. در اپتیک نور، مرز عدسی کاملاً مشخص است و می‌توان مکان صفحات اصلی و مرجع و ضرایب شکست را برای هر محیط به‌طور دقیق مشخص کرد. مسیر حرکت نور پس از ورود به عدسی تغییر می‌کند و در تمام مسیر خود در هر محیط با یک ضریب شکست ثابت و در راستای مستقیم حرکت می‌کند، ولی در اپتیک ذرات باردار گسترش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تا فاصله بینهایت ادامه دارد و میدان و نیروی ناشی از آن به نسبت $\frac{1}{r^2}$ کاهش می‌یابد و لذا مرز مشخصی برای عدسی‌های مغناطیسی و الکتریکی وجود نخواهد داشت. در حقیقت ذره در تمام فضا، حضور میدان و نیروی حاصل از آن را حس خواهد کرد، اما انرژی ذره و نیروی وارد بر آن نیز در تغییر مسیر ذره تأثیرگذار است. در هنگام عبور ذره از میان صفحات هم‌پتانسیل یک میدان، ذره با عبور از هر صفحه نیروی جدیدی را احساس می‌کند و از آنجایی که این صفحات در یک میدان به طور پیوسته قرار دارند، در نتیجه ذره به طور پیوسته نیرو را احساس خواهد کرد. اگر هر کدام از این صفحات هم‌پتانسیل را معادل با یک ضریب شکست در اپتیک نور در نظر بگیریم، در نتیجه ذره به طور پیوسته در حال تغییر مسیر و تغییر انرژی خواهد بود و در واقع مسیر حرکت ذره به صورت منحنی خواهد بود. اما در اپتیک ذرات باردار نیز زمانی که نیروی وارد بر ذرات مؤثر نبوده و ذرات مسیر مستقیمی را طی می‌کنند، می‌توان برای عدسی‌های الکتریکی و مغناطیسی مرزی فرضی در نظر گرفت. المان‌های اصلی در هر دو اپتیک نوری و باریکه عبارت‌اند از: نقاط کانونی، طول‌های کانونی، نقاط اصلی و صفحات اصلی. همانطور که گفتیم مسیر حرکت ذرات باردار منحنی شکل است و به همین دلیل پیدا کردن این مؤلفه در اپتیک باریکه پیچیده تر بوده و به دقت بیشتری نیاز است.

ذرات باردار، میدان الکتریکی و جریان حاصل از آن‌ها نیز میدان مغناطیسی در اطراف تولید می‌کند، در این صورت نیرویی که به ذرات وارد می‌شود برابر با مجموع نیروهای خارجی و نیروی خود ذرات باریکه است همچنین

برهمکنش میان ذرات باریکه (وجود بار فضایی)، عامل نامطلوبی است که باید به آن توجه شود. تأثیر بار فضایی و میدان‌های ناشی از ذرات باریکه در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف) اگر چگالی ذرات p و چگالی جریان j یکنواخت باشد، در این صورت p و j مستقل از مختصات عرضی هستند و به عبارتی یکنواخت بودن این دو پارامتر به این معنا است که میدان‌های خودی الکتریکی و مغناطیسی و نیروهای حاصل از آنها توابعی خطی از مختصات عرضی هستند. در انرژی‌های پایین که نیروهای خودی قابل مقایسه با نیروهای خارجی هستند، باریکه‌ها تمایل دارند چگالی یکنواخت داشته باشند.

ب) در باریکه‌های واقعی، چگالی بار و جریان یکنواخت نمی‌باشد و تابعی از r یا θ است [۲،۴].

۴-۱ بار فضایی

بار فضایی، بار الکتریکی تولید شده در یک ناحیه سه بعدی است. به عنوان مثال، در یک تفنگ الکترونی بار منفی حاصل می‌شود، زیرا الکترون‌هایی که از کاتد ساطع می‌شوند فوراً به سمت آند حرکت نمی‌کنند و بلکه برای حرکت به زمان محدود نیاز دارند. این الکترون‌ها ابرهایی را در اطراف کاتد تشکیل می‌دهند، ابرها به طور مداوم توسط الکترون‌هایی که به سمت آند حرکت می‌کنند، تخلیه می‌شوند و توسط الکترون‌های ساطع شده از سطح کاتد دوباره پر می‌شوند. این ابر الکترونی بار فضایی منفی ایجاد می‌کند. نمونه دیگری از بار فضایی هنگامی رخ می‌دهد که دو ماده نیمه هادی متفاوت با یکدیگر جمع می‌شوند. الکترون‌های یکی از مواد (اهدا کننده) به منظور ایجاد تعادل ترمودینامیکی به طور معمول به ماده دیگر (پذیرنده) مهاجرت می‌کند. اتم‌هایی که الکترون‌ها را از دست می‌دهند بار مثبت دارند و یک لایه بار فضایی مثبت را در اهدا کننده تشکیل می‌دهند. بار فضایی فقط در دی الکتریک (از جمله خلأ) رخ می‌دهد زیرا، در یک رسانا بار به سرعت خنثی می‌شود. بار فضایی می‌تواند مثبت یا منفی باشد و در بسیاری از دستگاه‌های الکترونیکی خلأ و حالت جامد یک پدیده مهم به حساب می‌آید.

بار فضایی سبب ایجاد میدان‌های الکتریکی می‌شود که ممکن است اپتیک باریکه را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. این میدان، نیروی F را بر روی یک ذره مورد آزمایش در شعاع r وارد می‌کند. نیروی بار فضایی به عنوان یک نیروی واگراکننده عمل می‌کند و باعث اتلاف انرژی باریکه می‌شود. دو فرآیند در جبران بار فضایی تأثیر گذار است:

۱. برخورد یون‌های باریکه اولیه با اتم‌های گاز باقی‌مانده

۲. کندوپاش

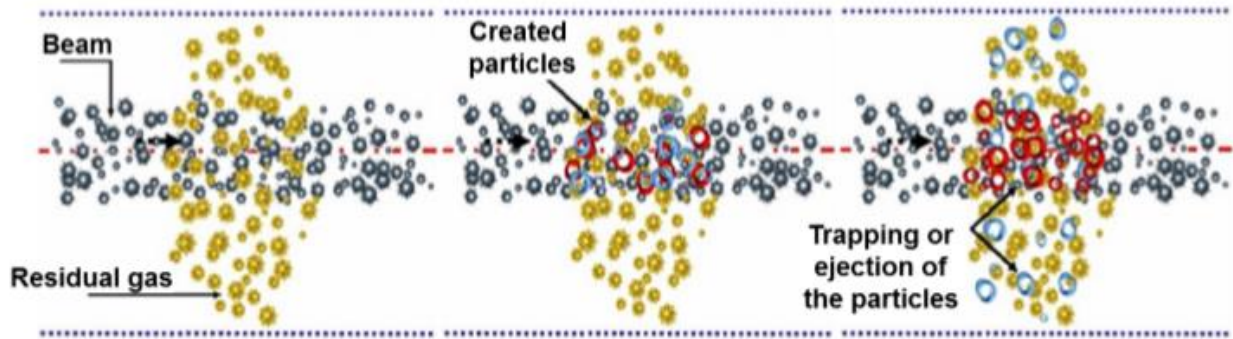
ذرات باردار باریکه در یک محفظه خلأ با انرژی E_0 با احتمال خاصی با اتم‌های گاز یا مولکول‌های باقی‌مانده برخورد می‌کنند. باتوجه به شرایط خاص برخورد، اتم گاز باقی‌مانده می‌تواند یونیزه شود (رابطه ۱-۱). در مورد باریکه مثبت اولیه، یون ثانویه توسط پتانسیل بار فضایی دفع می‌شود، در حالی که الکترون در آن به دام می‌افتد. اگر نشتی در این چاه پتانسیل وجود نداشته باشد، تا زمانی که تعادل بین پتانسیل بار فضایی و دمای الکترونی حاصل می‌شود، پتانسیل بار فضایی کاهش می‌یابد:

$$n_s = n_p \sigma n_{rg} \quad (1-1)$$

در اینجا، n_s تعداد یون‌های ثانویه ایجاد شده، n_p تعداد یون‌های اصلی و σ سطح مقطع یونیزاسیون ذرات موجود در گاز باقی‌مانده و n_{rg} تعداد اتم‌های گاز باقی‌مانده است. زمان لازم برای ایجاد الکترون‌های کافی برای جبران بار فضایی را می‌توان با استفاده از رابطه ۱-۲ تخمین زد:

$$\tau = \frac{1}{\sigma v n_{rg}} \quad (2-1)$$

که در آن v سرعت است. در این مدل فرض بر این است که تمام الکترون‌های تولید شده به دلیل قطبیت مثبت باریکه به دام می‌افتند. شکل ۱-۱ نشان دهنده نحوه انجام این فرآیند است.



شکل ۱-۱ فرآیند جبران اثر بار فضایی [۵]

به عنوان مثال باریکه پروتون را که از طریق گاز باقی مانده H_2 تکثیر می شود در نظر بگیرید، این امر باعث تولید جفت الکترون و H_2^+ توسط یونیزاسیون با توجه به واکنش زیر می شود:



الکترون ایجاد شده، توسط پتانسیل باریکه به دام می افتد و یون H_2^+ ایجاد شده نیز از باریکه پروتون خارج می شود. همانطور که گفته شد روش دیگر برای جبران اثر بار فضایی کندوپاش است. در این روش، اگر یون های باریکه اولیه به سطح فلز برخورد کنند (به عنوان مثال الکترو، لوله باریکه)، در این صورت ذرات ثانویه ایجاد می شوند. مجدداً برای تولید یون مثبت، الکترون ها در چاه پتانسیل بار فضایی به دام می افتند، در حالیکه ذرات مثبت دفع می شوند. سطح مقطع کندوپاش در مقایسه با سطح مقطع برای یونیزاسیون گاز باقی مانده بسیار زیاد است. این پدیده به انرژی ذرات و زاویه برخورد بستگی دارد [۵، ۱۱، ۲۱].

۵-۱ تشکیل باریکه یونی در سیستم استخراج

چشمه یونی در حقیقت یک سیستم تولید کننده پلاسما می باشد که تولید پلاسما را برپایه تخلیه الکتریکی انجام می دهد. این چشمه با اضافه کردن روزنه یا روزنه هایی در یک کاتد و یا در هر دو کاتد این اجازه را خواهد داد که یون ها از پلاسما استخراج و به ناحیه خلا انتقال داده شوند و به این ترتیب این چشمه پلاسما به یک چشمه یونی

تبدیل خواهد شد. یون‌ها با استفاده از اعمال گرادیان میدان الکتریکی بین سطح محفظه تخلیه که حاوی روزنه استخراج است، به راحتی از داخل پلاسما خارج می‌شوند که بطور کلی به آنها الکتروُد پلاسما و الکتروُد خارجی (الکتروُد استخراج کننده) گفته می‌شود و در مجموع به این سیستم الکتروُدی سیستم استخراج کننده گفته می‌شود. نام الکتروُد استخراج کننده اشاره بر این دارد که یون‌ها از پلاسما به وسیله این الکتروُد خارج می‌شوند و در آهنگ کاملاً غیر وابسته به ولتاژ سیستم استخراج، جریان پیدا می‌کنند و سپس توسط سیستم استخراج کننده شتاب می‌گیرند. در حقیقت یون‌ها در داخل پلاسما به صورت کاتوره ای حرکت می‌کنند و این حرکت تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که به طور اتفاقی به غلاف پلاسما برسند، در این صورت یون‌های مثبت با دیدن شیب پتانسیل به سمت بیرون چشمه یونی شتاب خواهند گرفت و الکترون‌ها نیز با دیدن این سد پتانسیل منعکس خواهند شد، مگر اینکه انرژی آن‌ها به صورتی باشد که توانایی غلبه بر این سد پتانسیل را داشته باشند. استخراج مداوم یون‌ها از پلاسما منجر به جریانی از ذرات باردار از پلاسما می‌شود که از این پس می‌توان از آن به عنوان باریکه یونی نام برد. جریان باریکه یونی استخراج شده از چشمه یونی به وسیله چگالی پلاسما، دمای الکترون پلاسما، ولتاژ استخراج کننده و هندسه استخراج کننده مشخص می‌شود. شدت باریکه نیز به پارامترهایی از قبیل توزیع چگالی پلاسما، دمای یونی پلاسما و هندسه استخراج کننده وابسته می‌باشد [۱۱-۸، ۱۰، ۱]. برای درک بهتر شکل گیری باریکه یونی در بخش ۷-۱ به صورت مختصر مروری بر هلال پلاسما و غلاف پلاسما خواهیم داشت.

۶-۱ قانون چایلد لانگمویر^۱

بیشینه جریان قابل حصول بین دو سطح، تحت شرایط محدودیت بار فضایی توسط قانون چایلد لانگمویر مطابق با رابطه (۱-۴) بدست می‌آید:

^۱ Child-Langmuir

$$J = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_0^{\frac{3}{2}}}{a^2} \quad (۴-۱)$$

که در این رابطه e و m بار و جرم ذرات باردار، V_0 اختلاف پتانسیل بین چشمه و الکتروود استخراج، a فاصله بین مرز پلاسما تا الکتروود استخراج و ε_0 ثابت دی الکتریک خلا است. همچنین V_0 به صورت حاصل جمع پتانسیل پلاسما V_p و V_{ex} که اختلاف پتانسیل بین کاتد در اتاقک یونش و الکتروود استخراج است، به صورت رابطه ۵-۱ بیان می‌شود:

$$V_0 = V_p + V_{ex} \quad (۵-۱)$$

چگالی جریان باریکه استخراج شده J ، با دمای الکترون T_e ، جرم یونی m و چگالی جریان الکترون n_e به صورت زیر بیان می‌شود:

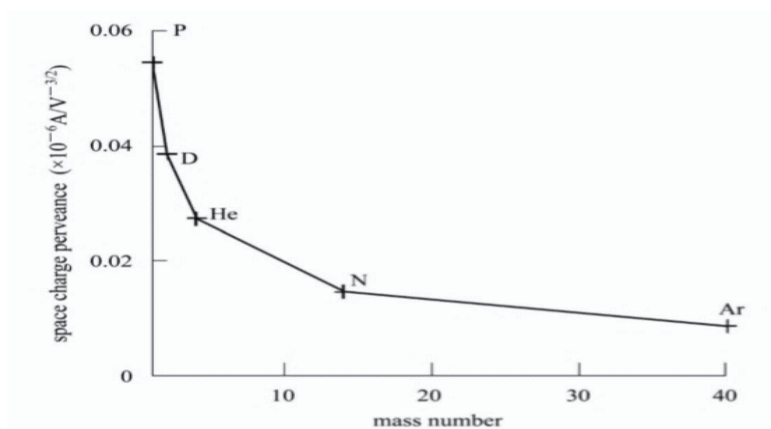
$$J = en_e \sqrt{\frac{KT_e}{m}} \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (۶-۱)$$

که در آن K ثابت بولتزمن و e مقدار مطلق بار الکترون است. حداکثر چگالی جریان قابل حمل، یک تابعی از حجم ذرات باردار، حالت بار و همچنین ولتاژ و فاصله خالص بین دو سطح رسانا است. جریان همچنین تابعی از سطح مقطع است که از طریق آن یون ها از پلاسما استخراج می‌شوند. قانون چایلد لانگمویر این اجازه را می‌دهد که پروینس^۲ را به صورت رابطه ۷-۱ تعریف کنیم:

$$P = \frac{I}{V^{\frac{3}{2}}} \quad (۷-۱)$$

^۲ Perveance

تأثیر بار فضایی در باریکه ها با در نظر گرفتن بزرگی جریان باریکه و ولتاژ شتابدهنده به راحتی مشخص می‌شود. پروانس به منظور مشخص کردن مسیر باریکه و مرزهای آن مورد مطالعه و محاسبه قرار می‌گیرد و نشان می‌دهد که بار فضایی در چه حدی در حرکت باریکه قابل توجه است. رابطه ۱-۷ به بیشینه جریان استخراج شده ناشی از ولتاژ اعمالی وابسته است. این کمیت برای یک سیستم استخراج معین با چگالی پلاسمای ثابت مقدار ثابتی را خواهد داشت و کمترین قطر باریکه زمانی بدست می‌آید که این پارامتر مقدار بهینه خود را داشته باشد. در شرایطی که سایر شاخص‌های سیستم متغیر باشند، پروینس معیار استاندارد مفیدی برای توضیح رفتار باریکه یونی خواهد بود. عبدالرحمان^۳ بیان کرده است که با افزایش عدد جرمی یون‌ها، مقدار پروینس باریکه کاهش می‌یابد. در شکل ۱-۲ رابطه بین میزان بار فضایی پروینس برای پروتون، دوترون، He^+ ، N^+ و Ar^+ با عدد جرمی آنها نشان داده شده است [۱۵، ۱].



شکل ۱-۲ تغییر پروینس باریکه با عدد جرمی برای گونه های یونی مختلف [۱۵]

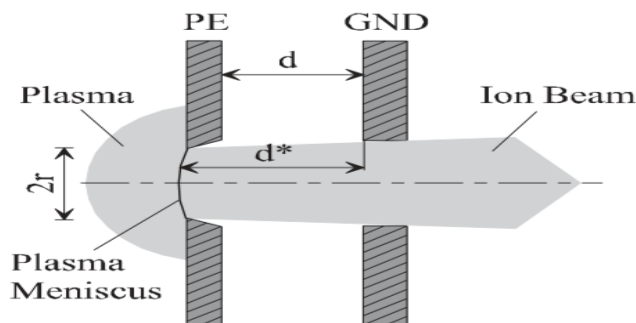
^۳ Abdelrahman

۷-۱ هلال پلاسما^۴

سطح هم پتانسیل بین محفظه پلاسما و ناحیه خلأ که یون ها از آن خارج می‌شوند را هلال پلاسما می‌گویند. ناحیه بین حجم پلاسما و هلال پلاسما، غلاف پلاسما نامیده می‌شود. در حقیقت غلاف پلاسما مقیاس طولی است که میدان پلاسما بیش از آن نمی تواند عمل کند و همینطور اگر یک میدان خارجی داشته باشیم تنها در ناحیه غلاف پلاسما عمل خواهد کرد. همانطور که چن^۵ بیان کرده است، در واقع غلاف پلاسما یک سد پتانسیل را ایجاد می‌کند، به طوری که ذرات قابل حرکت که معمولاً الکترون‌ها هستند را به صورت الکترواستاتیکی محدود خواهد کرد. ارتفاع این سد پتانسیل به گونه‌ای است که تعداد الکترون‌هایی که انرژی کافی برای عبور از سد را دارند تاخود را به دیوار برسانند، برابر با جریان یونی است که به دیوار می‌رسند. استخراج یون نیازمند تطابق بین سطوح هم پتانسیل در داخل و خارج از پلاسما است، بنابراین هلال پلاسما نقش مهمی در شکل گیری باریکه یونی و ویژگی‌های استخراج دارد. شکل هلال پلاسما توسط تغییرات چگالی پلاسما، هندسه الکترودهای پلاسما و استخراج، اندازه روزنه استخراج و میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ استخراج، تعیین می شود. این پارامتر به شدت بر روی کانونی بودن باریکه یونی خروجی از سیستم استخراج تاثیر می‌گذارد، از این رو در سیستم‌های استخراج دو الکترودی هلال پلاسما نقش مهمی را ایفا می کند. شکل ۱-۳ نحوه تشکیل هلال پلاسما را در یک سیستم استخراج دو الکترودی نشان می‌دهد.

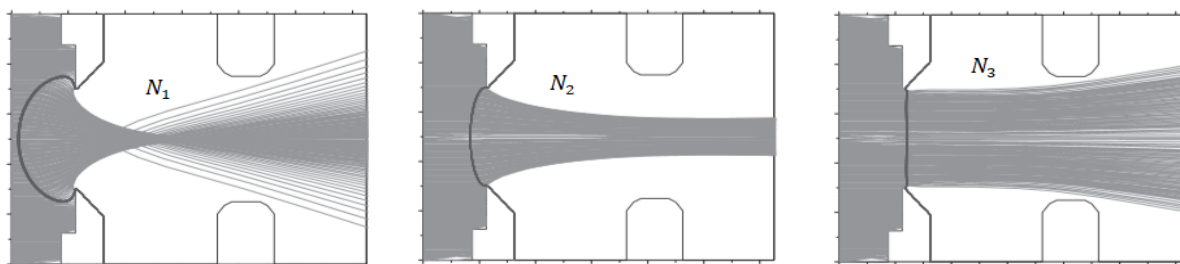
^۴ Plasma meniscus

^۵ Chen



شکل ۳-۱ سیستم استخراج دو الکترودی و نحوه تشکیل هلال پلاسما [۱۱]

در شکل ۳-۱، d^* فاصله هلال پلاسما تا الکترود استخراج را نشان می‌دهد. این فاصله باید به گونه‌ای تنظیم گردد که شدت میدان الکتریکی در هلال پلاسما صفر شود. شکل ۴-۱ شبیه سازی برای یک سیستم دو الکترودی را در چگالی پلاسمای متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱ شبیه سازی برای یک سیستم دو الکترودی با چگالی مختلف پلاسما [۱۱]

در شکل ۴-۱ با افزایش چگالی پلاسما، فاصله d^* تغییر می‌کند. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید، اگر چگالی پلاسما خیلی کم باشد (N_1) مسافت d^* افزایش خواهد یافت و هلال پلاسما شکل مقعر به خود می‌گیرد و باریکه یونی به شکل همگرا خواهد بود. اگر چگالی پلاسما مانند حالت N_3 خیلی بالا باشد در این صورت d^* کاهش خواهد یافت و هلال پلاسما به شکل مسطح و باریکه یونی به شکل واگرا خواهد بود، همینطور اگر چگالی پلاسما را بیشتر از حالت قبل افزایش دهیم در نتیجه هلال پلاسما به شکل محدب خواهد بود و باریکه یونی

موازی ایجاد خواهد نمود. چگالی جریان داده شده در رابطه ۱-۴ به چگالی پلاسما در هلال پلاسما (N) بستگی دارد. بنابراین شکل هلال پلاسما بیانگر این شرط است که بار فضایی چگالی جریان را در رابطه ۱-۴ محدود می کند که برابر با چگالی جریان یونی است [۹، ۱۱].

۸-۱ شدت نشر و میزان روشنایی

شدت نشر^۶ یکی از پارامترهایی است که میزان همگرایی یا واگرایی باریکه های یونی را مشخص می کند و یکی از مشخصه های اساسی باریکه یونی در خط انتقال باریکه است. این کمیت مساحت اشغال شده ذرات باردار را در فضای فاز مشخص می کند و به عنوان یکی از استانداردهای مشخص کردن میزان کیفیت باریکه به کار می رود. هرچه مساحت اشغال شده کمتر باشد کیفیت باریکه از نظر نقطه کانونی و نیروهای غیرخطی مطلوب تر و هرچه بیشتر باشد پراکندگی و اتلاف جریان باریکه افزایش خواهد یافت [۷-۶].

شدت نشر در یک راستا به طور مثال اینجا در راستای محور x از رابطه ۱-۸ پیروی می کند:

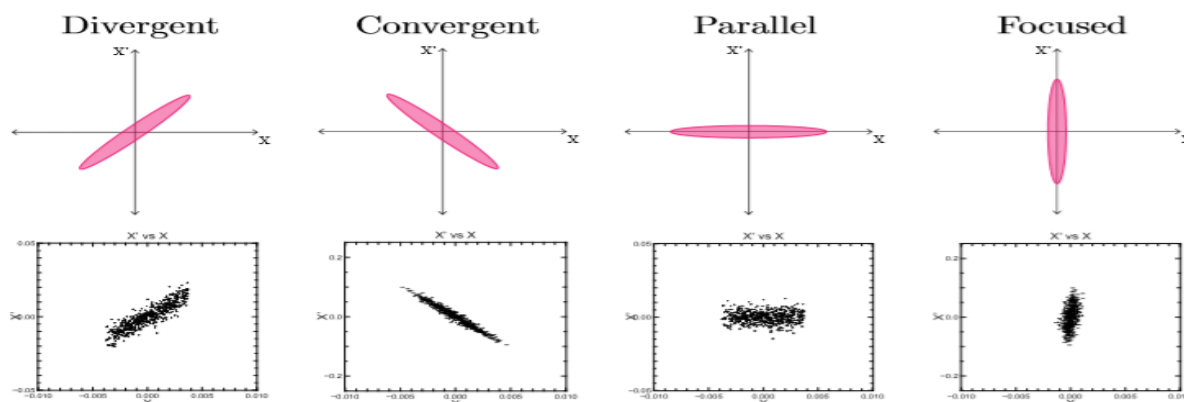
$$\gamma x^2 + 2\alpha xx' + \beta x'^2 = \varepsilon \quad (۸-۱)$$

$$x' = \frac{p_x}{p_z} \quad (۹-۱)$$

ثابت های α, β, γ پارامترهای توویس^۷ می باشند و می توان دریافت که شدت نشر از معادله حرکت ذرات بدست می آید و یک بیضی از مساحت ε در فضای فاز دو بعدی ایجاد می کند. در این حالت الگوی انتشار در فضای فاز به طور مثال در صفحه xx' بیانگر میزان همگرایی و واگرایی ذرات است. شکل ۱-۵ الگوهای شدت نشر شبیه سازی شده را در درجات مختلف همگرایی باریکه یونی نشان می دهد.

^۶ Emittance

^۷ Twiss



شکل ۵-۱ الگوهای شدت نشر شبیه سازی شده برای درجات مختلف همگرایی باریکه یونی [۱]

الگوهای مختلف شدت نشر به شرح زیر تفسیر می شوند:

در مورد باریکه واگرا، ذراتی با موقعیت‌های عرضی بزرگتر در باریکه، دارای زاویه بزرگتر هستند و بنابراین فاصله ذره از محور مرکزی باریکه افزایش می‌یابد و باریکه از محور مرکزی دور می‌شود و در نتیجه شکل آن به صورت واگرا خواهد بود. نقطه مقابل آن در مورد باریکه‌های همگرا صادق است که ذرات در باریکه با سرعت بیشتری به محور مرکزی نزدیک می‌شوند و گستردگی باریکه در محور عرضی کاهش می‌یابد و در مورد این باریکه نیز الگوی انتشار از ربع دوم به ربع چهارم صفحه مختصات گسترش پیدا می‌کند. برای باریکه‌های موازی، با گسترش باریکه در جهت عرضی، زاویه باریکه به صورت اندکی تغییر می‌کند و ذرات در تمام موقعیت‌های موجود در باریکه تقریباً با یک زاویه مشابه منتقل می‌شوند و در نهایت باریکه‌های متمرکز، زاویه باریکه حداقل میزان گستردگی را در جهت محور عرضی خواهد داشت. زمانیکه نیروهای الکترومغناطیسی به صورت خطی بر روی ذرات عمل کنند نمای گرافیکی شدت نشر، مساحت بیضی که در فضای فاز دو بعدی ترسیم شده است، ثابت خواهد بود. هنگامی که نیروهای غیرخطی مانند بارفضایی وجود داشته باشد در اینصورت شکل بیضی باریکه تغییر می‌یابد و شدت نشر حفظ نخواهد شد، بنابراین ناحیه بیضی شکل در فضای فاز تحت تاثیر نیروهای غیرخطی گسترش می‌یابد.

شدت نشر به تنهایی برای تعیین کیفیت باریکه کافی نیست و در اینجا کمیت دیگری برای این منظور تحت عنوان میزان روشنایی با رابطه ۱-۱۰ تعریف می‌کنیم:

$$B = \frac{J}{d\Omega} = \frac{dI}{dSd\Omega} \quad (10-1)$$

که چگالی جریان در واحد زاویه فضایی است. در این تعریف روشنایی مانند چگالی جریان J در سراسر باریکه می‌تواند مقداری متفاوت داشته باشد. برای بسیاری از کاربردهای عملی دانستن مقدار کل جریان باریکه محدود شده در یک حجم چهاربعدی معنی دار خواهد بود. در این صورت تعریف میزان روشنایی متوسط با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\bar{B} = \frac{I}{V_4} \quad (11-1)$$

که در این رابطه $V_4 = \iint dSd\Omega$ نشان دهنده انتگرال گرفته شده در کل حجم است.

با دانستن اینکه مقدار انتگرال برابر عبارت $\iint dSd\Omega = (\frac{\pi^2}{2}) \epsilon_x \epsilon_y$ است، می‌توانیم مقدار روشنایی متوسط را به صورت رابطه ۱-۱۲ بازنویسی کنیم:

$$\bar{B} = \frac{2I}{\pi^2 \epsilon_x \epsilon_y} \left[\frac{A}{(m_{rad})^2} \right] \quad (12-1)$$

به طور کلی برای باریکه های یونی با کیفیت بالا، درجه شدت نشر تا حد امکان باید کوچک و میزان روشنایی تا حد ممکن بیشتر باشد [۱،۴،۱۵].

۹-۱ سیستم متمرکزسازی در انتقال باریکه

باریکه‌های یونی مشابه با باریکه‌های نوری تمایل به واگرایی دارند. نیروهایی که یون‌ها از طریق بارهای فضایی به یکدیگر وارد می‌کنند باعث واگرایی شکل باریکه می‌شود. برای دستیابی به انرژی و جریان مطلوب، باریکه باید به

خوبی توسط سیستم استخراج متمرکز شده و از شدت واگرایی آن کاسته شود. نیل به این هدف با استفاده از ابزار متمرکزسازی در انتقال باریکه یونی میسر می شود. در اپتیک فوتونی، متمرکز کردن باریکه نور به وسیله عدسی های شیشه ای انجام می شود. مطابق با شکل ۱-۶ مشخصه اصلی چنین عدسی هایی این است که باریکه نور با زاویه متناسب با فاصله باریکه، از مرکز عدسی منحرف می شود و باریکه نور موازی را می توان در یک نقطه متمرکز کرد. فاصله این نقطه کانونی از عدسی، طول کانونی نامیده می شود. اگر یک میدان مغناطیسی بتواند یک ذره را در زاویه متناسب با فاصله r از محور سیستم کانونی کننده منحرف کند، مشابه با عدسی شیشه ای عمل خواهد کرد. در شکل ۱-۶، f طول کانونی و α زاویه انحراف است و از رابطه ۱-۱۳ بدست می آید:

$$\alpha = -\frac{r}{f} \quad (۱۳-۱)$$

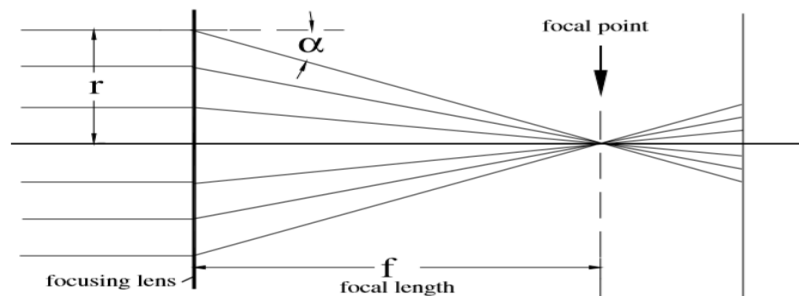
ویژگی کانونی کنندگی مشابهی نیز برای باریکه های یونی با استفاده از میدان های مغناطیسی سمتی B_ϕ با توجه به رابطه ۱-۱۴ فراهم می شود:

$$\alpha = -\frac{l}{\rho} = -\frac{e}{\beta e} B_\phi l = -\frac{e}{\beta E} g r l \quad (۱۴-۱)$$

در رابطه ۱-۱۴، l طول مسیری است که ذره در میدان مغناطیسی B_ϕ می پیماید و g گرادیان میدان است که با روابط زیر تعریف می شوند:

$$g = \frac{dB_\phi}{dr} \quad (۱۵-۱)$$

$$B_\phi = g r \quad (۱۶-۱)$$



شکل ۱-۶ اصل کانونی کنندگی [۲]

در این قسمت فرض شده است که طول l در مقایسه با طول کانونی کوتاه است و فاصله r در میدان مغناطیسی به طور قابل توجهی تغییر نکند. اگر این مطلب ممکن نباشد حاصل ضرب $B_{\phi} l$ باید با انتگرال $\int B_{\phi} d\sigma$ جایگزین شود. از دیگر ویژگی‌های کانونی یک عدسی می‌توان به ضرایب انحراف کروی^۸ و کروماتیک^۹ اشاره کرد. ضریب انحراف کروی، جایی که مناطق بیرونی عدسی بیشتر از مناطق داخلی آن متمرکزسازی ذرات را انجام می‌دهد و ضریب انحراف کروماتیک یا ابیراهی رنگی، جایی که ذرات باردار با انرژی‌های متفاوت در صفحه متفاوت متمرکز می‌شوند، رخ می‌دهد. هر دو نوع انحراف را می‌توان با کاهش زاویه همگرایی سیستم به حداقل رساند تا ذرات باردار در مرکز عدسی‌ها محصور شوند. خصوصیات کانونی یک عدسی به هندسه عدسی و نسبت ولتاژ نیز بستگی دارد. مطالبی که در ابتدای این بخش مطرح گردید مقدمه‌ای ضروری برای ورود به بحث اصلی است. به منظور جلوگیری از برخورد باریکه و متمرکز کردن آن روی هدف در ادامه این بخش انواع مختلف ابزارهای کانونی کننده تشریح می‌شوند. این سیستم‌ها شامل عدسی‌های الکترواستاتیکی با تقارن محوری و عدسی‌های مغناطیسی مانند سلونوئید و عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی می‌باشند [۲۴، ۱۲، ۲۰].

^۸ Spherical aberration

^۹ Chromatic aberration

۱-۹-۱ عدسی‌های الکترواستاتیک^{۱۰}

عدسی‌های الکترواستاتیک به دلیل سادگی و کم حجم بودن به طور گسترده در اپتیک باریکه یونی مورد استفاده قرار می‌گیرند و ابزاری استاندارد برای متمرکز کردن، کاهش و افزایش سرعت باریکه‌های یونی و الکترونی هستند. آنها در طراحی شتابدهنده‌های الکترواستاتیک با انرژی کم، نظیر شتابدهنده‌های کاکرافت والتون^{۱۱} و واندوگراف^{۱۲} از اهمیت زیادی برخوردار هستند. نظریه عدسی‌های الکترواستاتیک در اوایل دهه ۱۹۳۰ توسعه یافت. شباهت‌های قابل توجهی بین آنها و عدسی‌های نوری وجود دارد، اما تفاوت‌هایی نیز در بین آنها وجود دارد، به طور مثال عدسی‌های الکترواستاتیک ابیراهی بزرگتری دارند و نیروی دافعه کولنی که در بین ذرات باریکه یونی وجود دارد، بر عملکرد آنها تاثیر می‌گذارد. فیزیک باریکه یونی موجود در یک ناحیه دارای میدان الکتریکی، مشابه با فیزیک اپتیک نوری است. ضریب شکست باریکه نوری در انتقال از یک محیط به محیط دیگر تغییر می‌کند. در باریکه‌های یونی، ذرات یا شتاب می‌گیرند و یا کند می‌شوند و میزان تغییر مسیر ذره باردار به نیروی وارد بر آن ذره و انرژی آن بستگی دارد. همانطور که در بخش ۱-۳ نیز اشاره شد، زمانی که ذره از میان صفحات هم پتانسیل در یک میدان عبور می‌کند، با عبور از هر صفحه هم پتانسیل نیروی جدیدی را حس خواهد کرد و از آنجایی که صفحات هم پتانسیل پیوسته هستند، ذره در طول مسیر حرکت خود پیوسته نیروی جدیدی را احساس می‌کند. این عدسی‌ها از الکترودهایی که معمولاً به شکل استوانه توخالی یا حلقه توخالی هستند تشکیل شده‌اند. ساخت و نصب این الکترودها ساده است و کارایی آنها به پارامترهای مختلفی مثل اختلاف پتانسیل بین الکترودها، شعاع و فاصله بین الکترودها بستگی دارد. برای این منظور انواع مختلفی از این عدسی‌ها وجود دارند که در این میان

^{۱۰} Electrostatic Lenses

^{۱۱} Cockcroft-Walton

^{۱۲} Van de Graaff

عدسی‌های غوطه‌ور، عدسی‌های منفرد و عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیکی از مهمترین آنها هستند که در ادامه به معرفی عملکرد آنها می‌پردازیم [۲۰، ۱۷، ۱۳، ۳، ۲].

۱-۹-۱-۱ عدسی‌های غوطه‌ور^{۱۳}

عدسی‌های غوطه‌ور یکی از انواع عدسی‌های الکترواستاتیک هستند که در ساخت آنها از الکترودهای مسطح حلقه ای استفاده می‌شود. تعداد الکترودها در ساخت این عدسی‌ها به طور اختیاری انتخاب می‌شود و در اینجا ما، نوعی از این عدسی‌ها را که از دو الکترودهای مسطح حلقه‌ای با ضخامت یکسان که در پتانسیل‌های مختلف قرار دارند، بررسی می‌کنیم. با اعمال پتانسیل V_1 به الکتروده اول و پتانسیل V_2 به الکتروده دوم، میدانی بین آنها تشکیل می‌شود. باتوجه با پتانسیل اعمالی، عدسی‌ها در دو مد شتابدهنده و کندکننده عمل می‌کنند. مطابق با شکل ۱-۷ حالت شتابدهنده زمانی رخ می‌دهد که $(\frac{V_2}{V_1} > 1)$ باشد و در حالت کندکننده $(\frac{V_2}{V_1} < 1)$ می‌باشد. اگر $(\frac{V_2}{V_1} = 1)$ باشد در این صورت ضرایب ماتریس همانند ضرایب ماتریس فضای خالی به طول L خواهد بود. فاصله کانونی روزنه اول مطابق با رابطه ۱۷-۱ بدست می‌آید:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{4L} \left(\frac{V_2}{V_1} - 1 \right) \quad (17-1)$$

در این رابطه V_1 ، V_2 ، L و f_1 به ترتیب پتانسیل الکتروده اول و دوم، فاصله بین دو الکتروده و فاصله کانونی الکتروده اول می‌باشند. فاصله کانونی دوم و فاصله g_2 از صفحه کانونی در فضای V_2 با روابط ۱۸-۱ و ۱۹-۱ بدست می‌آیند:

$$f_2 = -\frac{1}{m_{21}} \quad (18-1)$$

^{۱۳} Immersion Lenses

$$g_2 = -\frac{m_{11}}{m_{21}} \quad (۱۹-۱)$$

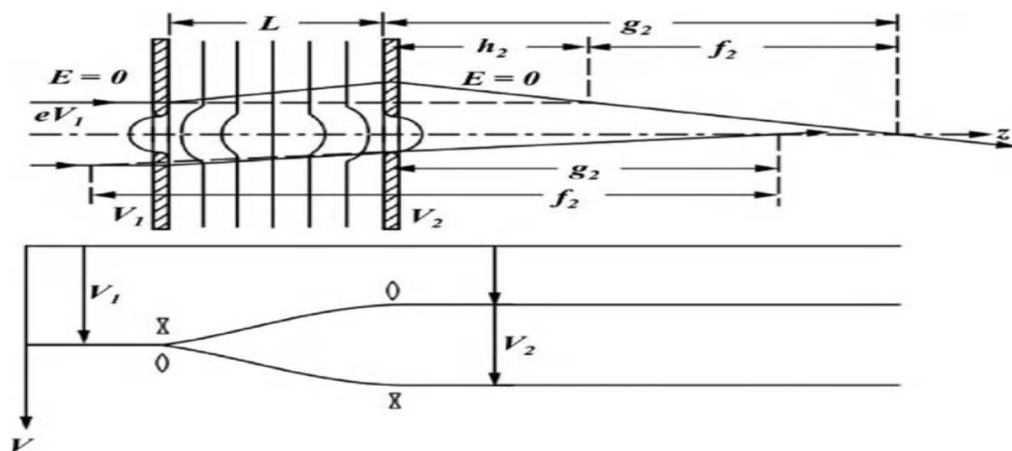
فاصله صفحه اصلی از الکتروود دوم با توجه به رابطه ۲۰-۱ برابر است با:

$$h_2 = g_2 - f_2 = \frac{1-m_{11}}{m_{21}} = \frac{m_{12}}{m_{21}f_1} \quad (۲۰-۱)$$

با ساده کردن رابطه ۱۸-۱، رابطه ۲۱-۱ بدست می‌آید:

$$\frac{f_2}{L} = \frac{4(\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} + 1)}{\frac{V_1 + V_2}{V_2 + V_1} - 2} \quad (۲۱-۱)$$

از آنجا که V_2 و V_1 باید مثبت باشند تا ذرات از روزنه‌ها عبور کنند، فاصله کانونی f برای هر نسبت $\frac{V_1}{V_2}$ همیشه مثبت است (به جز حالتی که $V_2 = V_1$ باشد).



شکل ۷-۱ عدسی غوطه‌ور برای افزایش سرعت ($V_2 > V_1$) و یا کاهش سرعت ($V_2 < V_1$) [۱۴]

عدسی غوطه‌ور دارای فاصله کانونی مختلفی در بخش ورود و خروج است. از آنجاکه در اپتیک الکترواستاتیک مسیر ذرات برگشت پذیر هستند، پارامترهای اپتیکی در بخش ورودی f_1 ، g_1 و h_1 با قراردادن مقادیر وارون $\frac{V_1}{V_2}$ در روابط ۱۸-۱ و ۲۰-۱ بدست می‌آیند. با توجه به رابطه ۱۹-۱ مقدار f_1 مطابق با رابطه ۲۲-۱ بدست می‌آید:

$$\frac{f_1}{L} = \frac{4(\sqrt{\frac{V_1}{V_2}}+1)}{\frac{V_2}{V_1}+\frac{V_1}{V_2}-2} \quad (22-1)$$

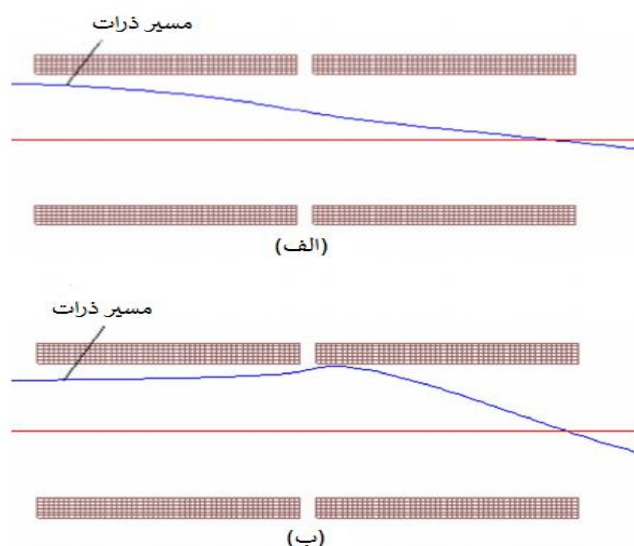
و با استفاده از روابط ۲۱-۱ و ۲۲-۱ نسبت $\frac{f_2}{f_1}$ با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} \quad (23-1)$$

رابطه ۲۳-۱ ویژگی کلی تمام عدسی‌های غوطه‌ور را بیان می‌کند. همانطور که در ابتدای بخش بیان کردیم، تعداد الکترودها در ساخت این عدسی‌ها دلخواه است و در بسیاری از عدسی‌های غوطه‌ور از سه الکتروده استفاده می‌شود، چرا که آنها عملکرد اطمینان بخش تری دارند و تغییر انرژی و متمرکزسازی باریکه در این نوع، به طور مستقل در حدود مشخصی تنظیم می‌شود. آنها را مانند عدسی‌های اینزل که در بخش بعدی به آن می‌پردازیم، طراحی می‌کنند البته با این تفاوت که در عدسی‌های اینزل الکترودهای اول و آخر در پتانسیل‌های یکسان قرار می‌گیرند. این عدسی‌ها به عنوان عدسی‌های غوطه‌ور سه روزه‌ای یا عدسی‌های زوم^{۱۴} شناخته می‌شوند و متمرکزسازی قابل تنظیم باریکه را در سیستم فراهم می‌کند. در عدسی‌های شتاب‌دهنده، با نزدیک شدن ذرات به عدسی، میدان اطراف آن به ذرات در راستای مرکز نیرویی وارد می‌کند. در فضای بین عدسی‌ها مولفه موازی سرعت افزایش یافته و مولفه عمودی در آن نیرویی به سمت مرکز وارد می‌کند و به این ترتیب در داخل عدسی نیز ذرات شتاب گرفته و با افزایش سرعت موازی از عدسی‌ها خارج می‌شوند. در عدسی‌های که در مد کند کننده عمل می‌کنند، به دلیل

^{۱۴} Zoom Lens

نسبت اختلاف پتانسیل بین عدسی‌ها، مولفه موازی سرعت کاهش یافته و مولفه عمودی نیرویی به سمت خارج از محور به ذرات وارد می‌کند، در نتیجه ذرات به دیواره عدسی نزدیک می‌شوند و با سرعت کمتری عدسی را ترک می‌کنند [۱۴، ۱۵، ۱۸]. در شکل ۸-۱ مسیر ذرات در یک عدسی شتاب‌دهنده و کند کننده نشان داده شده است.

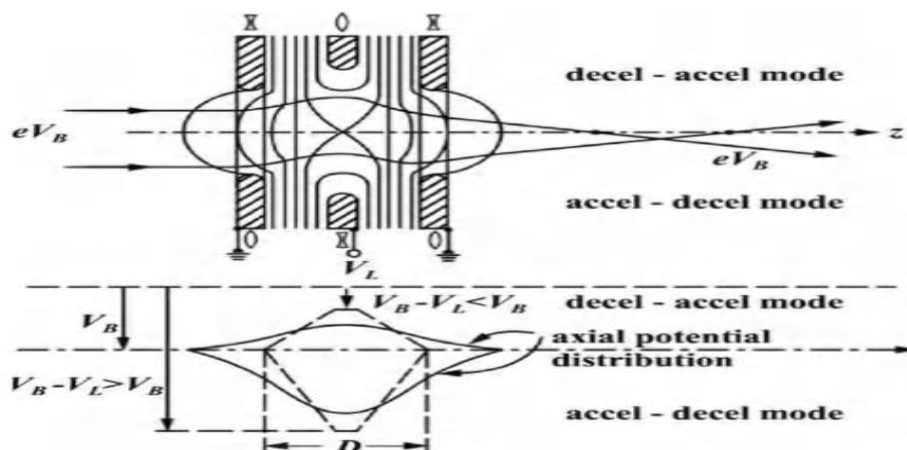


شکل ۸-۱ مسیر ذرات در عدسی غوطه‌ور (الف) شتاب‌دهنده و (ب) کند کننده [۱۵]

ضرایب انحراف کروی و کروماتیک، برای عدسی‌های سه عنصری با مقادیر بالای $\frac{V_2}{V_1}$ ، همیشه کمتر از مقادیر پایین $\frac{V_2}{V_1}$ هستند، زیرا مسیر ذرات باردار با مقادیر بالای $\frac{V_2}{V_1}$ ، در مرکز عدسی بسیار نزدیک به محور است. بنابراین عدسی‌های شتاب‌دهنده ضرایب انحراف کروی و کروماتیک کمتری نسبت به عدسی‌های کندکننده دارند. مطالعات نشان می‌دهند که یک سیستم عدسی متشکل از دو عنصر کانونی کننده توانایی ثابت نگه داشتن تصویر را در شرایطی که نسبت انرژی نهایی به انرژی اولیه را تغییر می‌دهد، ندارد. به همین دلیل لازم است حداقل یک عنصر دیگر به سیستم اضافه شود. یکی از انواع عدسی‌های که از سه عنصر متمرکزکننده تشکیل شده‌اند، به عنوان عدسی اینزل شناخته می‌شوند [۲۴].

۱-۹-۲ عدسی‌های اینزل ۱۵

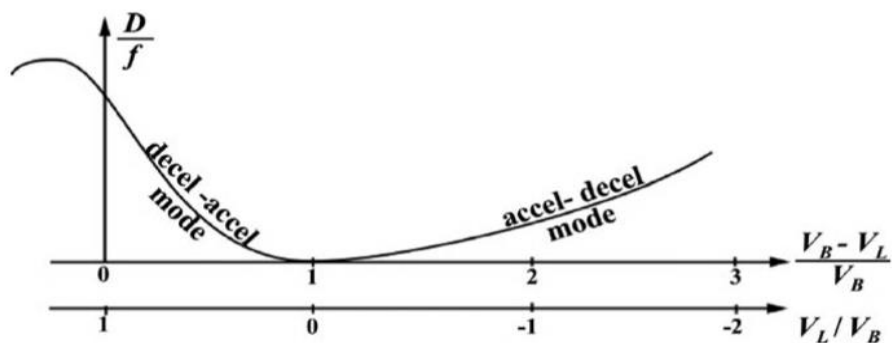
عبارت عدسی‌های اینزل معمولاً برای عدسی‌هایی که از سه الکتروود تشکیل شده‌اند، استفاده می‌شود که در این نوع از عدسی‌ها، الکتروود اول و سوم در پتانسیل یکسانی قرار دارند. این عدسی‌ها، همانند عدسی‌های غوطه‌ور، متمرکزکننده هستند و هنگامی که یک باریکه بدون تغییر انرژی آن متمرکز شود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۱-۹ عدسی اینزل مقارنی را نشان می‌دهد که از الکتروودهای مسطح حلقه‌ای ساخته شده است.



شکل ۱-۹ عدسی اینزل ساخته شده از سه الکتروود مسطح حلقه‌ای [۱۴]

دو حالت عملکردی برای این عدسی‌ها امکان پذیر است: کاهش_افزایش شتاب و افزایش_کاهش شتاب که به وسیله توزیع پتانسیل محوری نشان داده شده است. اگر اختلاف پتانسیل چشمه و الکتروود میانی کوچکتر از پتانسیل چشمه باشد ($V_B - V_L < V_B$)، در این صورت عدسی در حالت کاهش_افزایش شتاب و اگر این اختلاف پتانسیل بزرگتر باشد ($V_B - V_L > V_B$) در حالت افزایش_کاهش شتاب عمل خواهد کرد. توزیع پتانسیل هنگامی

که خطوط هم پتانسیل به عنوان خطوط سطح توپوگرافی در نظر گرفته شوند، شبیه یک سطح زینی می‌شود. توان عدسی نیز $\frac{D}{f}$ در شکل زیر نشان داده شده است.



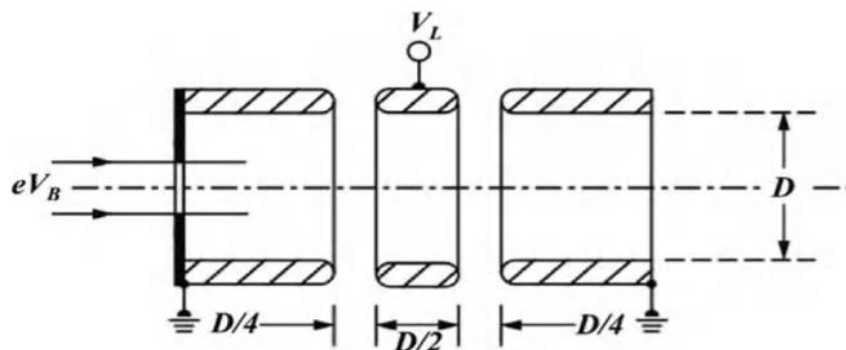
شکل ۱-۱۰ وابستگی توان عدسی منفرد به پتانسیل الکتروستاتیکی V_L برای باریکه ای با انرژی eV_B [۱۴]

حالت کاهش-افزایش شتاب به دو دلیل در کاربردهای عملی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

دلیل نخست این است که از آنجایی که ولتاژ شتاب دهی چشمه ذرات باردار معمولاً منفی است و دو الکتروستاتیک بیرونی به زمین متصل هستند، الکتروستاتیکی در ولتاژی هم علامت با ولتاژ چشمه است و بنابراین با یک منبع، تغذیه می‌شوند. دوم آنکه می‌توان توان بالایی از عدسی را بایک ولتاژ قابل مقایسه با ولتاژ چشمه برای الکتروستاتیکی بدست آورد که این خود به معنی فاصله کانونی کوتاه است. در این حالت عملکردی، وقتی ذرات باردار از الکتروستاتیک اول خارج می‌شوند، میدان الکتریکی انرژی جنبشی یون‌ها را افزایش داده و آنها را به سمت داخل می‌راند.

عکس این اتفاق زمانی که یون‌ها از الکتروستاتیک دوم خارج می‌شوند رخ می‌دهد. نیروی شعاعی به سمت بیرون وارد شده و یون‌ها از لحاظ محوری کند می‌شوند. در نتیجه ذرات باردار که به الکتروستاتیک سوم می‌رسند کم انرژی‌تر هستند و یک نیروی شعاعی به سمت بیرون احساس خواهند کرد و زمانی که الکتروستاتیک سوم را ترک می‌کنند به

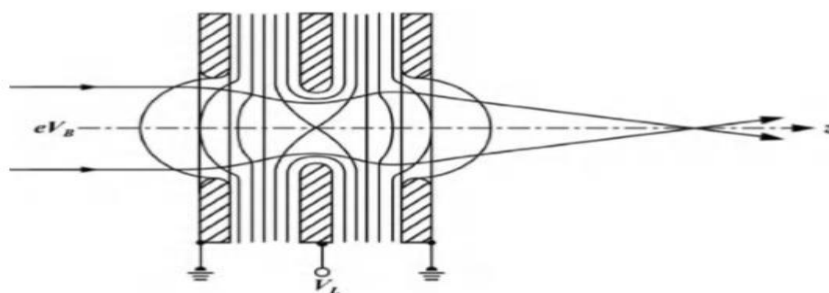
صورت شعاعی متراکم شده و در راستای محوری سرعت می‌گیرند. یون‌ها در هنگام ورود به الکتروود مرکزی با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند، بنابراین نیروی شعاعی به سمت داخل در این الکتروود نسبت به نیروی شعاعی به سمت خارج در الکتروود اول و سوم بیشتر است. اگر اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود اول و دوم از انرژی جنبشی یون‌ها نسبتاً کوچکتر باشد، در این صورت یون‌ها به صورت محوری خیلی آهسته نشده و نیروی شعاعی زیادی نیز احساس نمی‌کنند و در نتیجه در مسیر یون تغییر شعاعی کمی مشاهده خواهد شد. در حقیقت کارکرد یک عدسی منفرد با ایجاد تعادل بین انرژی جنبشی ذرات باردار و اختلاف پتانسیل الکتروود میانی با الکترودهای اطراف صورت می‌گیرد. در حالت کاهش-افزایش شتاب، هنگامی که نسبت ولتاژ $(\frac{V_L}{V_B})$ به مقادیر مثبت بالاتر افزایش می‌یابد، توان عدسی $\frac{D}{f}$ از مقدار حداکثر عبور می‌کند در واقع به معنی این است که فاصله کانونی به حداقل می‌رسد. با توجه به شکل ۱-۱۱ با انتخاب آگاهانه عدسی، فاصله کانونی می‌تواند دقیقاً در $\frac{V_L}{V_B} = 1$ رخ بدهد. برای بعضی از کاربردها این مزیت است زیرا چشمه و عدسی با ولتاژ یکسانی کار می‌کنند.



شکل ۱-۱۱ هندسه عدسی اینزل که الکتروود میانی در پتانسیل چشمه قرار دارد [۱۴]

در شکل ۱-۱۱ زمانی که ولتاژ الکتروود میانی با ولتاژ چشمه یکسان باشد، فاصله کانونی $f \approx 2D$ است، در حالی که برای $V_L = 0.5V_B$ ، فاصله کانونی $f \approx 10D$ است. در حالت افزایش-کاهش شتاب برای چشمه یک منبع ولتاژ مجزا با قطبیدگی مخالف مورد نیاز است همچنین برای رسیدن به توان عدسی یکسان با حالت قبل، ولتاژ بالاتری باید فراهم شود. این زمانی که طول کانونی مورد نیاز خیلی کوتاه نباشد مفید است. دلیل این امر این است که، در

این حالت میزان ابیراهی های کروی و رنگی تصویر کوچکتر از حالت عملکردی کاهش-افزایش شتاب است. ابیراهی های کروی به علت اینکه مسیرهای ذرات به محور نزدیک هستند کوچک می‌باشند. همچنین ابیراهی های رنگی نیز به دلیل کوچکتر بودن توزیع نسبی انرژی ذرات ($\frac{\Delta V}{V}$) در داخل میدان عدسی، کمتر از حالت قبل هستند. اگر این حالت انتخاب شود مطابق شکل ۱۲-۱ می توان روزنه الکتروود مرکزی را کوچکتر از الکترودهای اطراف ساخت و با این کار ولتاژ مورد نیاز برای رسیدن به فاصله کانونی مشخص، کاهش می یابد. در ساختار این عدسی‌ها مهمترین ویژگی متحدالمرکز بودن خوب عناصر هندسی در اتصال با عایق الکتریکی لازم برای تضمین ثبات ولتاژ است. فواصل و محیط ها تا زمانی که هرچیزی دارای تقارن چرخشی باشد از اهمیت کمتری برخوردار هستند [۱۴،۲۰].



شکل ۱-۱۲ هندسه مفید عدسی اینزل در حالت افزایش-کاهش شتاب [۱۴]

۳-۱-۹-۱ عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیک^{۱۶}

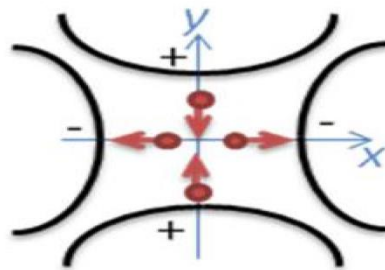
عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیک یکی دیگر از انواع عدسی‌های الکترواستاتیک هستند که از آنها برای متمرکز کردن ذرات باردار استفاده می‌شود. برای بررسی چگونگی حرکت یون‌ها از میان این عدسی‌ها، باریکه‌ای از ذرات را در امتداد محور z که از داخل یک میدان الکترواستاتیکی عرضی $(E_x, E_y, 0)$ عبور می‌کند، در نظر

^{۱۶} Electrostatic Quadrupole

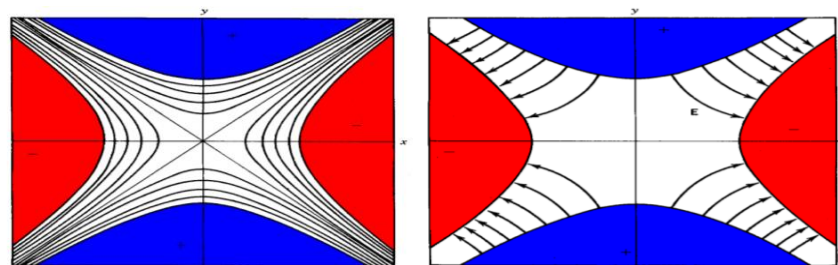
می‌گیریم. در این شرایط اگر، $E_x = -G_x$ باشد که در آن G یک ثابت است، در این صورت باریکه در صفحه xz متمرکز خواهد شد. از آنجایی که $\nabla \cdot E = 0$ است، آنگاه $E_y = +G_y$ و بنابراین باریکه در صفحه yz واگرا خواهد شد. با عبور باریکه از داخل میدان دوم به صورت $E_x = +G_x$ و $E_y = -G_y$ ، نتیجه نهایی متمرکز شدن باریکه در هر دو صفحه خواهد بود. این نوع میدان با استفاده از پتانسیل رابطه ۲۴-۱ حاصل می‌شود:

$$U = G \frac{(x^2 - y^2)}{2} \quad (24-1)$$

در شکل ۱۳-۱ و ۱۴-۱ به ترتیب آرایش الکترونی، خطوط هم‌پتانسیل و خطوط میدان را در یک عدسی چهارقطبی الکترواستاتیکی مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۳-۱ عدسی چهارقطبی الکترواستاتیکی و نیروهای وارد بر یون‌های باردار مثبت در این میدان [۲]



ب

الف

شکل ۱۴-۱ الف) خطوط هم‌پتانسیل و ب) خطوط میدان در یک عدسی چهار قطبی الکترواستاتیکی [۴]

قدرت متمرکزکنندگی عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیک مستقل از جرم ذرات باردار است و فقط به انرژی آنها بستگی دارد، بنابراین در برخورد با ذرات باردار سنگین و با انرژی متوسط از عدسی‌های مغناطیسی استفاده می‌شود [۲،۲۲].

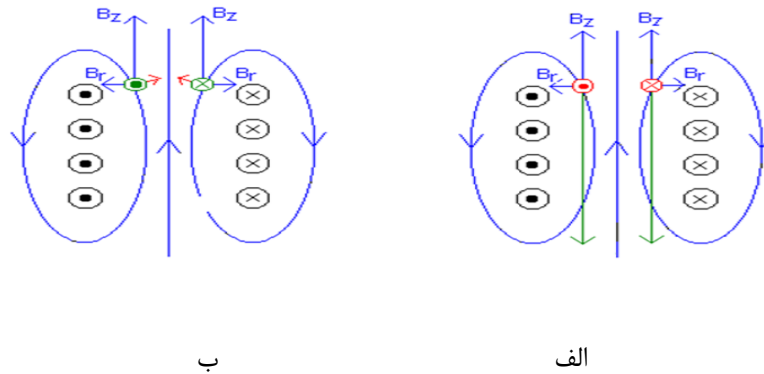
۲-۹-۱ عدسی‌های مغناطیسی

انواع مختلفی از عدسی‌های مغناطیسی وجود دارد که در اینجا به دو نمونه از این عدسی‌ها اشاره شده و به نحوه عملکرد آنها پرداخته می‌شود: سلونوئیدها و چهارقطبی‌های مغناطیسی

۱-۲-۹-۱ عدسی‌های سلونوئید^{۱۷}

یک مغناطیس سلونوئید، یک سیم پیچ استوانه‌ای مغناطیسی است و یک میدان مغناطیسی قوی را در مرکز سلونوئید ایجاد می‌کند. از سلونوئید اغلب برای متمرکز کردن باریکه ذرات در بخش شتابدهنده‌های کم انرژی، لوله‌های اشعه کاتدی، تقویت کننده تصویر، میکروسکوپ‌های الکترونی و باریکه‌های یونی ناشی از همجوشی اینرسی استفاده می‌شود. این عدسی تنها عدسی مغناطیسی ممکن است که با باریکه‌های موازی استوانه‌ای سازگار است. از آنجا که میدان مغناطیسی در این عدسی‌ها ایستا است، هیچ تغییری در انرژی ذراتی که از عدسی عبور می‌کند وجود ندارد. برای درک بهتر حرکت ذره باردار از میان سلونوئید به بررسی شکل ۱-۱۵ می‌پردازیم:

¹⁷ solenoid lenses



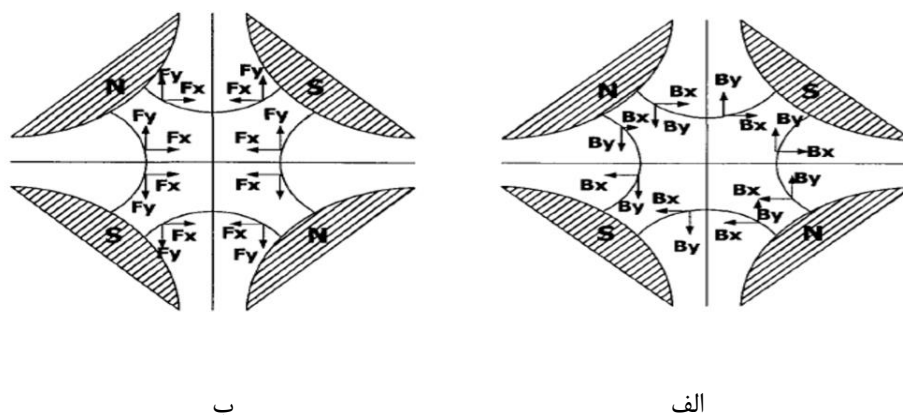
شکل ۱-۱۵ رفتار ذره در میدان سلونوئید، الف) نیروی $qv \times B$ باعث چرخش محوری ذره در راستای میدان می‌شود. در نتیجه

چرخش کل برابر است با $\Delta\theta \propto \int B_z dz$ ب) نیروی $qv \times B$ الکترون‌ها را به سمت محور همگرا می‌کند [۲]

هنگامی که ذره باردار وارد سلونوئید می‌شود به دلیل میدان شعاعی که در ابتدا وجود دارد، یک سرعت V_θ در راستای زاویه سمتی پیدا می‌کند. سپس به خاطر وجود مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای محور Z ، وقتی ذره با سرعت V_θ در سلونوئید حرکت می‌کند، به سمت محور رانده شده و متمرکز می‌شود. اما در سمت دیگر سلونوئید، راستای مؤلفه شعاعی میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. بنابراین ذره هنگام خروج از سلونوئید V_θ را از دست می‌دهد. این مکانیزم کانونی سازی در عدسی‌های سلونوئید همانند عدسی‌های غوطه‌ور از درجه دوم است، زیرا میدان مغناطیسی در ابتدا V_θ به ذره می‌دهد و سپس با برهمکنش با همین V_θ ذره را متمرکز می‌کند. برای حفظ قدرت عدسی، باید میدان مغناطیسی متناسب با جرم نسبی افزایش یابد. بنابراین عدسی‌های سلونوئید برای کانونی کردن باریکه‌های الکترونی کم انرژی در سطح متوسط مؤثر هستند اما به ندرت برای باریکه‌های یونی یا الکترونهای پرانرژی نیز استفاده می‌شوند [۲۳].

۲-۹-۱-۲ عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی^{۱۸}

یک عدسی چهارقطبی مغناطیسی دارای چهار قطب یکسان با توانایی برابر، اما قطب‌های متناوب است که آهنربای دائمی یا الکترومغناطیس هستند. همچنین در ساخت این عدسی‌ها می‌توان به جای قطب دائمی از سیم پیچ‌ها برای تولید میدان‌های مغناطیسی استفاده کرد. شکل ۱۶-۱ الف و ب به ترتیب خطوط میدان و خطوط نیرو را برای ذرات باردار منفی در یک عدسی چهارقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد.



شکل ۱۶-۱ آرایش چهارقطبی مغناطیسی خاص، الف) خطوط میدان، ب) خطوط نیروی وارد بر ذره منفی [۲]

همانطور که در قسمت ب شکل ۱۶-۱ مشاهده می‌شود، یک چهارقطبی به تنهایی در یک جهت واگرا کننده و در جهت دیگر همگرا کننده است. اما برای اینکه بتوان باریکه را از هر دو سمت متمرکز کرد باید از دو چهارقطبی به صورت پیوسته استفاده کنیم. فاصله کانونی برآیند دو عدسی با فاصله‌های کانونی f و f' که در فاصله d از یکدیگر قرار دارند، به صورت رابطه ۲۵-۱ به دست می‌آید:

^{۱۸} Magnetic Quadrupole

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'} - \frac{d}{ff'} \quad (۲۵-۱)$$

در صورتی که $f = -f'$ (یعنی یک عدسی واگرا کننده و دیگری همگرا کننده باشد) باشد، آنگاه فاصله کانونی برآیند مطابق با رابطه ۲۶-۱ برابر است با:

$$\frac{1}{F} = \frac{d}{-ff'} = \frac{d}{|ff'|} \quad (۲۶-۱)$$

این معادله بیانگر این است که برآیند این دو عدسی همانند یک عدسی همگرا کننده عمل می‌کند. به این ترتیب می‌توان با قرار دادن دو عدسی به صورت پیوسته در کنار یکدیگر به گونه ای که با هم زاویه ۹۰ درجه را می‌سازند، یک ترکیب عدسی همگرا کننده ذرات را ایجاد کرد. عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی نسبت به عدسی‌های سلونوئیدی، کانونی کننده قوی تری را برای باریکه فراهم می‌کنند و در شتاب دهنده‌های با انرژی بالاتر و همچنین باریکه‌های یونی نیز کاربرد دارند. در مقابل سلونوئیدها، برخلاف عدسی‌های چهارقطبی که باید به صورت یک جفت همگرا کننده و واگرا کننده استفاده شوند، باریکه را در هر دو راستای x و y به صورت هم زمان متمرکز می‌کند و برای انتقال باریکه‌های با جریان بالا و متمرکزسازی باریکه در فاصله کوتاه مناسب هستند [۲۳].

فصل دوم: سیستم استخراج و انتقال باریکه چشمه یونی پهنک

چشمه یونی وسیله‌ای است که باریکه‌ای از ذرات باردار را تولید می‌کند. اگرچه سابقه ساخت چشمه یونی به اوایل قرن بیستم بر می‌گردد، با این حال توسعه این نوع از چشمه‌های یونی هنوز در دستور کار محققان فیزیک قرار دارد. مطالعات گسترده‌ای در طی هشتاد سال گذشته پیرامون این موضوع انجام شده است، برای مثال در دهه گذشته در هر سال حدود ۴۰۰ مقاله در کنفرانس‌ها و مجله‌های مختلف در مورد چشمه‌های یونی ارائه گردیده و به چاپ رسیده است. موضوع این پایان نامه، طراحی و ساخت سیستم استخراج یکی از قدیمی‌ترین و همچنان مهم‌ترین نوع چشمه‌های یونی به نام چشمه یونی پنینگ است.

چشمه یونی پنینگ در سال ۱۹۳۶ با انجام اولین آزمایش‌های تخلیه توسط پنینگ توسعه گسترده‌ای پیدا کرد و برای فشارسنجی در فشار پایین پیشنهاد شد و سپس در کاربردهای مختلفی این چشمه مورد استفاده قرار گرفت. در میان چشمه‌های یونی، چشمه یونی پنینگ دارای ابعاد کوچک، طول عمر بلند بوده و هم در مد پالسی و هم در پیوسته می‌تواند عمل کند. این مزایا باعث شده است که کاربردهای وسیعی از جمله شتابدهنده ذرات، کاشت یونی، کندوپاش، جداسازی مغناطیسی ایزوتوپ‌ها، تبخیر از سطح و کاربردهای گداخت داشته باشد. به طور کلی سیستم شتابدهی یک چشمه یونی پنینگ از دو بخش: ۱-اتاقک یونش ۲-سیستم استخراج و انتقال دهنده تشکیل شده است. اتاقک یونش از یک کاتد و یک آنتی کاتد صفحه‌ای که توسط یک آند استوانه‌ای توخالی از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است که فرآیند تشکیل پلازما در آن صورت می‌گیرد. الکترون‌ها در اثر ولتاژ DC اعمالی بین آند و کاتدها و با عبور از آند استوانه‌ای توخالی، حرکت کرده و با ذرات خنثی، مولکول‌ها و اتم‌های گاز محصور شده در اتاقک یونش برخورد کرده و آن‌ها را یونیزه می‌کند. ذرات پلاسمای تولید شده در اتاقک یونش دارای حرکت کاتوره‌ای می‌باشند، لذا برای استخراج یون‌ها از اتاقک یونش و هدایت آن‌ها به منظور کاربرد نهایی از میدان‌های الکترواستاتیکی استفاده خواهیم کرد. مشخصات باریکه یونی توسط پلازما و استخراج کننده مشخص

می‌شود، به عنوان مثال جریان باریکه یونی با چگالی پلاسما، دمای الکترون پلاسما، ولتاژ استخراج و هندسه استخراج کننده تعیین می‌شود و روشن است که ترکیب باریکه با ترکیب پلاسما مشخص می‌شود [۱۱، ۲۵، ۲۶، ۲۸].

۲-۲ سیستم استخراج باریکه

استخراج یون از یک مخزن ذرات باردار یعنی یک پلاسما، و تشکیل باریکه یونی توسط بخشی به نام سیستم استخراج کننده باریکه صورت می‌گیرد. ساده ترین نوع سیستم استخراج، دو الکترودی (دیودی^{۱۹}) است که به صورت شماتیک در شکل ۱-۳ فصل اول نشان داده شده است. در سیستم دیودی الکترون‌هایی که در مجرای باریکه تولید می‌شوند به سمت پلاسما تسریع می‌شوند و ممکن است توزیع حالت بار را در منطقه انتشار تغییر دهند. علاوه بر این الکترون‌ها ممکن است در جبران بار فضایی باریکه یونی، دقیقاً در پشت الکترود استخراج نقش داشته باشند. بدون جبران بار فضایی باریکه یونی، زاویه واگرایی مسیر باریکه یونی پس از استخراج به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین الکترود سومی تحت عنوان الکترود کند کننده یا الکترود غربالگری بین الکترود پلاسما و الکترود استخراج قرار می‌گیرد و در یک پتانسیل منفی نگه داشته می‌شود و به این صورت سیستم استخراج سه الکترودی یا تریودی^{۲۰} خواهیم داشت.

سیستم استخراج یک چشمه یونی باید شرایط زیر را داشته باشد:

- ابتدا سیستم استخراج باید قادر باشد یون‌ها را با جریان باریکه مورد نظر استخراج کند.
- ثانیاً، استخراج یون‌ها با حداقل زاویه واگرایی در خروجی سیستم استخراج از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

¹⁹ Diode extraction system

²⁰ Triode extraction system

اگر بیش از ۸۰٪ جریان باریکه‌یونی در زاویه واگرایی $\pm 20 \text{ mrad}$ یافت شود، گفته می‌شود که باریکه یونی در حالت همسان یا تطبیق یافته استخراج می‌شود و این شرط تطبیق پروانس است. برای جلوگیری از افزایش بیشتر در واگرایی، اغلب از سیستم استخراج تریودی استفاده می‌شود. همانند اپتیک نوری، اپتیک ذرات باردار نیز دارای تعدادی ناهنجاری و انحراف است که نکته مهم دیگر به حداقل رساندن ناهنجاری‌ها (ابیراهی) در سیستم استخراج است، زیرا این ناهنجاری‌ها باعث افزایش واگرایی باریکه می‌شوند.

به طور کلی ابیراهی در اپتیک یونی به صورت زیر طبقه بندی می‌شوند:

۱. ابیراهی هندسی: ابیراهی کروی، خمیدگی میدان یا انحراف میدان، آستیگماتیسم، خرابی شبکه ای و بالشتی یا انواع چرخش.

۲. ابیراهی رنگی

۳. اثرات بار فضایی

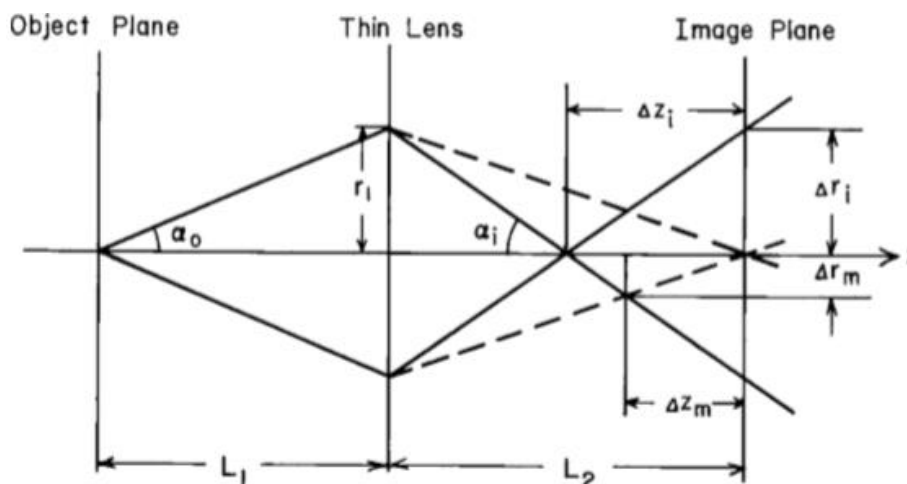
۴. پراش (در میکروسکوپ‌های الکترونی)

۵. خرابی باریکه به‌خاطر عیب و نقص مکانیکی

در عدسی‌های ایده‌آل همه ذرات با r_0 و θ_0 صفحه جسم را ترک می‌کنند و با r_i و θ_i به صفحه تصویر می‌رسند ولی در حضور ابیراهی، ذراتی که با θ_0 و r_0 از نقطه جسم بیرون می‌آیند با زوایای مختلف و در محدوده $\theta_i + \Delta\theta_i$ و $r_i + \Delta r_i$ به صفحه تصویر می‌رسند [۱۱، ۳۱]. بحث‌های جزئی‌تر در رابطه با ابیراهی را می‌توان در مراجع [۲۳، ۲۹، ۳۰] یافت. در اینجا به دو ابیراهی کروی و رنگی اشاره می‌کنیم که نسبت به سایر ناهنجاری‌ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

۲-۳ اپیراهی کروی

انحراف کروی یک نوع ناهنجاری هندسی است که از شکل نامناسب میدان پتانسیل عدسی سرچشمه می‌گیرد و از عملکرد عدسی به عنوان یک عدسی کامل جلوگیری می‌کند. در شکل ۲-۱ این ناهنجاری نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ اثر ابیراهی کروی. باریکه‌هایی با زوایای بزرگ در نقاطی غیر از صفحه ایده‌آل تصویر به محور می‌رسند [۴]

در این شکل، دو باریکه از صفحه تصویر با زوایای α_0 و $-\alpha_0$ خارج شده است، به طوری که در صفحه میانی در مکان‌های r_1 و $-r_1$ قرار دارند، این باریکه‌ها به دلیل جمله r_1^3 ، نیروی بیشتری را نسبت به یک عدسی ایده‌آل و نسبت به باریکه‌های با زوایای کوچکتر احساس می‌کنند و قبل از این که به صفحه تصویر در عدسی ایده‌آل برسند، از محور اصلی با زوایای α_i و $-\alpha_i$ عبور می‌کنند. برای زاویه‌های کوچک α_i ، فاصله Δr_i در صفحه تصویر با تقریب خوبی از رابطه ۲-۱ به دست می‌آید:

$$\Delta r_i = C_s \alpha_1^3 \quad \Delta r = MC_s \alpha_0^3 \quad (1-2)$$

در این رابطه، C_s ضریب انحراف کروی است که به شرایط اولیه و هندسه عدسی بستگی دارد و M به بزرگنمایی اشاره می‌کند. زاویه α_i به زاویه اولیه α_0 و فاصله جسم از صفحه میانی عدسی l_1 بستگی دارد. Δz_i نیز فاصله نقطه عبور باریکه‌ها از محور تا صفحه تصویر حالت ایده‌آل است. اگر $l_1 \gg l_2$ باشد در این صورت، باریکه‌ها به‌طور موازی به عدسی می‌رسند و ضریب انحراف کروی به صورت $C_s(\infty)$ تعریف می‌شود و Δr_m و Δz_m از رابطه‌های زیر حاصل می‌شوند:

$$\Delta r_m \approx \frac{1}{4} C_s(\infty) \alpha_i^3 \quad \text{و} \quad \Delta z_m \approx \frac{3}{4} \Delta z_i = \frac{3}{4} C_s(\infty) \alpha_i^2 \quad (2-2)$$

ابیراهی کروی یک مشکل اساسی است که برخلاف اپتیک نوری، نمی‌توان آن را به‌طور کامل برطرف نمود [۳۱، ۳۵].

۲-۴ ابیراهی رنگی

این انحراف به سبب گستردگی در انرژی جنبشی ذرات به وجود می‌آید. می‌دانیم که هیچ چشمه یونی یکنواختی وجود ندارد. در تمام چشمه‌های یونی ذرات در یک ناحیه انرژی با گستردگی معین وجود دارند. با توجه به سرعت و انرژی متفاوت، تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی نیز بر ذرات، متفاوت خواهد بود و این امر باعث این خواهد شد که ذرات با تکانه‌ها و انرژی‌های متفاوت، در فاصله‌های گوناگونی از عدسی به محور برسند و به عبارتی همچون ابیراهی کروی، یک نقطه کانونی خواهیم داشت. گستردگی در مکان تصویر Δz به گستردگی تکانه Δp بستگی دارد. ذرات با تکانه p ، در فاصله z_f از عدسی کانونی می‌شوند و ذراتی که دارای تکانه $p + \Delta p$ هستند در نقطه $z_f + \Delta z_f$ کانونی می‌شوند، که $\Delta z_f = \left(\frac{\partial f}{\partial p}\right) \Delta p$ است. اگر زاویه همگرایی ذرات با تکانه p ، α باشد، ضریب ابیراهی رنگی برای عدسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{C_c}{f} = \frac{1}{2} \left(p \frac{\partial f}{\partial p} \right) \quad (3-2)$$

در این رابطه C_c ضریب ابیراهی رنگی است. انحراف عدسی‌ها با انتخاب صحیح تعداد و ساختار الکترودها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد [۳۱، ۳۵].

۵-۲ ساختار سیستم استخراج

سیستم استخراج از آنتی کاتد یا کاتدپلازما شروع می‌شود و پس از آن عدسی‌های الکترواستاتیکی قرار می‌گیرند که پتانسیل اعمال شده به این عدسی‌ها در جریان استخراج ذرات باردار بسیار مؤثر است. نحوه چیدمان، شکل هندسی و پتانسیل‌های اعمال شده به عدسی‌ها در کیفیت باریکه نهایی تأثیرگذار خواهد بود. مرسوم است که در چشمه‌های یونی از سرامیک به عنوان عایق استفاده شود. نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است این است که، عایق‌ها نمی‌توانند از موادی مانند پلاستیک ساخته شده باشند، چرا که سیستم در خلأ قرار دارد و اگر از چنین موادی استفاده شود، در محیط تبخیر می‌شوند و علاوه بر این دما در محفظه آرک^{۲۱} بالا می‌رود و بنابراین باید از موادی که دمای ذوب نسبتاً بالایی دارند استفاده کرد که در این دما فشار و تبخیر کمی صورت گیرد. سیستم استخراج در چشمه یونی پنینگ می‌تواند به صورت شعاعی یا محوری ساخته شود که در این صورت، ذرات در جهت میدان مغناطیسی یا عمود بر آن استخراج می‌شوند. همانطور که قبلاً بیان کردیم، اغلب سیستم استخراج چشمه‌های یونی، از یک الکتروده حاوی روزنه استخراج که به آن الکتروده پلازما یا آنتی کاتد گفته می‌شود و حداقل یک الکتروده دیگر تحت عنوان الکتروده استخراج کننده تشکیل می‌شود. الکتروده استخراج کننده دارای پتانسیل منفی نسبت به کاتد پلازما بوده که این پتانسیل منفی باعث ایجاد برآمدگی‌هایی در خطوط هم‌پتانسیل می‌شود که مانع از خروج الکترون از هلال پلازما خواهد شد و همچنین انرژی باریکه را افزایش خواهد داد.

وجود هلال مقعر در دهانه کاتد پلازما، باعث ایجاد باریکه همگرا خواهد شد که دارای مزایایی از جمله افزایش سطح ساطع کننده یون و کوچک شدن روزنه الکتروده استخراج می‌باشد. وجود روزنه در الکتروده استخراج کننده،

باعث آشفته‌گی خطوط هم‌پتانسیل در دهانه الکتروود استخراج کننده می‌شود که هرچه روزنه کوچکتر باشد، میزان این آشفته‌گی نیز در دهانه آن کاهش خواهد یافت. مونا الخشاب^{۲۲} در مقاله خود با بررسی انحراف کروی و رنگی، بهترین نسبت بین قطر روزنه کاتد پلاسما و الکتروود استخراج کننده را ۰/۶۶ به دست آورد. می‌دانیم که با وجود بارفضایی، زاویه واگرایی مسیر باریکه یونی پس از استخراج به سرعت افزایش می‌یابد، بنابراین برای جلوگیری از این واگرایی، الکتروود سوم که همان الکتروود کند کننده است، بین الکتروود استخراج و کاتد پلاسما قرار می‌گیرد و سیستم استخراج تریودی ایجاد می‌شود. این سیستم استخراج سه الکتروودی، پتانسیل منفی روی محور سیستم استخراج فراهم می‌کند و مانع از خروج الکترون‌ها از باریکه می‌شود که این الکترون‌ها برای جبران حالت بار ضروری هستند، همچنین مطلوب این است که با افزایش فاصله باریکه از سیستم استخراج، واگرایی آن کم باشد و به همین دلیل اغلب از سیستم استخراج سه الکتروودی استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱، ۱۷].

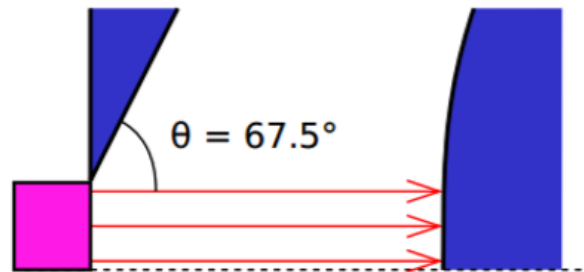
۶-۲ هندسه الکتروودها

همانطور که در فصل اول بیان کردیم، بیشینه جریان قابل حصول بین دو سطح، تحت شرایط محدودیت بارفضایی توسط قانون چایلد لنگمویر بیان می‌شود. هنگامی که ذره از هلال پلاسما خارج می‌شود، نیرویی که ذرات باردار بواسطه‌ی وجود بارفضایی به یکدیگر وارد می‌کنند، باعث واگرا شدن باریکه به خصوص در اولین روزنه استخراج به دلیل سرعت کم باریکه، می‌شود. برای خنثی کردن اثر نیروی بارفضایی در جهت انتقال، الکتروودها می‌توانند طوری شکل بگیرند که میدان الکتریکی در اولین روزنه علاوه بر شتاب دادن، متمرکزسازی باریکه را نیز انجام دهد. نیل به این هدف با زاویه دادن به لبه الکتروود میسر می‌شود که برای این منظور از هندسه پیرس^{۲۳} استفاده می‌کنیم

^{۲۲} Mona Al Khashab

^{۲۳} Pierce geometry

که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در این هندسه الکتروود نسبت به جهت حرکت باریکه تحت زاویه 67.5° درجه قرار می‌گیرد. به‌طوری که شکل میدان ایجاد شده باعث خروج موازی باریکه‌ها از چشمه خواهد شد [۷، ۱۸].

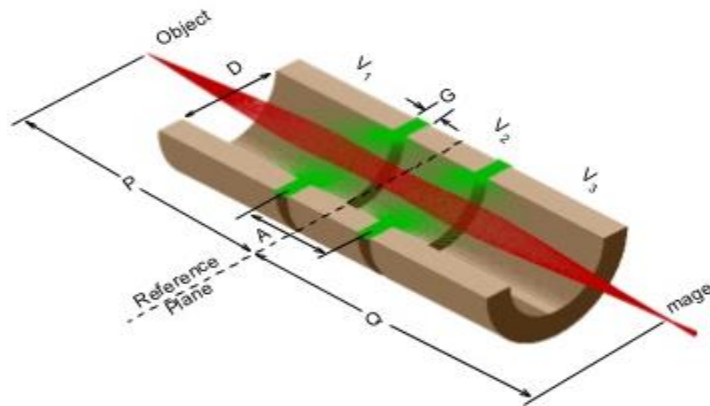


شکل ۲-۲ زاویه پیرس در سیستم استخراج [۱۸]

در سال ۲۰۰۹ سیسه^{۲۴} و همکارانش با بررسی ابیراهی کروی و رنگی برای عدسی‌های استوانه‌ای و دهانه‌ای^{۲۵}، نسبت اختلاف پتانسیل بهینه بین الکتروودها را به دست آورده و همچنین به این نتیجه رسیدند که عدسی‌های استوانه‌ای در مقایسه با عدسی‌های دهانه‌ای، انحراف کروی و رنگی کمتری دارند. روش‌های نامحدودی برای پیکربندی عدسی‌های دهانه‌ای وجود دارد. شاید ساده‌ترین هندسه مورد مطالعه شامل دو روزنه دایره‌ای با قطر برابر باشد. شکل ۳-۲ شکل هندسی عدسی زوم الکترواستاتیک سه الکتروودی و شکل ۴-۲ عدسی دهانه‌ای را نشان می‌دهد.

^{۲۴} Omer Sise

^{۲۵} Aperture lens



شکل ۳-۲ شکل هندسی عدسی زوم الکترواستاتیک تریودی [۳۸]



شکل ۴-۲ عدسی دهانه‌ای تریودی [۳۸]

در شکل ۳-۲، A طول الکتروود مرکزی، Q و P به ترتیب فاصله تصویر و جسم از صفحه مرجع، D قطر روزنه‌ها، G فاصله بین الکتروود اول و دوم و V_1 و V_2 و V_3 به ترتیب پتانسیل الکتروود اول، دوم و سوم است. از آنجا که رفتار عدسی به طور یکنواخت مقیاس بندی می‌شود، بنابراین تمام فاصله‌ها نسبت به قطر داخلی روزنه‌ها، D بیان می‌شود. مقدار نسبی $\frac{A}{D}$ یک پارامتر متغیر است که تنظیمات عدسی چند عنصری را در محاسبات تعیین می‌کند و عدسی با $\frac{A}{D} = 1$ در مقایسه با عدسی دارای $\frac{A}{D} = 0.5$ ضریب انحراف کمتر و بزرگنمایی گسترده‌ای خواهد داشت و در نتیجه طراحی خوب و قدرت متمرکزسازی باریکه را در یک ولتاژ پایین ارائه می‌دهد. خصوصیات کانونی یک عدسی نیز با پارامترهایی مثل ضرایب انحراف کروی و کروماتیک بیان می‌شود که در عدسی زوم هرچه

مقدار $\frac{V_2}{V_1}$ و $\frac{V_3}{V_1}$ بیشتر باشد این ضرایب کمتر خواهد بود و در سایر موارد این ضرایب بالاتر هستند. از طرفی با افزایش $\frac{V_2}{V_1}$ فاصله کانونی نیز کوتاه‌تر خواهد بود و وابستگی کمتری به $\frac{V_3}{V_1}$ خواهد داشت. در نهایت می‌توان اینطور بیان کرد که عدسی‌های شتاب‌دهنده ($\frac{V_2}{V_1} > 1$) ضریب انحراف کروی و کروماتیک کمتری نسبت به عدسی‌های کاهنده سرعت ($\frac{V_2}{V_1} < 1$) دارند.

مهمترین ویژگی برای سیستم استخراج، نسبت شعاع اولین روزنه به مسافت بین اولین و دومین الکتروستات است که این نسبت را S می‌نامند. کوپلند^{۲۶} و همکارانش بیشترین مقدار چگالی جریان را برای S کمتر یا مساوی ۰/۵ به دست آوردند و بقیه پارامترها از جمله شعاع دیگر روزنه‌ها و دومین فاصله بین الکترودها مهم نیستند.

۷-۲ مدل انتخابی برای ساخت سیستم استخراج چشمه‌یونی پنینگ

سیستم انتقال باریکه یونی، شامل متمرکزسازی و بررسی میزان انحراف مسیر باریکه است. اغلب عناصری که در مسیر انتقال باریکه استفاده می‌شوند، مغناطیسی هستند اگرچه برای باریکه‌های با سرعت و انرژی کم از عناصر الکترواستاتیک نیز استفاده می‌شود. با این حال در طراحی سیستم، همیشه سهولت کار، هزینه و پیچیدگی در نظر گرفته می‌شود. به منظور دستیابی به انتقال باریکه با کیفیت درک کامل از نیازهای باریکه در انتهای سیستم و ویژگی‌های باریکه در شروع کار بسیار مهم است. به منظور بهینه سازی عملکرد سیستم انتقال باریکه ذرات باردار، درک دو جنبه دینامیک ذرات باردار یعنی دینامیک تک ذره در میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی خارجی و اثرات تجمعی ناشی از میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ایجاد شده توسط خود باریکه بسیار مهم است. به‌طور کلی عناصر اپتیک باریکه بسته به نوع کاربریشان، دستگاه‌های مغناطیسی یا الکترواستاتیکی هستند. در مورد باریکه‌های پر انرژی از دستگاه‌های مغناطیسی استفاده می‌شود، چرا که برای ذرات نسبیتی ($V \approx C$) نیروی ناشی

²⁶ Coupland

از یک میدان مغناطیسی ۱T به راحتی تولید می‌شود که معادل آن برای یک میدان مغناطیسی $\frac{MV}{m}$ ۳۰۰ است که دستیابی به آن تقریباً غیرممکن است. برای باریکه‌های کم انرژی ($V \ll C$) این مسئله مطرح نیست و ملاحظات دیگر به مرحله اجرا در می‌آیند. حجم پلازما، یون‌ها را تأمین می‌کند، در حالی که سیستم استخراج، ویژگی‌های باریکه یونی استخراج شده را تعیین می‌کند. ذراتی که از سیستم استخراج عبور می‌کنند انرژی و سرعت مستقیمی را در میدان‌های مغناطیسی یا الکتریکی سیستم استخراج به دست می‌آورند، از این رو درک فیزیک سیستم استخراج چشمه‌یونی برای تولید باریکه‌های با کیفیت بسیار مهم است.

باتوجه به اینکه به خوبی شناخته شده است که یک سیستم عدسی با دو عنصر ساختاری یا به عبارتی با دو الکتروود نمی‌تواند ضمن تغییر در نسبت انرژی نهایی به انرژی اولیه، موقعیت باریکه را ثابت نگهدارد، به همین منظور لازم است حداقل یک عنصر دیگر به سیستم اضافه شود. در همین راستا می‌توانیم از عدسی‌های اینزل و عدسی‌های غوطه‌ور سه الکتروودی یا عدسی‌های زوم نام ببریم.

عدسی‌های اینزل هنگامی که یک باریکه بدون تغییر در انرژی آن متمرکز شود استفاده می‌شوند، ولی عدسی‌های زوم عملکرد اطمینان بخش تری دارند و تغییر انرژی و متمرکز سازی باریکه در این نوع به طور مستقل در حدود مشخصی تنظیم می‌شود. در ساختار هردو از سه الکتروود استوانه‌ای استفاده می‌شود ولی در اینزل الکتروود اول و سوم در پتانسیل یکسانی قرار دارند در حالی که در عدسی‌های زوم هر سه الکتروود در پتانسیل متفاوتی قرار می‌گیرند.

همانطور که مشخص است از عدسی‌های چهارقطبی متمرکزکننده قوی به عنوان جایگزینی برای عدسی‌های متقارن محوری برای یون‌های پرانرژی استفاده می‌شود. متأسفانه عدسی‌های چهارقطبی پیچیده‌تر از عدسی‌های متقارن محوری در ساخت و ساز، در محاسبات و در عملکرد هستند. عدسی‌های چهارقطبی به طور گسترده در برنامه‌های شتابدهنده مورد استفاده قرار می‌گیرند که فقط لازم است یون‌ها را در یک نقطه بسیار کوچک مانند

میکروپراب‌های با انرژی بالا متمرکز کنند. عدسی‌های چهارقطبی الکترواستاتیک نسبت به عدسی‌های چهارقطبی الکترومغناطیسی دارای چندین مزیت هستند:

۱. می‌توان آنها را بسیار کوچکتر از عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی ساخت.
 ۲. از اثرات پسماندهای الکترومغناطیسی مصون هستند.
 ۳. جریان ناچیزی از منبع تغذیه گرفته می‌شود.
 ۴. قدرت میدان مورد نیاز برای متمرکز کردن باریکه بر روی هدف مستقل از جرم یونی است، بنابراین برای باریکه یون‌های سنگین مناسب است.
- در حالی که این موارد از ویژگی‌های مطلوب آنها است اما سایر ملاحظات طراحی و ویژگی‌های عملیاتی مانع از استفاده گسترده آنها می‌شود. از آنجا که ساخت و ساز کلی مسیر حرکت ذرات طی یک مسیر خاص معمولاً فلزی است، قانون گاوس تصریح می‌کند که الکترودهای تولید کننده میدان متمرکز کننده چهارقطبی باید درون لوله باریکه ای از جنس فولاد ضد زنگ قرار داشته باشد که این امر باعث ایجاد مشکلات قابل توجهی در تراز کردن چنین عدسی در محل آن می‌شود. عدسی‌های چهارقطبی مغناطیسی گران ترین عدسی‌های چهارقطبی هستند. سلونوئیدها نیز تنها عدسی مغناطیسی سازگار با باریکه های موازی استوانه ای هستند. میدان مغناطیسی در این عدسی‌ها ایستا است و هیچ تغییری در انرژی ذراتی که از عدسی عبور می‌کنند وجود ندارد، قدرت متمرکزکنندگی آنها در مقایسه با چهارقطبی‌های مغناطیسی کمتر است [۳۷-۳۴، ۲۴، ۱۴].

۸-۲ نتیجه گیری

عدسی‌های سلونوئید مغناطیسی و اینزل الکترواستاتیک چون انرژی باریکه را تغییر نمی‌دهند مناسب نیستند. از طرفی باریکه مطلوب ما به شکل استوانه ای موازی است که تنها عدسی مغناطیسی سازگار با این مدل باریکه سلونوئید است و این خود دلیلی بر عدم استفاده از چهارقطبی الکترومغناطیس خواهد بود.

اگرچه همانطور که بیان کردیم عدسی‌های چهار قطبی مغناطیسی در انرژی بالا کاربرد دارند گرانتز از عدسی‌های چهار قطبی دیگر و پیچیده‌تر از عدسی‌های متقارن محوری در ساخت و ساز، در محاسبات و در عملکرد هستند و این موارد نیز دلایل دیگری بر عدم استفاده از این عدسی خواهد بود. عدسی‌های چهار قطبی الکترواستاتیک نیز همانند عدسی‌های چهار قطبی مغناطیسی، پیچیده‌تر از عدسی‌های متقارن محوری در ساخت و ساز، در محاسبات و در عملکرد هستند. عدسی‌های غوطه‌ور دو الکتروودی نیز نمی‌تواند ضمن تغییر در نسبت انرژی نهایی به انرژی اولیه، موقعیت باریکه را ثابت نگه‌دارد و به نظر می‌رسد عدسی مطلوبی برای استفاده نخواهد بود.

طی بررسی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدیم که مطلوب‌ترین عدسی برای این پایان نامه عدسی‌های زوم خواهند بود که ویژگی‌های مطلوب آنها در ابتدای فصل بیان شده است.

فصل سوم: شبیه سازی سیستم استخراج چشمه یونی پمپینگ

۱-۳ مقدمه

به منظور بهبود عملکرد سیستم استخراج و افزایش بازدهی سیستم، لازم است تا برخی از بخش‌های این سیستم را شبیه سازی کرد. در این فصل با استفاده از نرم افزار شبیه سازی CST STUDIO SUITE قسمت‌های مختلف سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده است.

این برنامه شبیه سازی یک بسته نرم‌افزاری تجزیه و تحلیل سه بعدی الکترومغناطیسی با عملکرد بالا برای طراحی، تجزیه و تحلیل و بهینه سازی اجزا و سیستم‌های الکترومغناطیسی است و در شرکت‌های پیشرو در زمینه فناوری و مهندسی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و مزایای قابل توجهی را در راستای تسهیل چرخه توسعه کوتاه‌تر و کاهش هزینه‌ها ارائه می‌دهد. شبیه سازی امکان استفاده از نمونه سازی مجازی را فراهم می‌کند و می‌توان عملکرد دستگاه را بهینه کرد و خطر شکست در آزمایش را به حداقل رسانید.

CST شامل ابزارهایی برای طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌های شتابدهنده است که در طیف گسترده ای از فرکانس‌های استاتیکی تا نوری کار می‌کند. این نرم افزار شامل هفت ماژول شبیه سازی است که بر اساس نیاز کاربران، ماژول مورد نظر انتخاب می‌گردد.

ما در این بخش برای شبیه سازی از ماژول CST PARTICLE STUDIO استفاده کرده ایم. این ماژول برای شبیه سازی 3D میدان‌های الکترومغناطیسی مرتبط با ذرات باردار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۸].

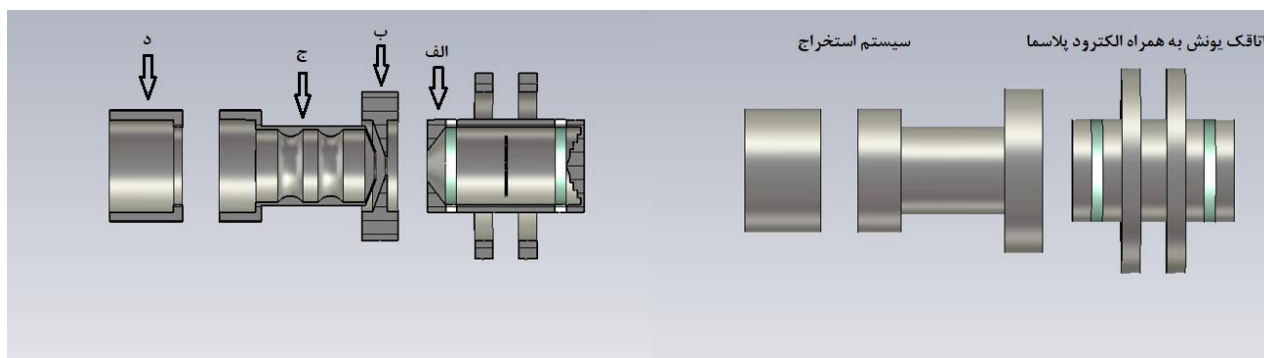
پیش از انجام مراحل طراحی لازم است شبیه‌سازی‌ها صحت سنجی شوند، از این رو برای بررسی صحت انجام عملیات در نرم افزار CST، زهرا صادقیچه در پایان نامه خود تحت عنوان طراحی سیستم اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی به روش GVM برای یک شتابدهنده الکترواستاتیک، چند خازن صفحه‌ای را در این نرم افزار شبیه‌سازی کرده و با نتایج تئوری و تجربی مقایسه کردند. در این صحت سنجی اثر افزایش مساحت صفحات خازن و همچنین افزایش فاصله بین صفحات خازن بر مقدار ظرفیت خازنی را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج بررسی ایشان و مقادیر ظرفیت خازنی بدست آمده از طریق شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ظرفیت نمونه واقعی مشاهده شد که با

افزایش مساحت صفحات خازن، ظرفیت خازنی افزایش یافته و میزان اختلاف نتایج در چنین هندسه ساده‌ای کمتر از پنج درصد بدست آمده است، بنابراین نرم افزار CST از صحت قابل قبولی در انجام عملیات برخوردار است [۴۱].

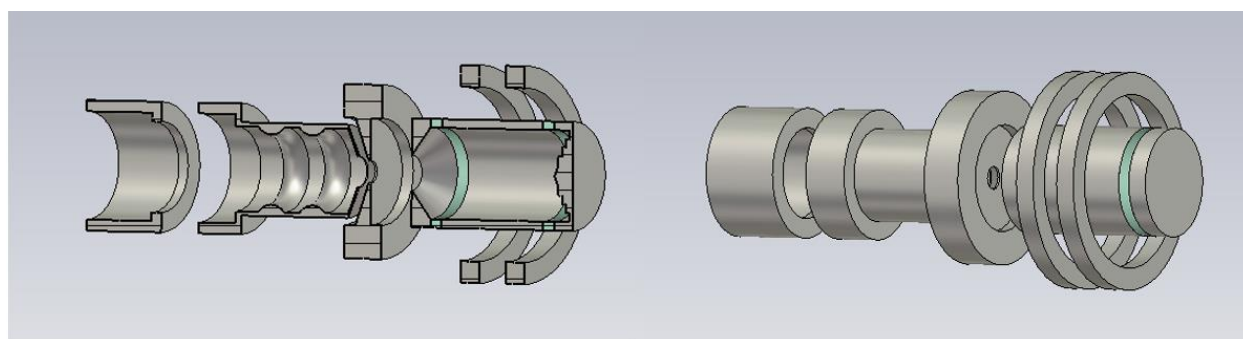
در ادامه فصل قسمت‌های مختلف سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ که شبیه سازی شده است به تفصیل بررسی خواهد شد.

۲-۳ شبیه سازی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ

دومین گام مهم برای استخراج منابع یونی پلاسما پس از تولید پلاسمای مناسب، استخراج یون‌های پلاسما به صورت باریکه یونی با انرژی جنبشی معین است که این کار را می‌توان با استفاده از سیستم استخراج الکترونی انجام داد. همانطور که در فصل قبل بیان کردیم سیستم استخراج از آنتی کاتد یا کاتد پلاسما شروع و پس از آن عدسی‌های الکترواستاتیکی قرار می‌گیرند. در این فصل سعی داریم اهمیت سیستم استخراج چند الکترونی را نشان دهیم که باریکه را با میزان شدت نشر کمتری نسبت به سیستم استخراج دیودی و تریودی تولید می‌کند. در شکل ۳-۱ اتاقک یونش و الکتروپلاسمای شبیه سازی شده توسط آقای فتحی [۳۹] و همچنین اجزای تشکیل دهنده سیستم استخراج که در این پژوهش (در ادامه این فصل توضیح داده خواهد شد)، با استفاده از نرم افزار CST، شبیه سازی شده است را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۱ اجزای تشکیل دهنده سیستم استخراج به ترتیب الف) الکتروود پلاسما ب) الکتروود استخراج ج) الکتروود کندکننده و د) الکتروود شتاب دهنده [۳۹]



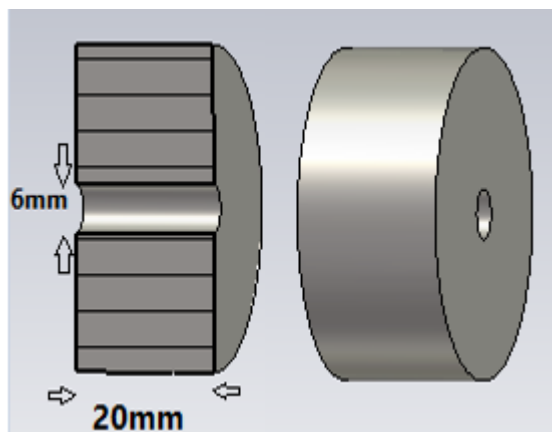
شکل ۳-۲ اتاقک یونش و سیستم استخراج (سمت راست) و برش مقطعی اتاقک یونش و سیستم (سمت چپ)

۳-۲-۱ شبیه سازی الکتروود استخراج

برای به دست آوردن بخشی از پارامترهای بهینه به صورت پیش فرض هندسه الکتروود استخراج را به شکل استوانه‌ای شبیه سازی و سپس متغیرهای تأثیر گذار بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است در نتایج شبیه سازی عواملی نظیر کمینه جریان برخوردی به الکتروود استخراج، بیشینه جریان برخوردی به فارادی کاپ، شعاع باریکه، انرژی باریکه مدنظر قرار خواهد گرفت.

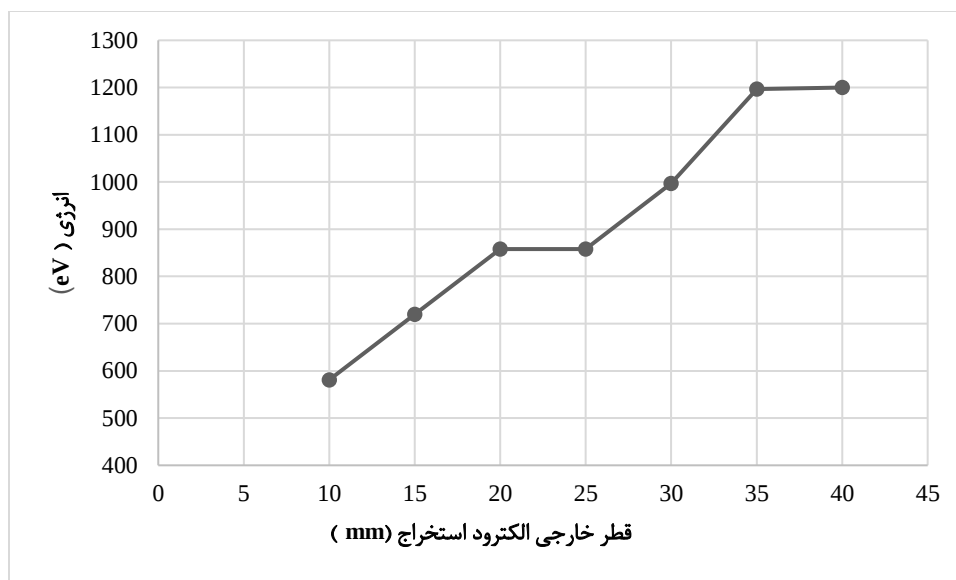
در مرحله اول قطر خارجی الکتروود استخراج را بررسی می‌کنیم. به صورت پیش فرض ارتفاع الکتروود را ۲۰ mm، قطر روزنه عبوری باریکه را ۶ mm و فاصله بین الکتروود پلاسما و الکتروود استخراج ۸mm در نظر گرفته شده است.

در شکل ۳-۳ الکتروود استخراج کننده استوانه‌ای شبیه سازی شده نشان داده شده است. قطر خارجی را از ۱۰ mm تا ۴۰ mm در فواصل ۵ mm افزایش داده و تاثیر افزایش قطر خارجی بر روی انرژی باریکه بررسی می شود.



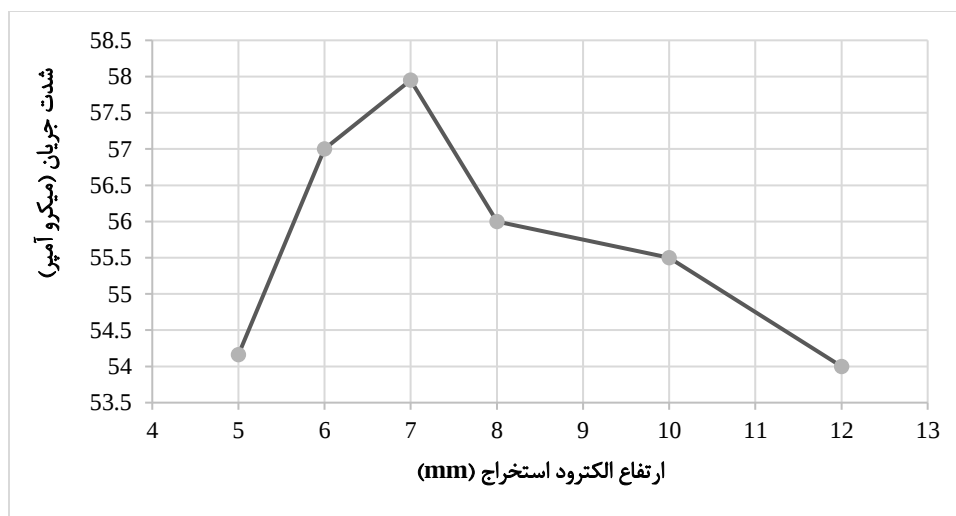
شکل ۳-۳ الکتروود استخراج کننده استوانه ای (سمت راست) و برش مقطعی الکتروود (سمت چپ)

به علت محدودیت مکانیکی در ساخت، نمی‌توان قطر خارجی را بیشتر از ۴۰mm در نظر گرفت و طبق نتایج شبیه سازی به دست آمده مقدار قطر خارجی بهینه ۴۰ mm در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۴ نمودار انرژی باریکه استخراج شده بر حسب قطر خارجی الکترود استخراج

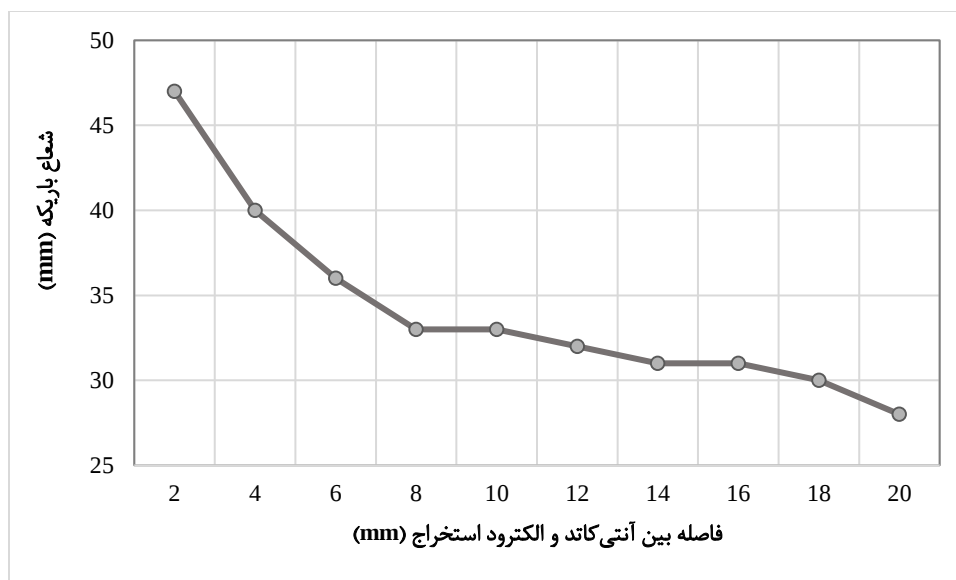
در گام بعدی با بررسی ارتفاع الکترود به این نتیجه رسیدیم که افزایش این پارامتر نیز تأثیر مثبتی در شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ، انرژی باریکه و شعاع باریکه خواهد داشت. نمی‌توان ارتفاع الکترود را به دلیل برخورد باریکه به آن از حدود مشخصی بیشتر افزایش داد و با بررسی آن در ابعاد ۵ mm تا ۱۲ mm و با توجه به نتایج، بهترین مقدار ارتفاع در ۷ mm به دست آمده است. در شکل ۳-۵ مشاهده می‌کنید که در ارتفاع ۶ mm تا ۷ mm شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ قرار گرفته در ۱۵۰ mm از این الکترود افزایش یافته است. در سایر نقاط به علت برخورد باریکه به الکترود استخراج و افزایش شدت جریان برخوردی به این الکترود نمی‌توان آن نقاط را به عنوان ارتفاع مطلوب جهت طراحی و ساخت در نظر گرفت. همچنین شعاع باریکه در ارتفاع ۷ mm نسبت به سایر نقاط کمتر و برابر ۳۱ mm و جریان باریکه در فاصله ۱۵۰ mm از الکترود استخراج $57/95 \mu A$ بدست آمد که نسبت به نقاطی که در آنها شدت جریان برخوردی صفر بود، مقدار بهینه و مناسبی است.



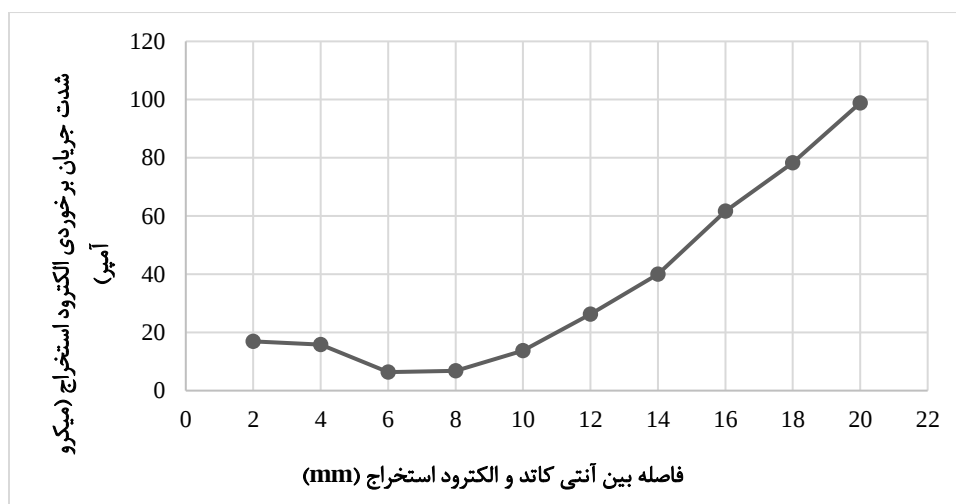
شکل ۳-۵ نمودار ارتفاع الکترود استخراج بر حسب شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ (خطوط بین نقاط برای هدایت چشم است)

در مرحله بعد قطر روزنه الکترود استخراج مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی ابعاد مختلف از ۲ mm تا ۶ mm و با دانستن این که هرچه باریکه برخوردی به الکترود کمترین مقدار و باریکه برخوردی به فارادی کاپ در فاصله ۱۵۰ mm از الکترود دوم بیشترین مقدار خود را داشته باشد، قطر روزنه ۵/۲۸ mm در نظر گرفته شد.

پس از بررسی قطر روزنه الکترود استخراج، نوبت به بررسی فاصله بین آنتی کاتد و الکترود استخراج می‌رسد که از فاصله ۲ mm تا ۲۰ mm مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ در فاصله ۶ mm میزان برخورد باریکه به الکترود استخراج کمتر از مقدار آن در فاصله ۸ mm و برابر $6/357 \mu A$ است اما شعاع باریکه در فاصله ۶ mm برابر با ۳۶ mm و بیشتر از مقدار آن در فاصله ۸ mm است (۳۳ mm) و به همین دلیل فاصله ۸ mm مناسب ترین فاصله بین این دو الکترود خواهد بود.



شکل ۳-۶ نمودار فاصله بین آنودی کاتد و الکتروود استخراج برحسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm

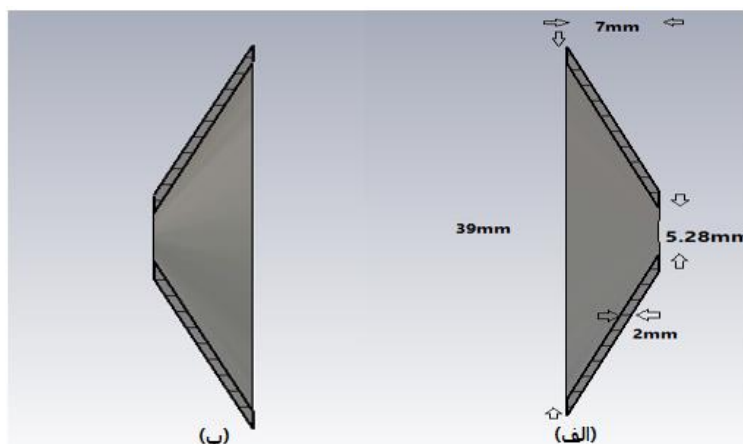


شکل ۳-۷ نمودار فاصله بین آنودی کاتد و الکتروود استخراج برحسب شدت جریان برخوردی به الکتروود استخراج

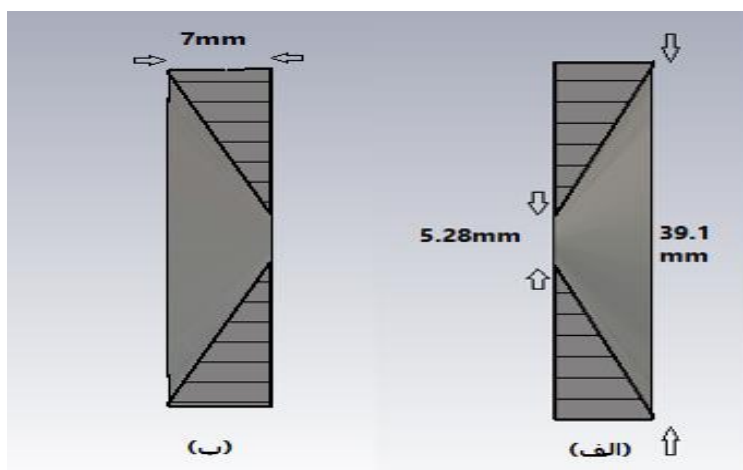
۳-۲-۱-۱ مدل انتخابی برای طراحی الکتروود استخراج

پس از بررسی پارامترهای تأثیرگذار در استخراج باریکه، نوبت به انتخاب هندسه مناسب الکتروود استخراج می‌رسد.

در شکل ۳-۳ الکتروود کننده استوانه‌ای طراحی شده قابل مشاهده است، همینطور در شکل‌های ۳-۸ تا ۳-۱۳ هندسه‌های مختلف طراحی و شبیه سازی شده برای الکتروود استخراج در نرم افزار CST قابل مشاهده است.

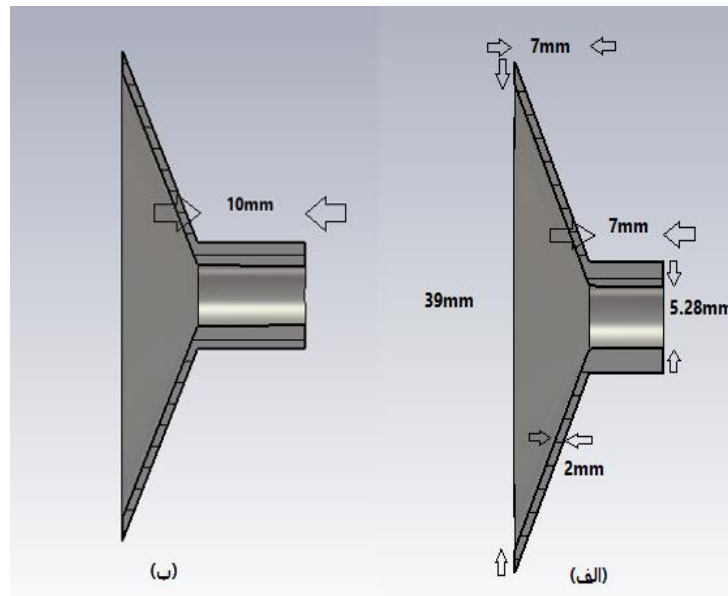


شکل ۳-۸ برش مقطعی الکتروود استخراج مخروطی (الف) روزنه الکتروود به سمت آنتی کاند، (ب) روزنه الکتروود به سمت فارادی کاپ

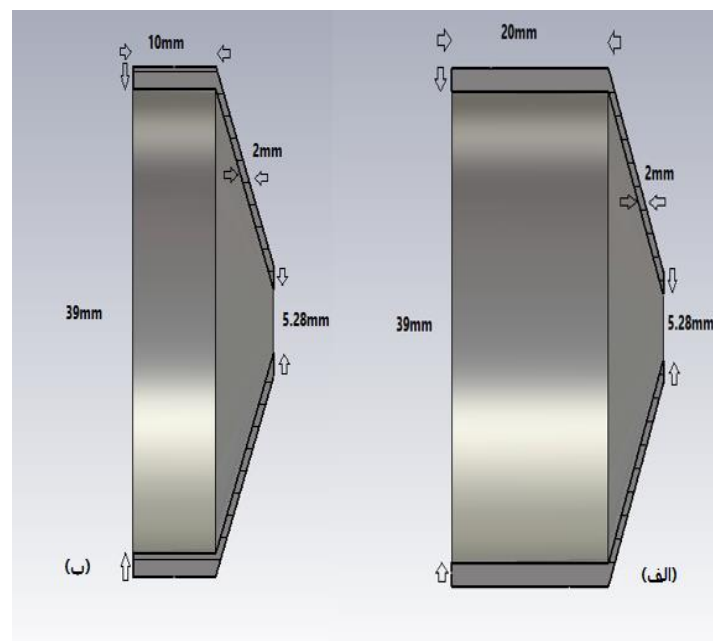


شکل ۳-۹ برش مقطعی الکتروود استخراج استوانه ای با روزنه مخروطی، (الف) روزنه به سمت فارادی کاپ، (ب) روزنه به سمت

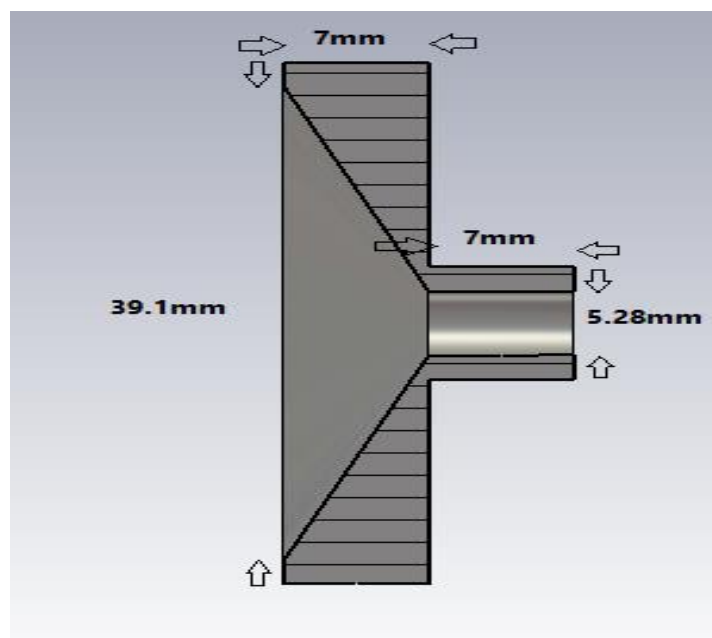
آنتی کاند



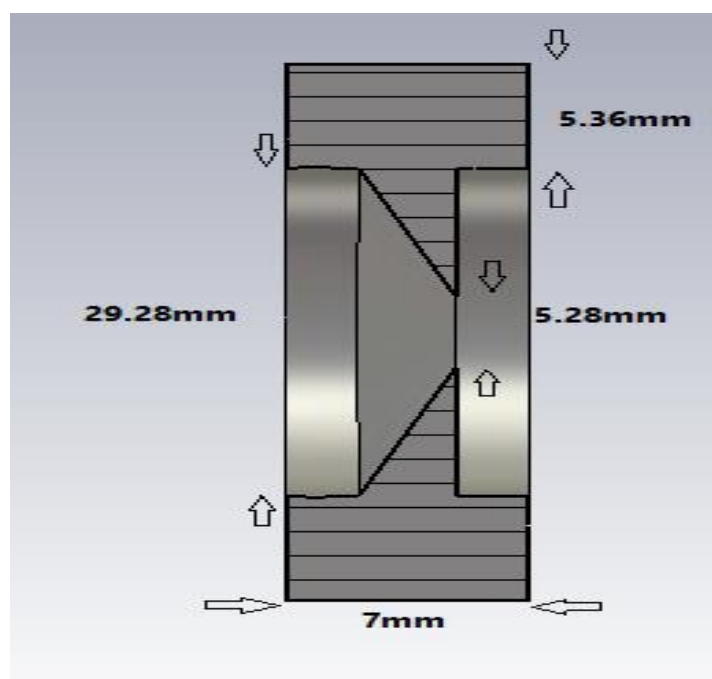
شکل ۳-۱۰ برش مقطعی الکتروود استخراج استوانه‌ای مخروطی، الف) ارتفاع استوانه ۷ mm، ب) ارتفاع استوانه ۱۰ mm



شکل ۳-۱۱ برش مقطعی الکتروود استخراج مخروطی استوانه‌ای، الف) ارتفاع استوانه ۲۰ mm، ب) ارتفاع استوانه ۱۰ mm

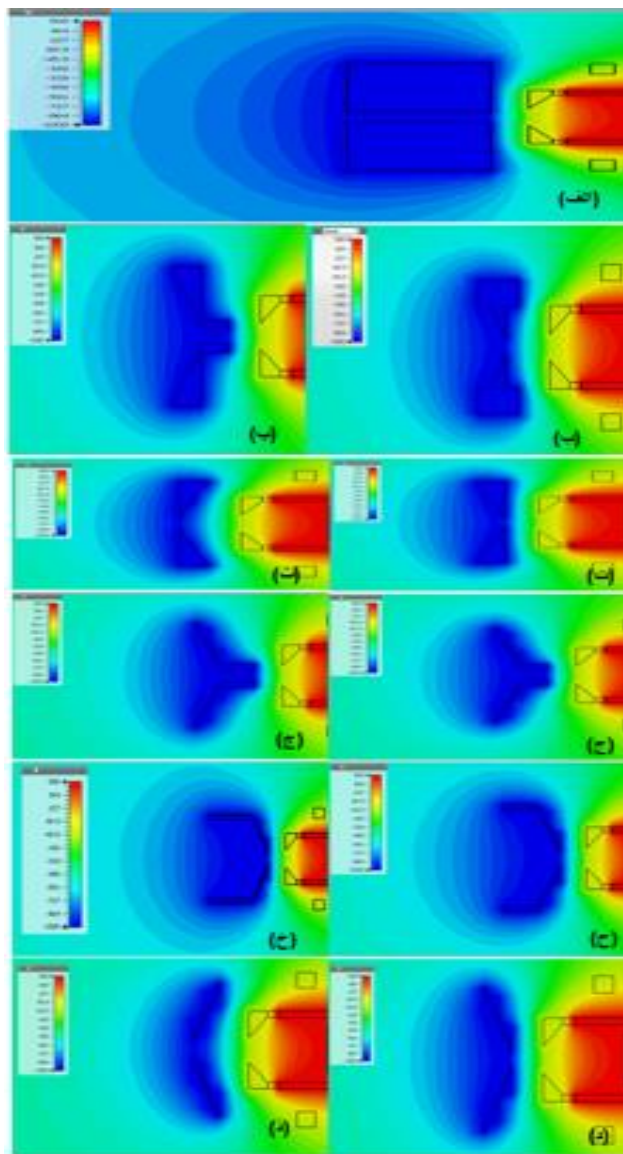


شکل ۳-۱۲ برش مقطعی الکتروود استخراج استوانه‌ای با روزنه استوانه‌ای مخروطی



شکل ۳-۱۳ برش مقطعی الکتروود استخراج استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار

خطوط هم‌پتانسیل مدل‌های مختلف الکترودهای استخراج طراحی و شبیه سازی شده در نرم افزار CST در شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است.



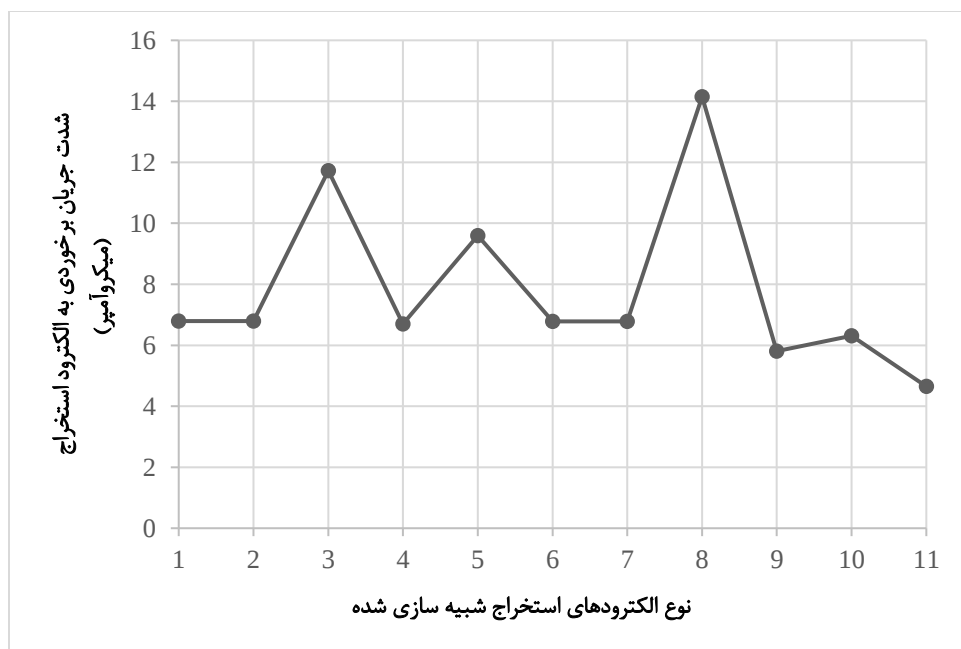
شکل ۱۴-۳ سطوح هم‌پتانسیل الکترودهای استخراج شبیه سازی شده در نرم افزار CST، (الف) الکترودهای ساده، (ب) الکترودهای استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه‌دار، (پ) الکترودهای استوانه‌ای با روزنه استوانه‌ای مخروطی، (ت و ث) الکترودهای روزنه مخروطی، (ج و چ) الکترودهای استوانه‌ای مخروطی، (ح و خ) الکترودهای استوانه‌ای و (د و ذ) الکترودهای مخروطی

در جدول ۱-۳ نتایج الکترودهای استخراج مختلف شبیه سازی شده در نرم افزار CST نشان داده شده است.

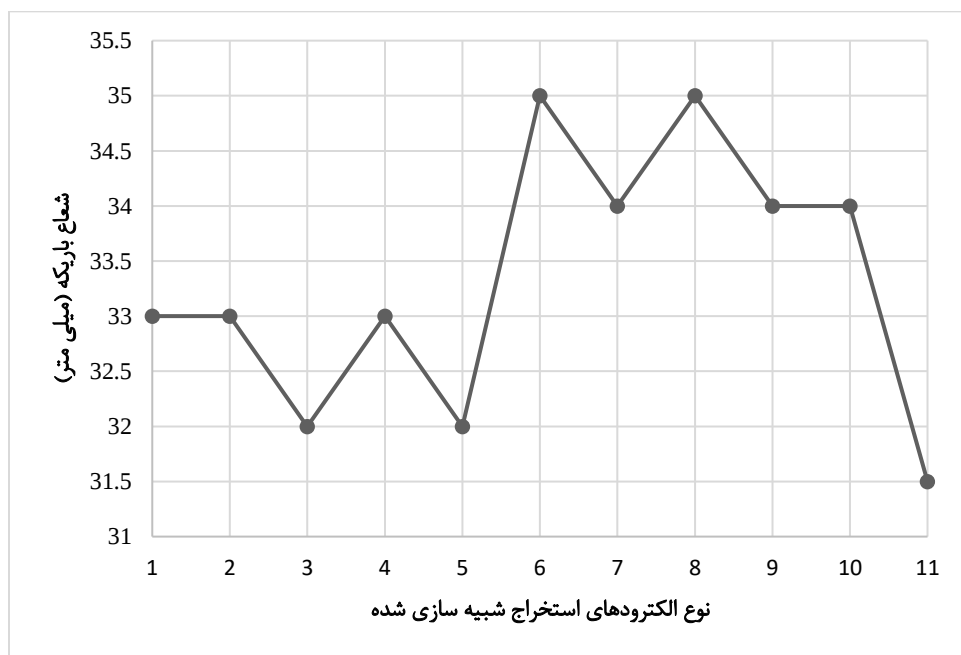
جدول ۱-۳ نتایج الکترودهای استخراج مختلف شبیه سازی شده در نرم افزار CST

شماره الکترو د	نوع الکترو د شبیه سازی شده	انرژی باریکه (eV)	شعاع باریکه (mm)	شدت جریان برخوردی به الکترو د استخراج (μA)	پتانسیل الکتریکی در مرکز محور استخراج (V)
۱	استوانه‌ای	۹۸۱	۳۳	۶/۷۹	۹۹۵
۲	استوانه‌ای با روزنه مخروطی به سمت FC	۹۵۵	۳۳	۶/۷۹	۹۵۷
۳	استوانه‌ای با روزنه مخروطی به سمت آنتی کاتد	۹۷۴	۳۲	۱۱/۷۳	۹۷۵
۴	روزنه مخروطی به سمت FC	۹۶۰	۳۳	۶/۷	۹۷۰
۵	روزنه مخروطی به سمت آنتی کاتد	۹۷۵	۳۲	۹/۶	۹۸۰
۶	مخروطی استوانه‌ای ۲۰ mm به سمت FC	۱۱۰۶	۳۵	۶/۷۸	۹۹۰
۷	مخروطی استوانه‌ای ۱۰ mm به سمت FC	۹۷۰	۳۴	۶/۷۸	۹۸۵
۸	استوانه‌ای مخروطی ۱۰ mm به سمت FC	۱۰۰۴	۳۵	۱۴/۱۵	۹۹۸
۹	استوانه‌ای مخروطی ۷ mm به سمت FC	۹۸۳	۳۴	۵/۸۱	۹۹۷
۱۰	استوانه‌ای با روزنه استوانه‌ای مخروطی	۹۸۲	۳۴	۶/۳۱	۹۹۶
۱۱	استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار	۹۸۶	۳۱/۵۰	۴/۶۵	۹۷۵

با توجه به جدول ۱-۳ و شکل‌های ۱۵-۳ و ۱۶-۳ در مدل استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار شعاع باریکه و شدت جریان برخوردی به الکترو د استخراج در حالت بهینه است، بنابراین این مدل (مدل شماره ۱۱) به عنوان مدل مناسب جهت ساخت الکترو د استخراج انتخاب گردید. در مدل انتخابی، در مورد زاویه روزنه مخروطی شکل نیز بررسی‌های صورت گرفته است که در ادامه این بخش به تفصیل در مورد آن می‌پردازیم.



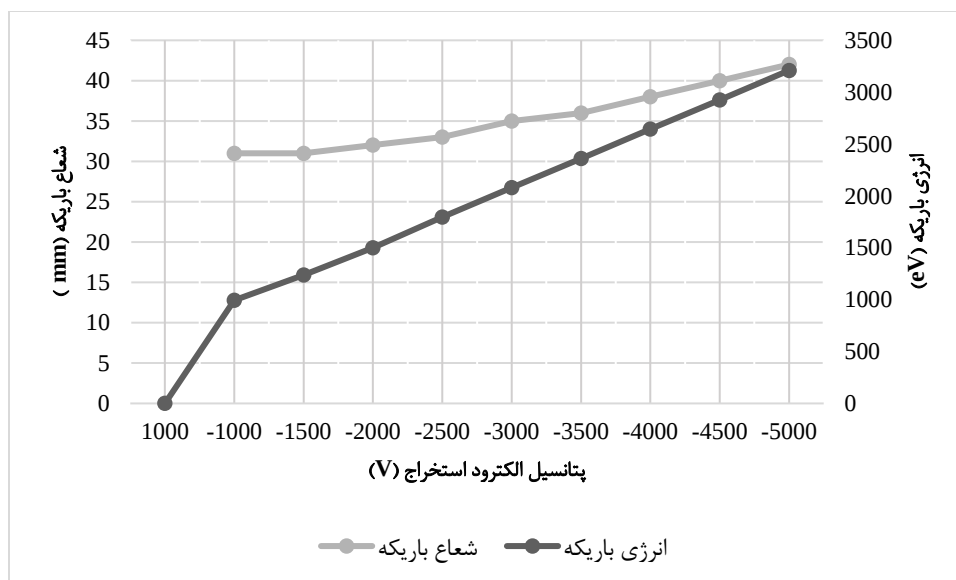
شکل ۳-۱۵ نمودار شدت جریان بر خورده به الکترود استخراج برحسب نوع الکترود استخراج شبیه سازی شده



شکل ۳-۱۶ نمودار شعاع باریکه برحسب نوع الکترود استخراج شبیه سازی شده

برای بررسی زاویه روزنه مخروطی، از زاویه ۵۵ درجه تا ۷۰ درجه شبیه سازی‌ها را انجام داده و طبق نتایج و مطالعات در زاویه ۶۷/۵ درجه شعاع باریکه کمترین و انرژی باریکه در بیشترین مقدار خود قرار دارد، همچنین شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ و الکتروستخراج از زاویه ۵۵ تا ۶۷/۵ درجه مقدار ثابتی داشته و بعد از این نقطه شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ، کاهش و همچنین شدت جریان برخوردی به الکتروستخراج، افزایش می‌یابد که طبق تحلیل‌های صورت گرفته زاویه ۶۷/۵ درجه یا همان زاویه پیرس، به عنوان مناسب ترین زاویه در نظر گرفته شد.

در مرحله آخر ولتاژ الکتروستخراج را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطور که در فصل اول بیان کردیم از Zoom Lens ها برای طراحی و شبیه سازی و ساخت الکترودهای سیستم استخراج استفاده می‌کنیم. در این مدل الکترودها در پتانسیل‌های مختلفی قرار دارند و هرچه نسبت $\left| \frac{V_i}{V_1} \right|$ بیشتر باشد، ضرایب انحراف کروی و کروماتیک که خصوصیات کانونی یک عدسی را بیان می‌کنند، کمتر و بهینه تر خواهند بود. در نتیجه ما در این بخش ولتاژ الکتروستخراج را به گونه ای انتخاب می‌کنیم که $\left| \frac{V_2}{V_1} \right| > 1$ باشد. البته ولتاژ بهینه نهایی زمانی به دست می‌آید که تمام الکترودها در سیستم استخراج شبیه سازی شده در کنار یکدیگر قرار بگیرند. همچنین ولتاژ الکتروستخراج را با توجه به انرژی ذرات باردار در نقطه انتهایی آنتی کاتد ۵۰۰ ولت در نظر می‌گیریم. نتایج ولتاژهای مورد بررسی برای الکتروستخراج به صورت زیر است:



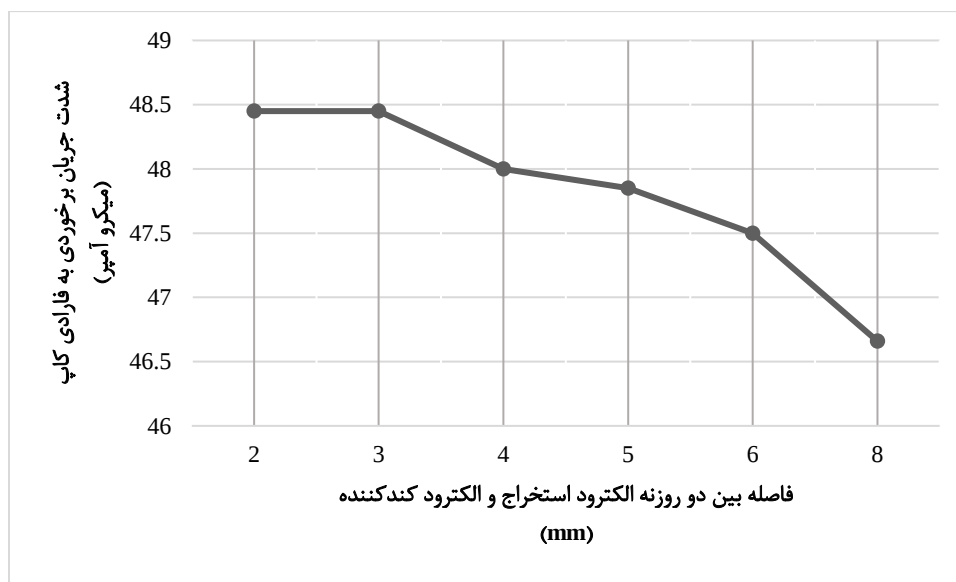
شکل ۳-۱۷ نمودار پتانسیل الکتروستاتیک بر حسب شعاع و انرژی باریکه

همانطور که در شکل ۳-۱۷ مشاهده می‌کنید در ولتاژ ۱۰۰۰ ولت استخراج باریکه نداریم و نیاز به یک پتانسیل منفی برای استخراج و شتابدهی به باریکه خواهیم داشت. هرچه از پتانسیل ۱۰۰۰- ولت به سمت ولتاژهای بالاتر حرکت کنیم میزان انرژی باریکه نیز افزایش می‌یابد اما در یک فاصله مشخصی از آنتی کاتد میزان واگرایی باریکه نیز افزایش و برهمین اساس میزان شدت جریان نیز کاهش خواهد یافت. اما با تغییر فاصله بین دو الکتروستاتیک این میزان واگرایی و کاهش شدت جریان جبران می‌شود. برای مثال در ولتاژ ۲۰۰۰- ولت اگر فاصله بین دو الکتروستاتیک را از ۸ mm به ۱۶ mm افزایش دهیم نتایج نسبتاً برابری برای دو الکتروستاتیک در ولتاژ ۲۰۰۰- ولت بدست می‌آید، اما چون ما از الکتروستاتیک‌های دیگری نیز برای همگرا و بهینه کردن اپتیک باریکه استفاده خواهیم کرد در اینجا تغییری در فاصله الکتروستاتیک‌ها از یکدیگر اعمال نمی‌کنیم. در ادامه الکتروستاتیک را به صورت پیش فرض در ولتاژ ۲۰۰۰- ولت و الکتروستاتیک سوم را نیز در پتانسیل ۶۰۰- ولت قرار می‌دهیم و ابعاد هندسه‌های مختلف را برای الکتروستاتیک سوم مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۲-۲ شبیه سازی الکترو د کندکننده

برای بررسی این الکترو د همانند الکترو د قبلی از هندسه استوانه‌ای ساده با پتانسیل پیش فرض ۶۰۰- ولت شبیه‌سازی را آغاز می‌کنیم. ابتدا قطر خارجی الکترو د مورد بررسی قرار گرفت که طبق نتایج به دست آمده قطر خارجی الکترو د کندکننده تأثیر چندانی ندارد و بنابراین قطر خارجی را بر اساس هندسه و ابعاد الکترو د استخراج، ۲۰ mm انتخاب می‌کنیم.

بعد از بررسی قطر خارجی، هندسه‌های مختلف را برای این الکترو د بررسی می‌کنیم. براساس هندسه الکترو د استخراج، محدودیت‌هایی از لحاظ ابعاد برای طراحی و شبیه سازی الکترو د کندکننده وجود دارد و بنابراین یک الکترو د مخروطی شکل را در فاصله های ۲ mm ای بین دو روزنه الکترو د استخراج و الکترو د کندکننده مورد بررسی قرار می‌دهیم و نتایج به صورت شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است.

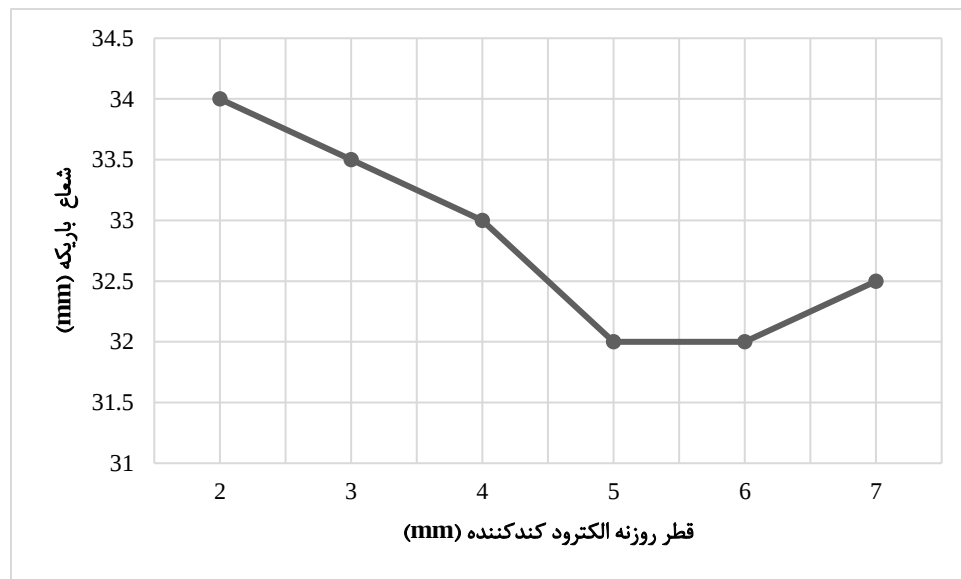


شکل ۳-۱۸ نمودار فاصله بین دو روزنه الکترو د استخراج و الکترو د کندکننده مخروطی بر حسب شدت جریان بر خور دی

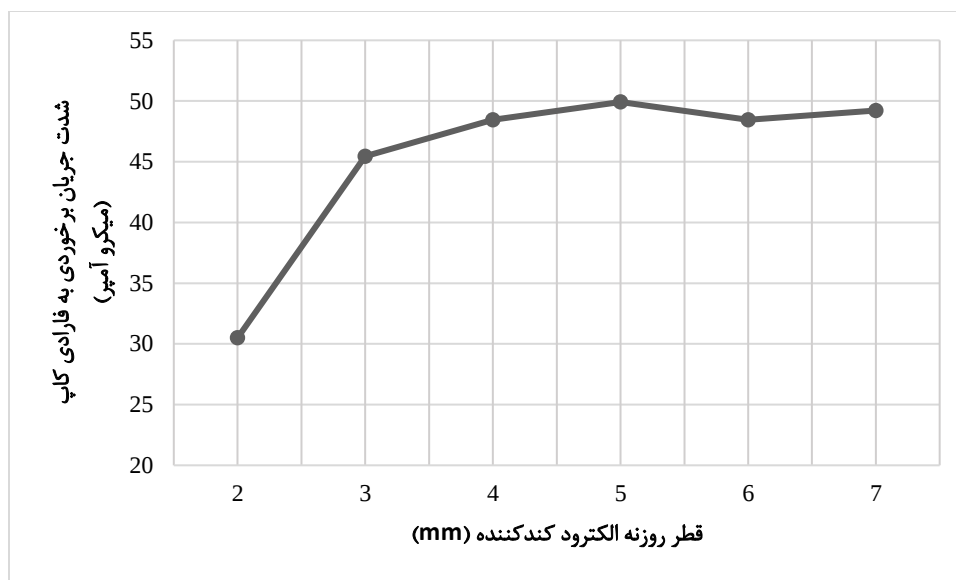
به FC

همانطور که در شکل ۳-۱۸ مشاهده می‌کنید فاصله ۲ mm و ۳ mm نسبت به سایر حالت‌ها بهتر هستند که در این نقاط میزان شدت جریان برخوردی به فنجان فارادی نسبت به سایر نقاط بیشتر بود ولی به منظور جلوگیری از تخلیه الکتریکی احتمالی بین دو الکترود، فاصله ۳ mm را انتخاب می‌کنیم.

در گام بعدی قطر روزنه‌های مختلف را از ۲ mm تا ۷ mm برای الکترود کندکننده مورد بررسی قرار دادیم و نتایج بررسی به شرح شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰ است:



شکل ۳-۱۹ نمودار قطر روزنه الکترود کندکننده مخروطی برحسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm

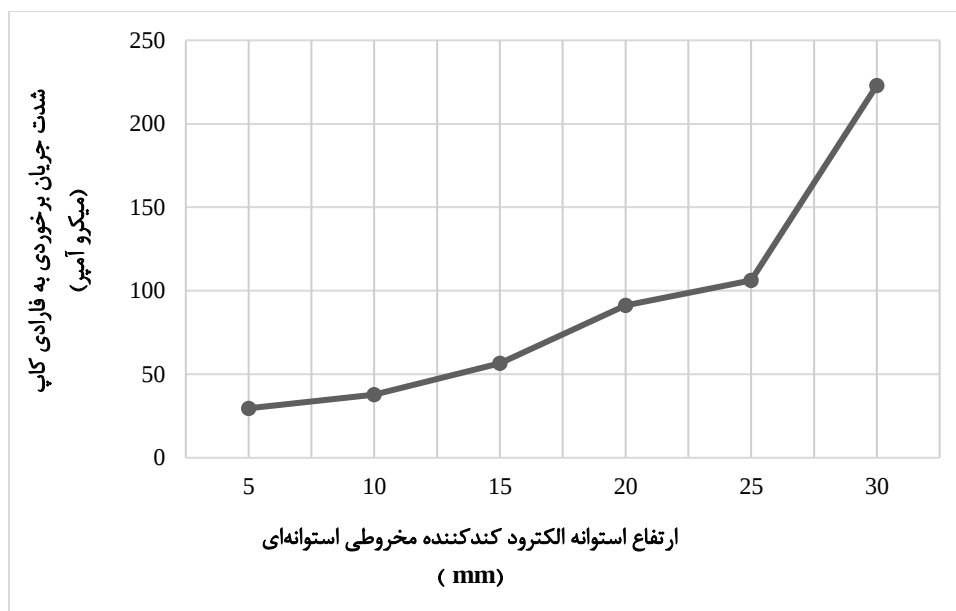


شکل ۳-۲۰ نمودار قطر روزنه الکترود کندکننده مخروطی بر حسب شدت جریان بر خوردهی به FC

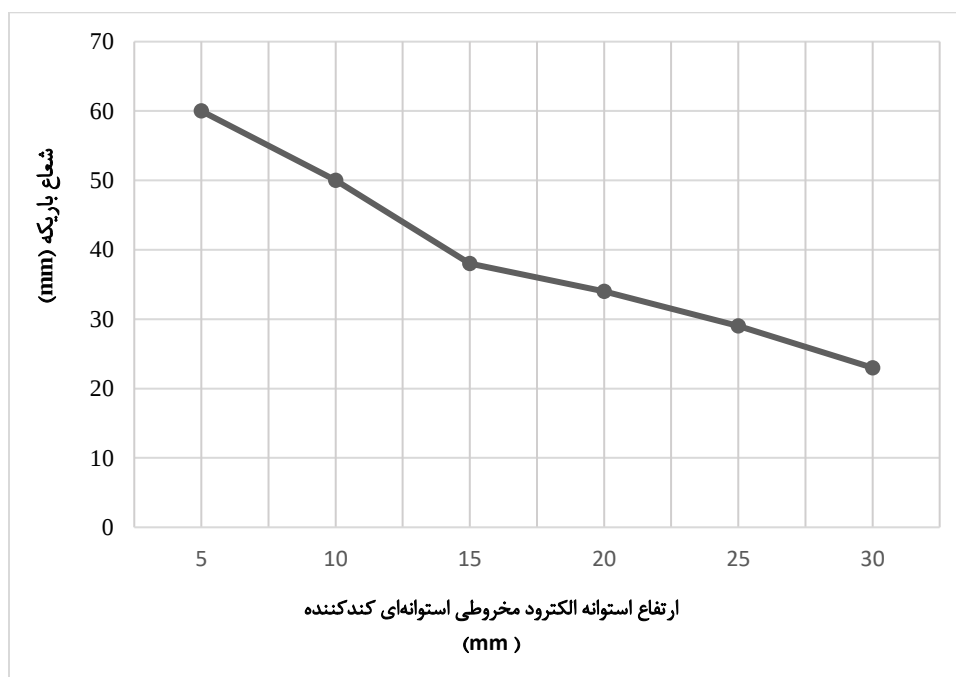
بعد از بررسی داده‌های به دست آمده براساس شبیه سازی به این نتیجه رسیدیم که در قطر روزنه ۵ mm شدت جریان بیشتری را در FC، و همینطور کمترین شعاع باریکه را در ۱۵۰ mm از الکترود کندکننده خواهیم داشت که بر همین اساس قطر روزنه را ۵ mm انتخاب می‌کنیم.

به علت محدودیت در ابعاد و تخلیه الکتریکی، حداکثر ضخامتی که برای دیواره مخروط می‌توان در نظر گرفت ۱mm است و به همین دلیل ابعاد بالاتر از آن مورد بررسی قرار نگرفت.

در مرحله بعدی هندسه مخروطی استوانه‌ای را برای این الکترود بررسی می‌کنیم که نتایج شبیه سازی براساس ارتفاع استوانه در شکل‌های ۳-۲۱ و ۳-۲۲ به دست آمد. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌کنید شدت جریان باریکه با افزایش ارتفاع، افزایش و شعاع باریکه کاهش می‌یابد بنابراین ارتفاع ۳۰ mm در نظر گرفته شد.



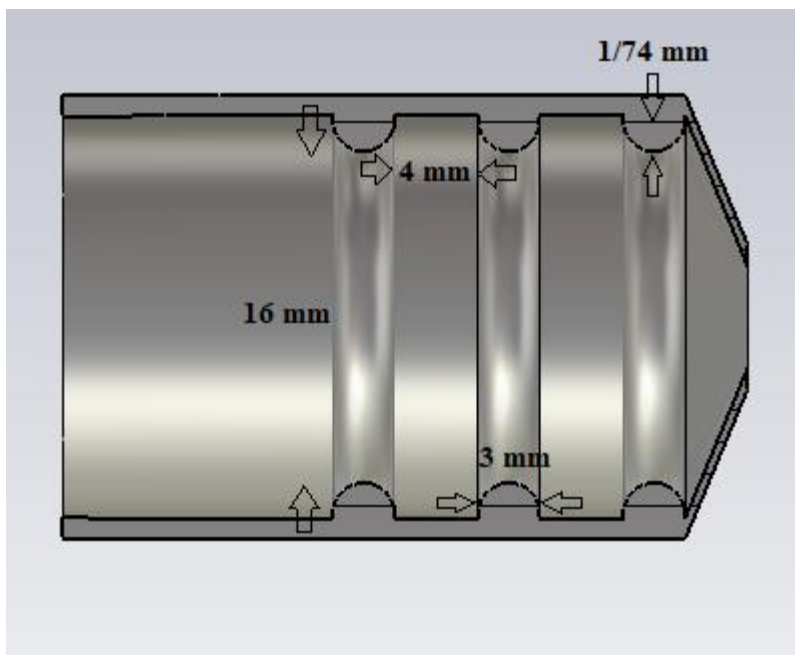
شکل ۳-۲۱ نمودار ارتفاع استوانه الکترود مخروطی استوانه‌ای بر حسب شدت جریان بر خورده به FC



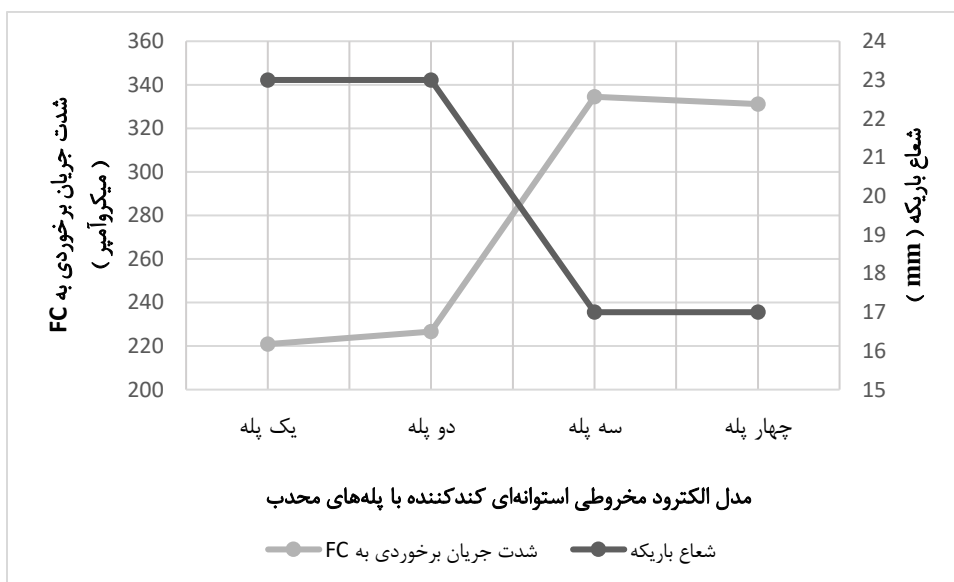
شکل ۳-۲۲ نمودار ارتفاع استوانه الکترود مخروطی استوانه‌ای بر حسب شعاع باریکه در فاصله ۱۵۰ mm

نتایجی که از هندسه مخروطی برای این الکتروود بدست آمد، نسبت به نتایج هندسه مخروطی استوانه‌ای بهتر بود ولی در حضور الکتروود چهارم، نتایج مطلوب نبود و با توجه به اینکه هدف ما در مراحل بعدی قرار دادن الکتروود چهارم است، پس هندسه مخروطی استوانه‌ای را انتخاب کرده و در حضور یک الکتروود دیگر نتایج را با تغییر در هندسه مخروطی استوانه‌ای مورد بررسی قرار می‌دهیم. بعد از این قسمت ولتاژهایی که برای الکتروودها نیز به صورت پیش فرض انتخاب می‌کنیم تغییر کرده و ولتاژ الکتروودهای دوم، سوم و چهارم به صورت پیش فرض به ترتیب برابر ۵۰۰۰- ولت، ۶۰۰- ولت و ۵۵۰۰- ولت در نظر گرفته شده است.

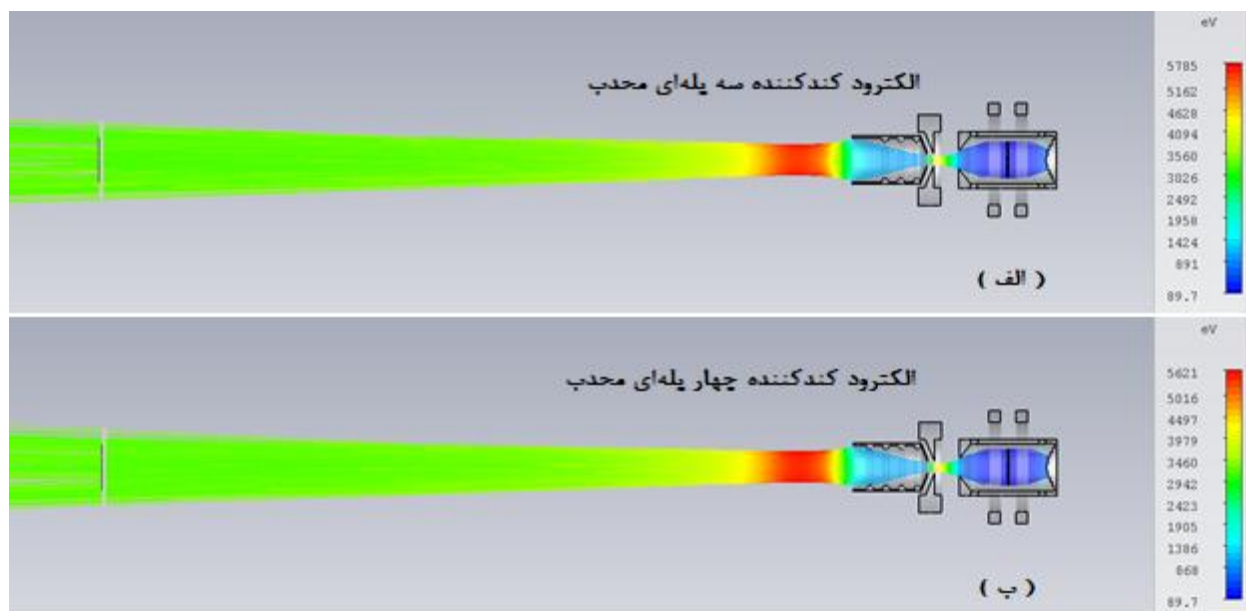
پس از بررسی ارتفاع استوانه، به منظور بررسی تأثیر میدان الکتریکی در همگرا شدن شکل باریکه، در داخل استوانه پله‌هایی به ارتفاع ۲ mm و ضخامت ۲ mm در فاصله‌های ۵ mm از هم قرار داده‌ایم. بیشینه پایداری پتانسیل میان دو الکتروود بدون اینکه بین آنها تخلیه الکتریکی رخ دهد، ولتاژ پایدار تعریف می‌شود. از آنجائیکه لبه الکتروودها محل تجمع بار الکتریکی است، لذا باید از ایجاد لبه‌ها و نقاط نوک تیز در آنها جلوگیری شود. در مرحله بعدی پله‌ها را به صورتی طراحی نمودیم که نقاط نوک تیز رفع شده و از اثر تجمع بارها و ایجاد تخلیه الکتریکی در نقاط نوک تیز جلوگیری شود. ارتفاع استوانه و قطر روزنه الکتروود مشابه با حالت قبلی به ترتیب ۳۰ mm و ۵ mm در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۲۳ الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای با پله‌های محدب و نتایج شبیه سازی را در شکل‌های ۳-۲۴ تا ۳-۲۵ مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۲۳ برش مقطعی الکتروکندکننده مخروطی استوانه‌ای با پله‌های محدب

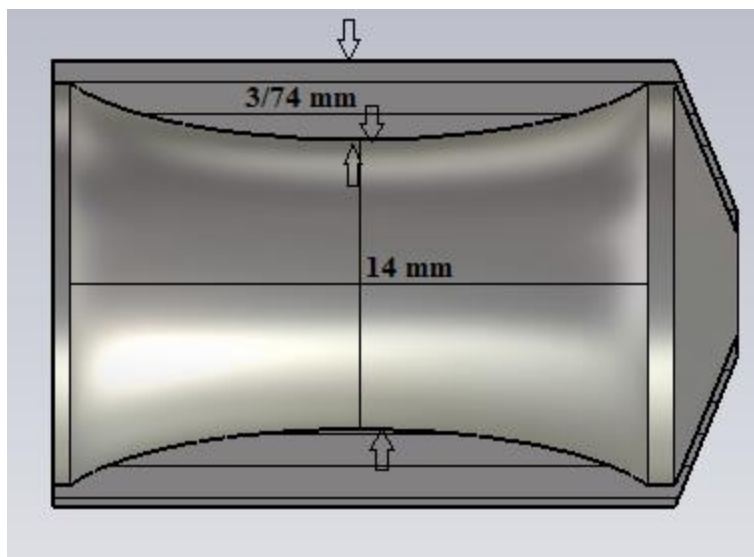


شکل ۳-۲۴ نمودار مدل الکتروکندکننده مخروطی استوانه‌ای با پله‌های محدب برحسب شدت جریان برخوردی به FC و شعاع باریکه

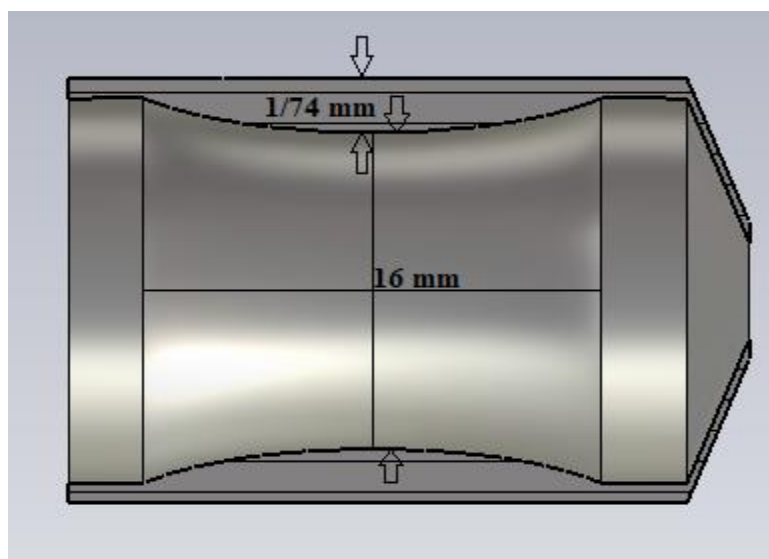


شکل ۳-۲۵ الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای با پله محدب، الف) الکتروود کندکننده سه پله‌ای که باریکه بدون برخورد به پله‌ها از آن خارج می‌شود، ب) الکتروود کندکننده چهار پله‌ای که باریکه به پله چهارم برخورد می‌کند و از آن خارج می‌شود.

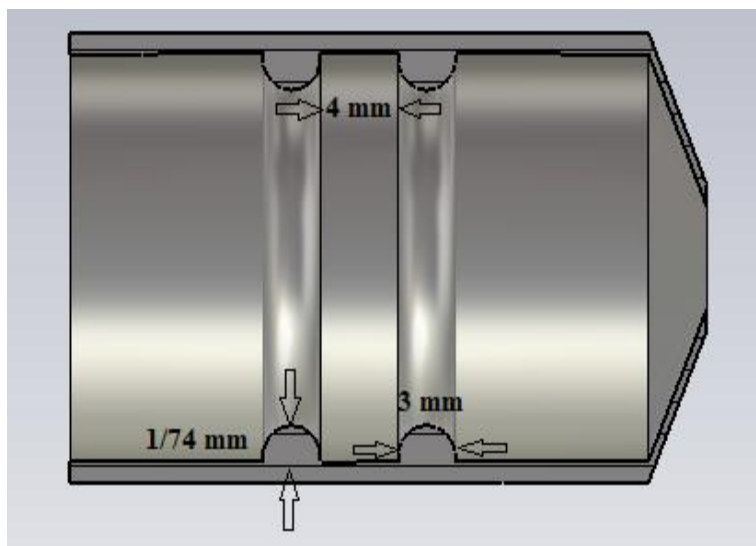
در این مدل همانطور که در شکل ۳-۲۳ تا ۳-۲۵ مشاهده می‌کنید با افزایش تعداد پله‌های محدب، شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ افزایش می‌یابد، تا پله سوم باریکه به الکتروود برخوردی نداشت و شدت جریان برخوردی به الکتروود صفر بود ولی از پله سوم به بعد باریکه به الکتروود برخورد کرده و شدت جریان برخوردی به الکتروود در این قسمت $9/23 \mu A$ بدست آمد، شعاع باریکه نیز در تک پله‌ای و دو پله‌ای بیشتر از دو مدل دیگر و برابر mm ۱۹ و در سه و چهار پله‌ای mm ۱۵ و همچنین انرژی باریکه نیز در سه پله‌ای بیشتر از سایر مدل‌ها و تقریباً برابر 3286 الکترون‌ولت بدست آمد که با توجه به این نتایج نمی‌توان بیشتر از سه پله محدب در این مدل استفاده کرد. برای بررسی تأثیر هندسه و میدان الکتریکی ناشی از این تغییرات بر روی باریکه، الکتروودهای دیگری نیز طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند که در ادامه از شکل ۳-۲۶ تا ۳-۳۲ قابل مشاهده هستند.



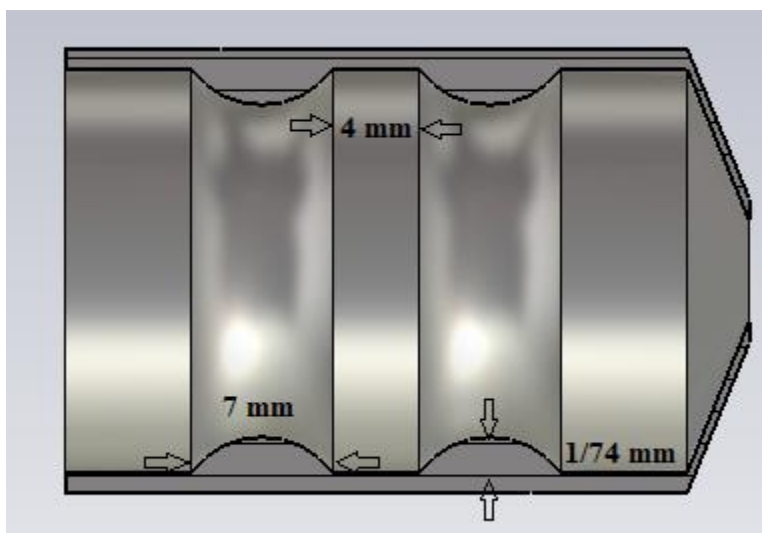
شکل ۳-۲۶ برش مقطعی الکتروود مخروطی استوانه‌ای محدب با شعاع قوس $3/74 \text{ mm}$



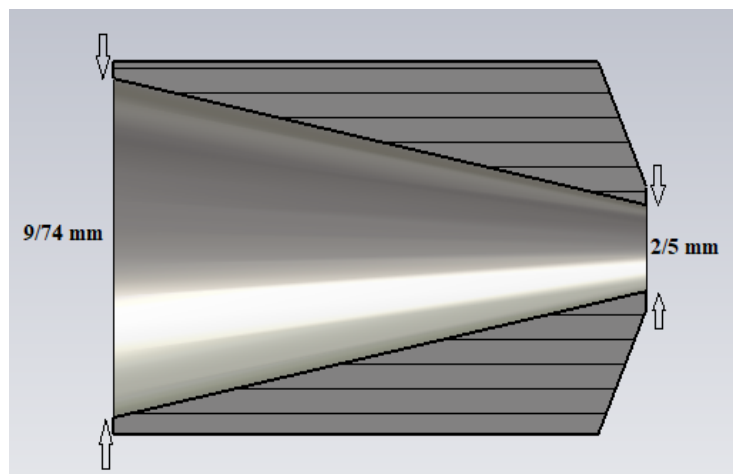
شکل ۳-۲۷ برش مقطعی الکتروود مخروطی استوانه‌ای محدب با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$



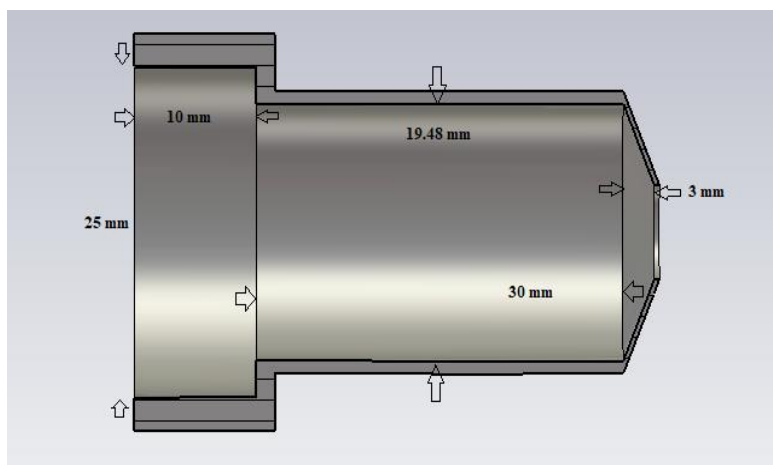
شکل ۳-۲۸ برش مقطعی الکترود مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی با شعاع قوس ۱/۷۴ mm و طول ۳ mm



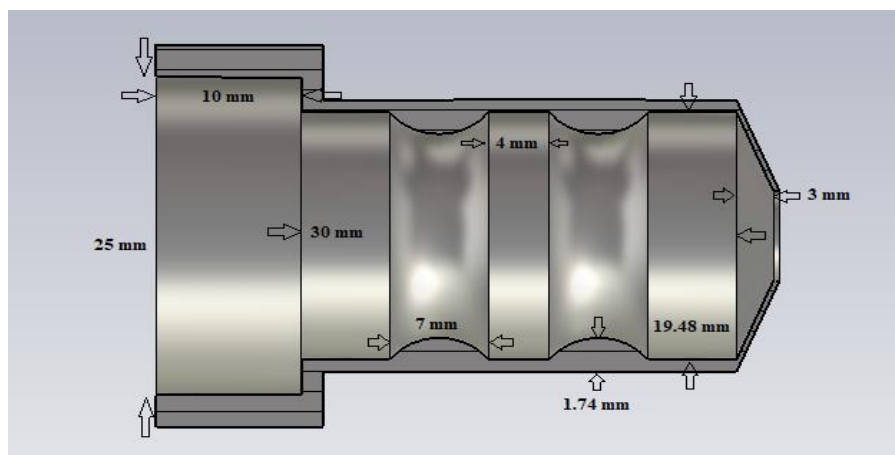
شکل ۳-۲۹ برش مقطعی الکترود مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی با شعاع قوس ۱/۷۴ mm و طول ۷ mm



شکل ۳-۳۰ برش مقطعی الکترومغناطیسی استوانه‌ای قیفی شکل

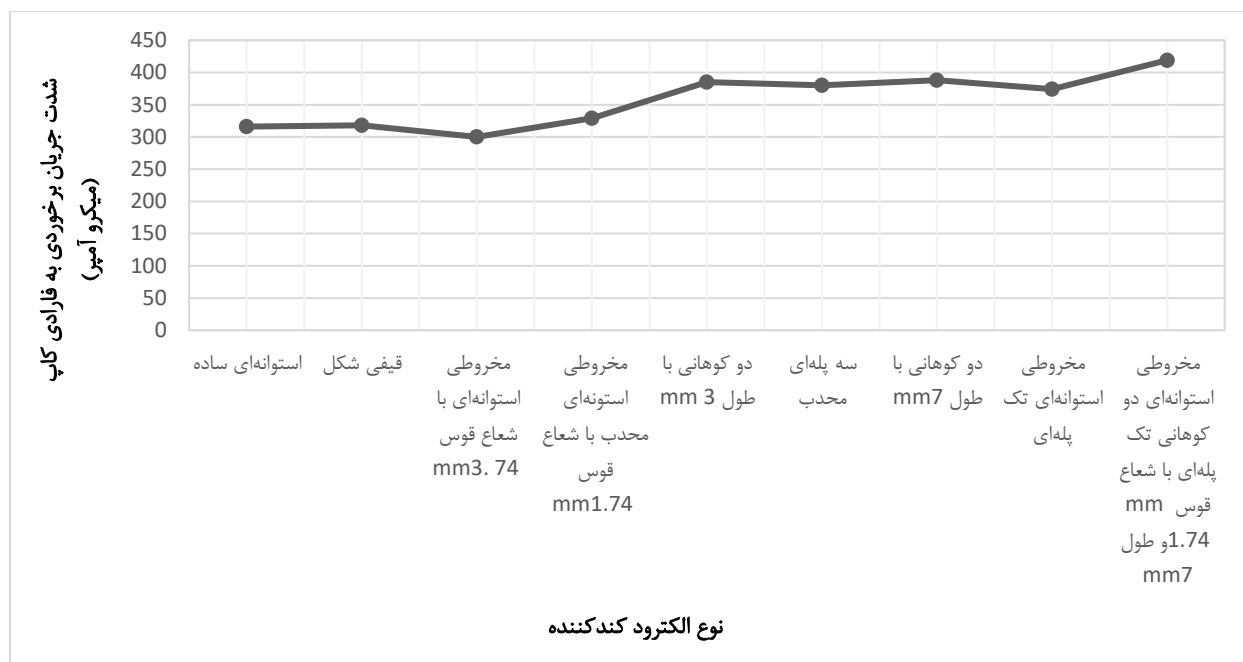


شکل ۳-۳۱ برش مقطعی الکترومغناطیسی استوانه‌ای تک پله‌ای

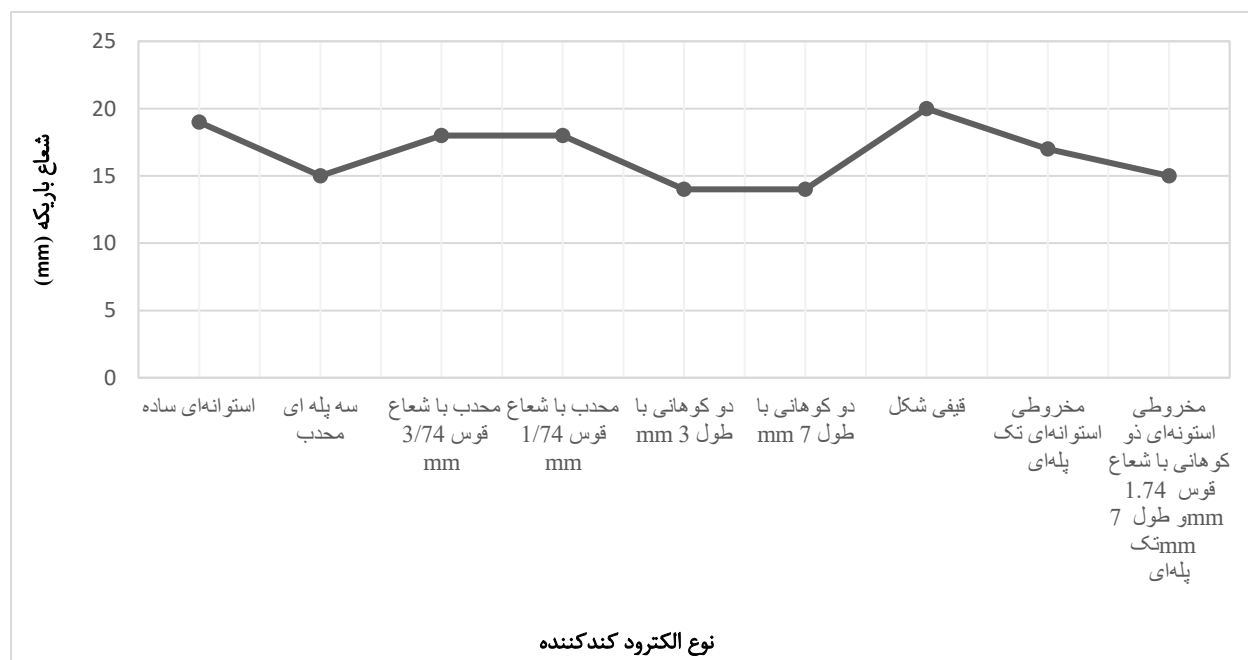


شکل ۳-۳۲ برش مقطعی الکترومغناطیسی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای با شعاع قوس $1/74$ mm و طول 7 mm تک پله‌ای

در شکل‌های ۳-۳۳ و ۳-۳۴ نتایج بدست آمده از هندسه های شبیه سازی شده مختلف برای الکتروود کندکننده قابل مشاهده است.



شکل ۳-۳۳ نمودار شدت جریان برخوردی به FC برحسب نوع الکتروود کندکننده شبیه سازی شده



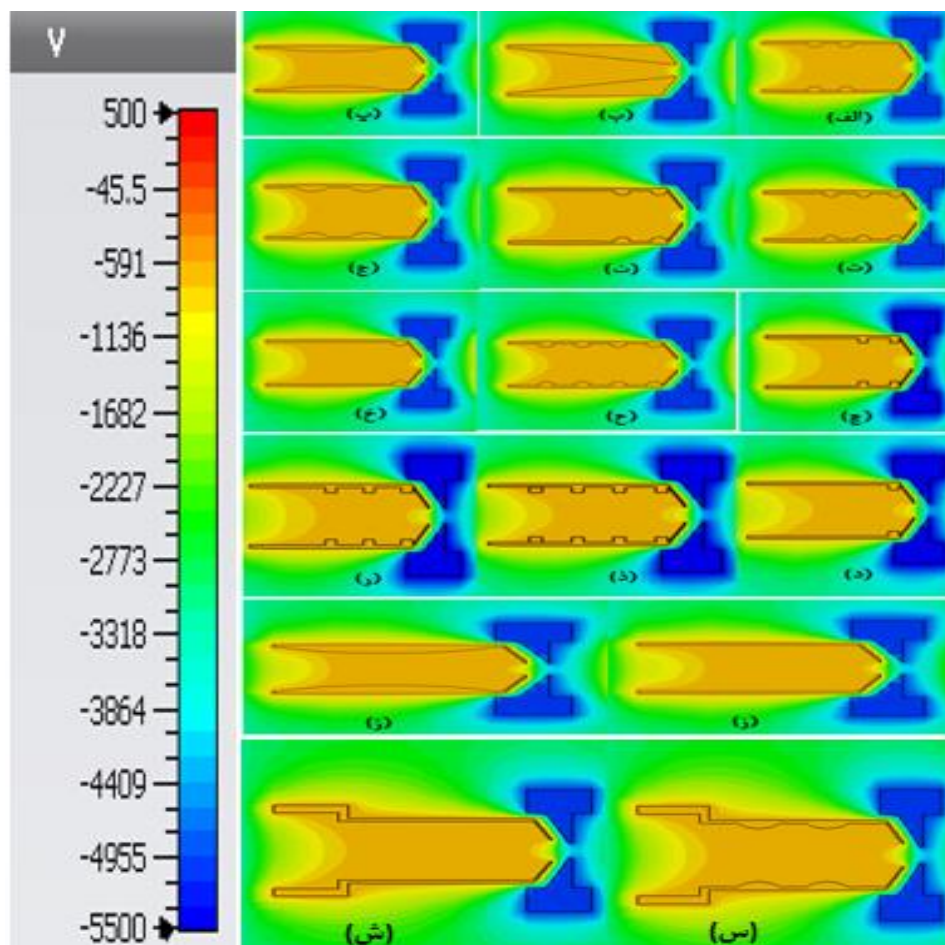
شکل ۳-۳۴ نمودار شعاع باریکه برحسب نوع الکتروود کندکننده شبیه سازی شده

در همه موارد هدف، گرفتن جریان پلاسمایی است که از بدنه اصلی پلاسما به داخل سیستم استخراج جریان می‌یابد و سپس شتاب دادن به آن به صورت یک باریکه موازی، با شدت بالا و قطر کم است. موارد کاربرد نهایی که در چشمه یونی تولید می‌شوند به نوع و طراحی سیستم استخراج و همچنین به ویژگی‌های سیستم اپتیک باریکه که در محیط استخراج شکل می‌گیرد، بستگی دارد که به همین دلیل انتخاب روش مناسب و مطلوب استخراج یون به اندازه ایجاد تجمع بالای ذرات باردار در محیط الکتروود استخراج، اهمیت دارد. هندسه بیرونی الکتروودها در توزیع پتانسیل محوری درون سیستم تأثیری ندارد، بلکه پتانسیل محوری را هندسه داخلی الکتروودها تعیین می‌کند که این تغییرات و نتایج آنها در این فصل بیان گردید.

از خطوط میدان الکتریکی در اطراف الکتروودها می‌توان نتیجه گرفت که زمانی که یون‌ها خارج از محوراستخراج قرار می‌گیرند جدا از نیروی محوری، نیرویی نیز در راستای شعاعی احساس می‌کنند که این نیرو اثر کانونی‌کنندگی را ایجاد می‌کند، یعنی ذراتی که حرکتشان کاملاً متقارن نیست توسط مؤلفه عمودی میدان به سمت محوراستخراج الکتروود رانده خواهند شد.

پس از بررسی نتایج بدست آمده، مدل مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای با شعاع قوس $1/74 \text{ mm}$ و طول 7 mm به عنوان هندسه نهایی برای طراحی و ساخت الکتروود کندکننده انتخاب گردید. این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های طراحی شده انرژی و شعاع باریکه و همچنین شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ بهینه تری دارد، میزان شدت جریان برخوردی به الکتروود نیز بسیار کم و حدود $0/88 \mu A$ است که می‌توان از آن صرف نظر کرد.

سطوح هم‌پتانسیل مدل‌های مختلف الکتروودهای استخراج طراحی و شبیه سازی شده در نرم افزار CST در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است.

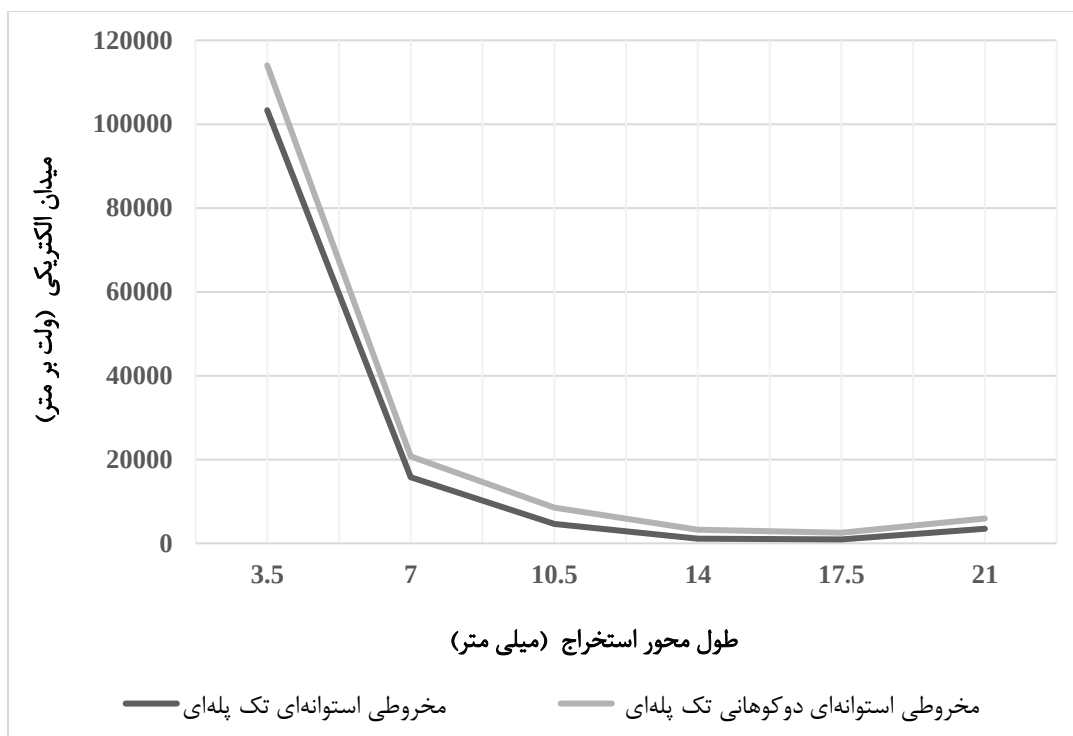


شکل ۳-۳۵ سطوح هم‌پتانسیل الکترودهای کندکننده شبیه سازی شده در نرم افزار CST، (الف) دوکوهانی با طول ۳ mm،

(ب) قیفی شکل، (پ) محدب با شعاع قوس ۱/۷۴ mm، (ت و ث) سه پله و دو پله محدب، (ج) دوکوهانی با طول ۷ mm،

(چ) دو پله ای (ح و خ) چهار و یک پله محدب، (د، ذ و ر) یک، چهار و سه پله ای، (ز) استوانه‌ای ساده، (ژ) محدب با شعاع قوس

۳/۷۴ mm (س) مخروطی استوانه‌ای دوکوهانی تک پله‌ای و (ش) مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای



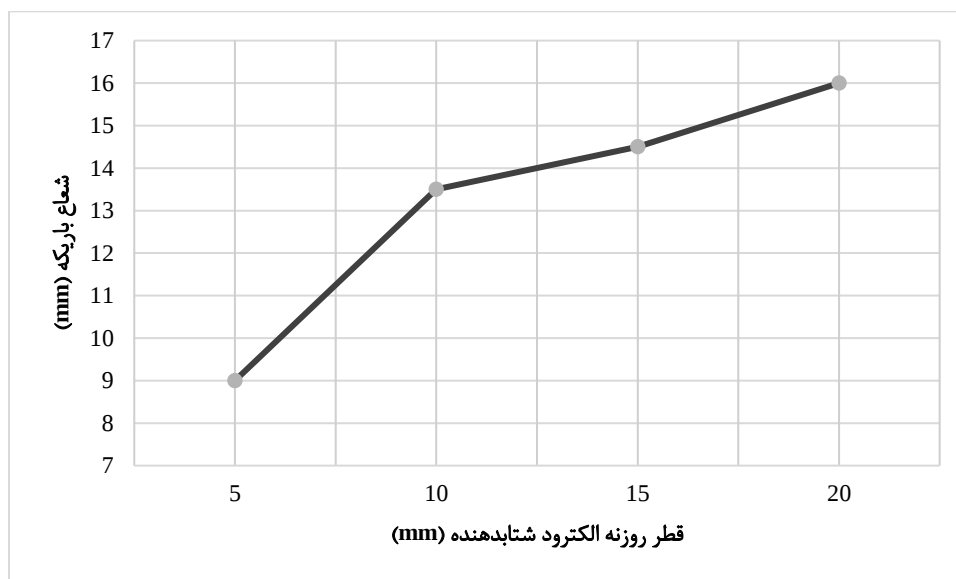
شکل ۳-۳۶ نمودار میدان الکتریکی بر حسب طول محور استخراج الکتروود کندکننده

طبق نمودار شکل ۳-۳۶ با توجه به تغییراتی که در هندسه الکتروود کندکننده اعمال شده است میدان الکتریکی در مدل مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای نسبت به مدل مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای افزایش یافته است.

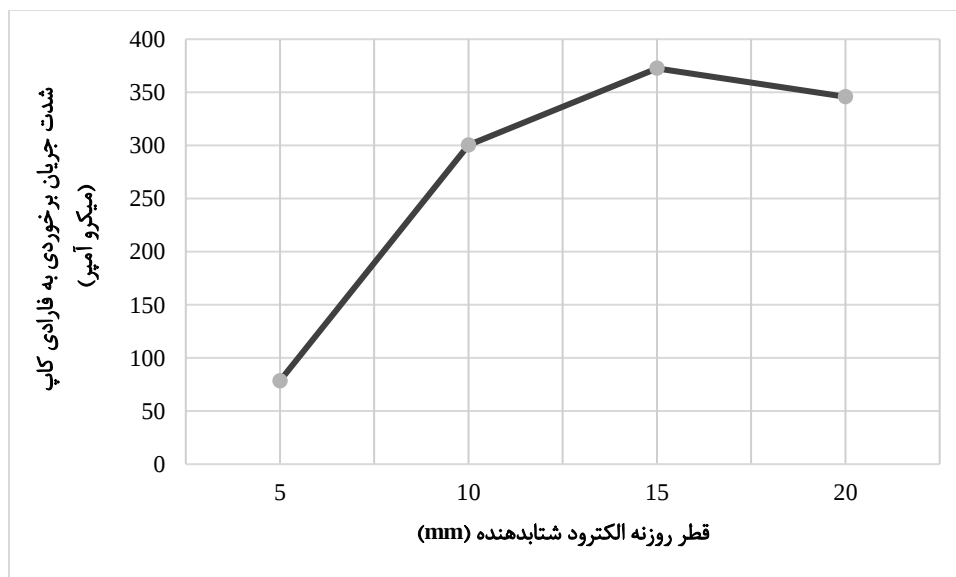
۳-۲-۳ شبیه سازی الکتروود شتابدهنده

به صورت پیش فرض هندسه استوانه‌ای ساده با قطر خارجی ۲۵ mm و به پتانسیل ۵۵۰۰- ولت در نظر می‌گیریم. حال به بررسی قطر روزنه الکتروود شتابدهنده می‌پردازیم و قطر روزنه را از ۵ mm تا ۲۰ mm بررسی کردیم و نتایج به صورت شکل‌های ۳-۳۷ و ۳-۳۸ به دست آمد.

طبق نتایج به دست آمده به ازای قطر روزنه بالاتر از ۱۵ mm باریکه به الکتروود برخورد نمی‌کند اما شدت جریان در این قطر از ۲۰ mm بیشتر است و در نتیجه انتخاب نهایی برای قطر روزنه الکتروود شتابدهنده استوانه‌ای ساده ۱۵mm خواهد بود.



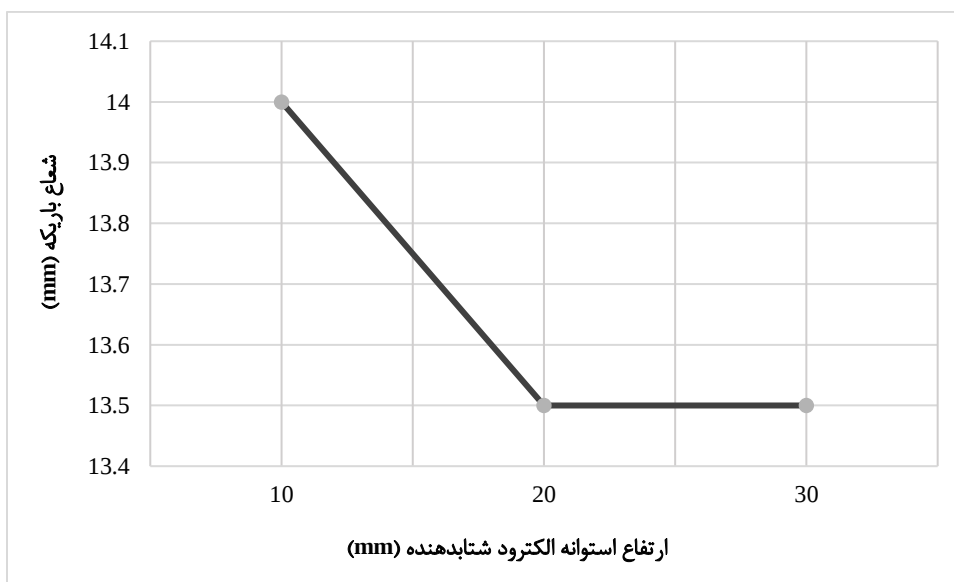
شکل ۳-۳۷ نمودار قطر روزنه الکتروود شتابدهنده برحسب شعاع باریکه



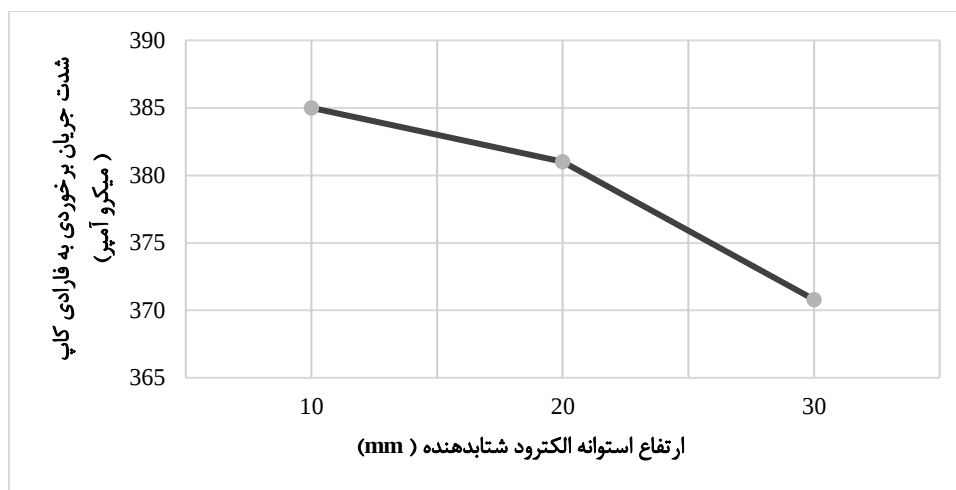
شکل ۳-۳۸ نمودار قطر روزنه الکتروود شتابدهنده برحسب شدت جریان برخوردی به FC

در گام بعدی قطر خارجی الکتروود را در ابعاد ۱۷ mm تا ۲۰ mm بررسی می‌کنیم و مطابق با نتایج بدست آمده، شدت جریان برخوردی به FC تغییر چندانی نمی‌کند و همچنین شدت جریان برخوردی به الکتروود شتابدهنده نیز در تمام نقاط صفر است. شعاع باریکه نیز در تمام نقاط مقدار یکسان و بدون تغییری داشت، همچنین انرژی باریکه نیز در ۱۷ mm حدود ۶ الکترون ولت بیشتر از مقدار آن در ۲۰ mm است و تغییر چندانی نداشته است. با توجه به نتایج به دست آمده به این نتیجه می‌رسیم که قطر خارجی تأثیر زیادی در نتایج نخواهد داشت و به منظور سهولت در ساخت، قطر خارجی را ۲۰ mm در نظر می‌گیریم.

بعد از بررسی قطر خارجی به بررسی ارتفاع استوانه در ابعاد ۱۰ mm تا ۳۰ mm می‌پردازیم که نتایج در شکل‌های ۳-۳۹ و ۳-۴۰ مشاهده می‌کنید. طبق نتایج به دست آمده شدت جریان در ارتفاع ۱۰ mm به اندازه $4 \mu A$ از شدت جریان بدست آمده در ارتفاع ۲۰ mm بیشتر است، اما سایر پارامترها در ۲۰ mm از ابعاد دیگر بهتر و بهینه تر است و بر همین اساس ارتفاع استوانه را ۲۰ mm انتخاب شده است.

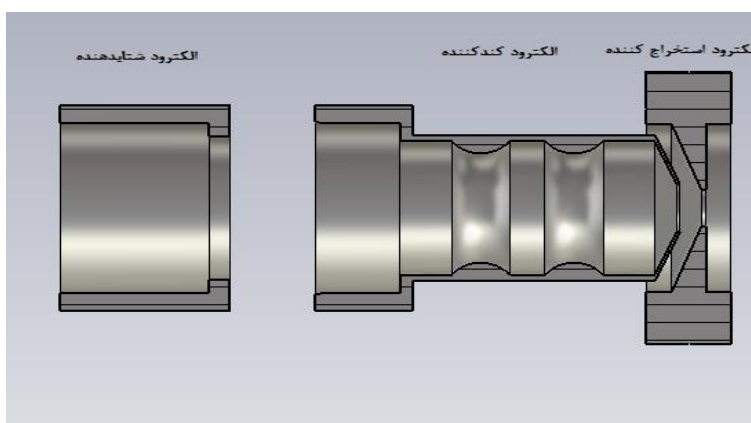


شکل ۳-۳۹ نمودار ارتفاع استوانه الکتروود شتابدهنده استوانه‌ای بر حسب شعاع باریکه



شکل ۳-۴۰ نمودار ارتفاع استوانه الکترود شتابدهنده استوانه‌ای بر حسب شدت جریان برخوردی به FC

در مرحله بعد فاصله این الکترود را از الکترود کندکننده در فاصله‌های ۵ mm تا ۱۵ mm مورد بررسی قرار می‌دهیم و طبق نتایج به دست آمده در فاصله ۱۵ mm الکترود شتابدهنده از الکترود کندکننده، باریکه به الکترود شتابدهنده برخورد می‌کند و انرژی باریکه و شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ در فاصله ۱۵۰ mm کاهش می‌یابد و شعاع باریکه نیز در ۵ mm و ۱۵ mm بیشتر از ۱۰ mm است و به همین دلیل فاصله الکترود شتابدهنده از الکترود کندکننده را ۱۰ mm انتخاب می‌کنیم. در شکل ۳-۴۱ سیستم استخراج شبیه سازی شده برای چشمه یونی پنینگ را مشاهده می‌کنید.



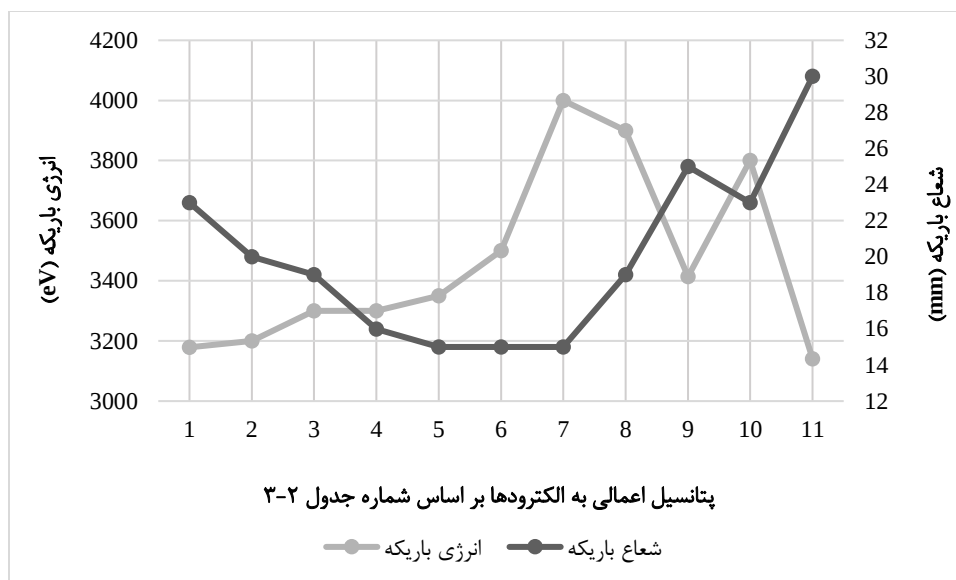
شکل ۳-۴۱ برش مقطعی از سیستم استخراج شبیه سازی شده چشمه یونی پنینگ

پس از نتیجه گیری در مورد هندسه نهایی الکترودها نوبت به انتخاب پتانسیل مناسب الکترودها در حالتی که تمام الکترودها در کنار یکدیگر قرار دارند، می‌رسد. نتایج بررسی پتانسیل الکترودها به صورت جدول ۲-۳ است.

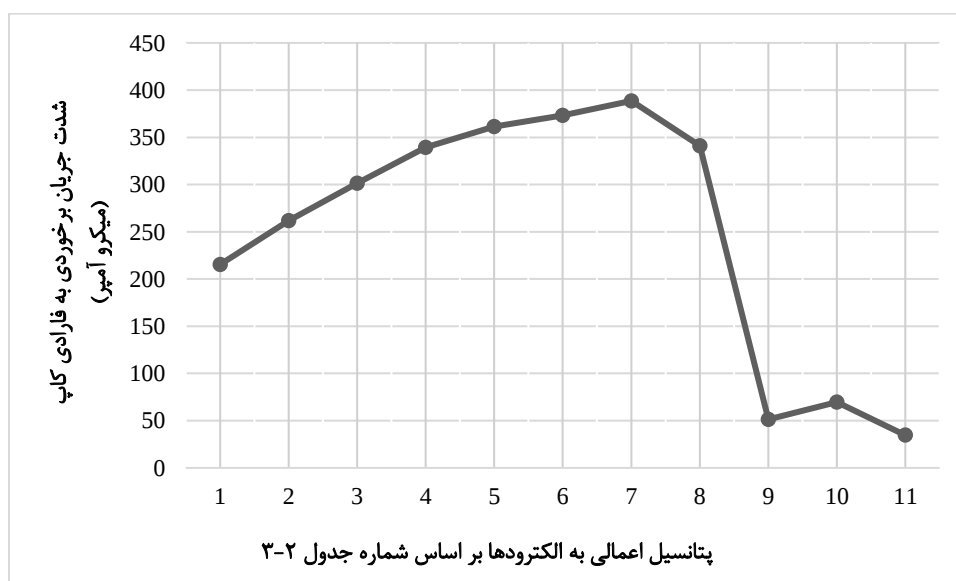
جدول ۲-۳ نتایج بررسی پتانسیل‌های اعمالی به الکترودها

شماره	V_2 (V)	V_3 (V)	V_4 (V)	انرژی (eV)	شعاع (mm)	شدت جریان برخوردی FC (μA)	شدت جریان برخوردی به الکترودها دوم (μA)	شدت جریان برخوردی به الکترودها سوم (μA)	شدت جریان برخوردی به الکترودها چهارم (μA)
۱	-۲۰۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۱۷۹	۲۳	۲۱۵/۴	۰	۰/۵۴۲۴	۰
۲	-۲۵۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۲۰۰	۲۰	۲۶۱/۹	۰	۰/۵۴۲۴	۰
۳	-۳۰۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۳۰۰	۱۹	۳۰۱/۴	۰	۰	۰
۴	-۳۵۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۳۰۰	۱۶	۳۳۹/۴	۰	۰	۰
۵	-۴۰۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۳۵۰	۱۵	۳۶۱/۳	۰	۰	۰
۶	-۴۵۰۰	-۶۰۰	-۵۰۰۰	۳۵۰۰	۱۵	۳۷۳/۳	۰	۰	۰
۷	-۵۰۰۰	-۶۰۰	-۵۵۰۰	۴۰۰۰	۱۵	۳۴۱/۲	۰	۰	۰
۸	-۵۰۰۰	-۶۰۰	-۶۰۰۰	۳۹۰۰	۱۹	۳۸۸/۶	۰	۰	۰
۹	-۵۰۰۰	-۱۲۰۰	-۵۵۰۰	۳۴۱۴	۲۵	۵۱/۳۳	۰	۰	۷۷/۴۷
۱۰	-۵۰۰۰	-۱۲۰۰	-۶۰۰۰	۳۸۰۰	۲۳	۶۹/۵	۰	۰	۲۷/۶۲
۱۱	-۴۵۰۰	-۱۲۰۰	-۵۰۰۰	۳۱۴۱	۳۰	۳۴/۵۹	۰	۰	۱۴۰/۷

در تمام حالات نسبت $\left| \frac{V_i}{V_1} \right| > 1$ رعایت شده است.



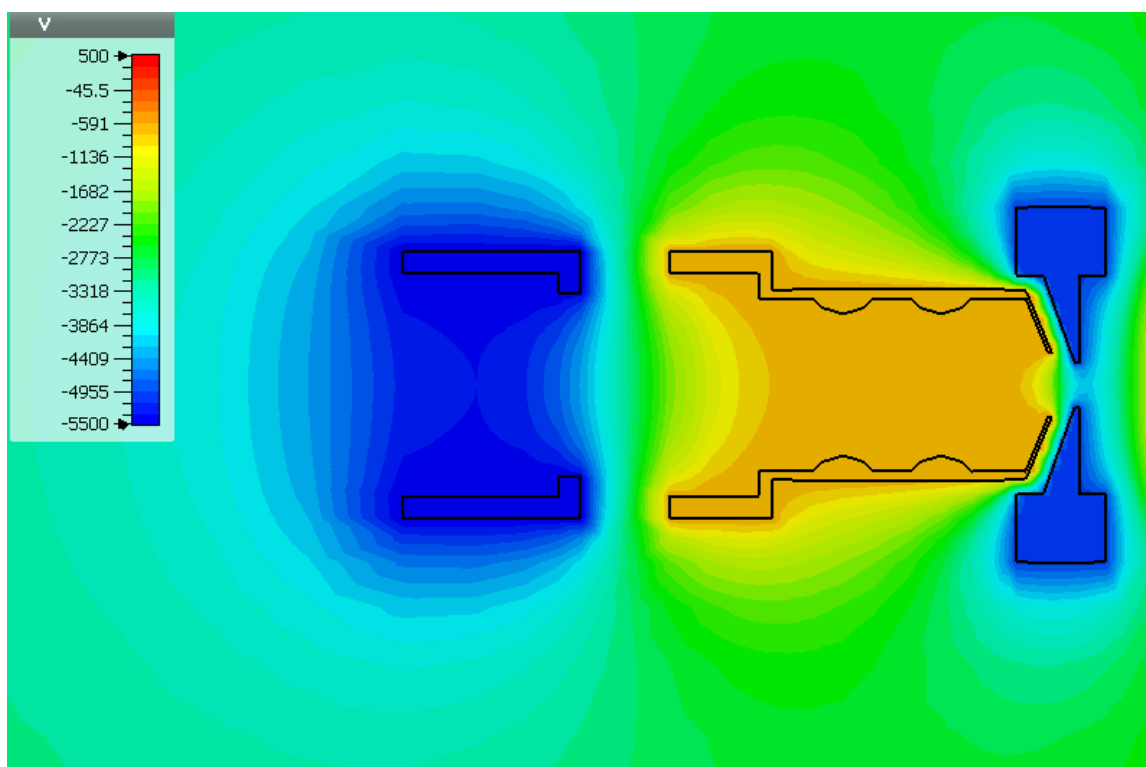
شکل ۳-۴۲ پتانسیل اعمالی به الکترودها بر حسب شعاع و انرژی باریکه



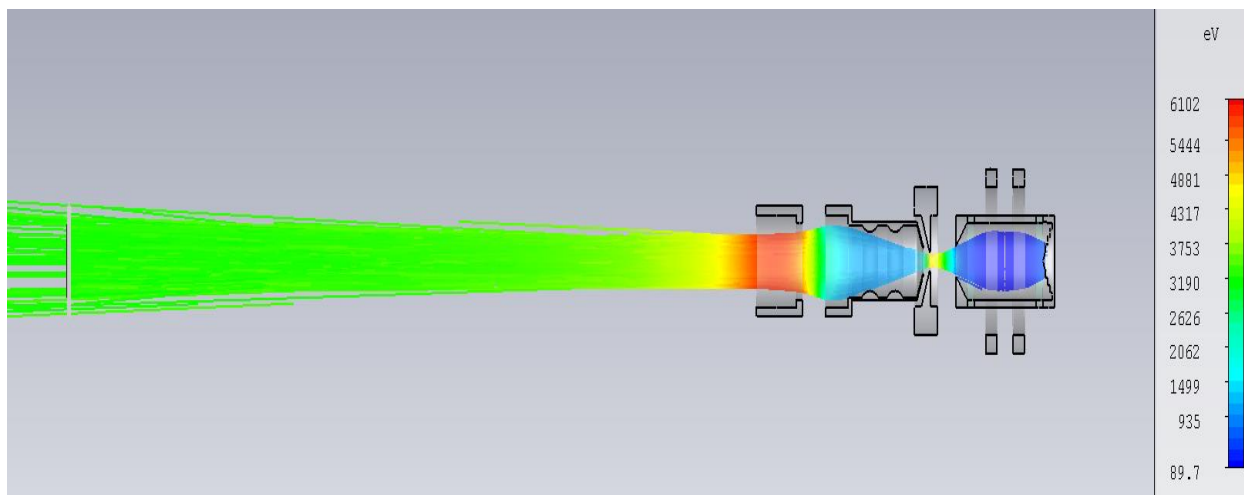
شکل ۳-۴۳ پتانسیل اعمالی به الکترودها بر حسب شدت جریان برخوردی به FC

طبق نتایج جدول ۳-۲ و شکل‌های ۳-۴۲ و ۳-۴۳ به این نتیجه رسیدیم که پتانسیل الکترود استخراج در ۵۰۰- ولت ، پتانسیل الکترود کندکننده در ۶۰۰- ولت و پتانسیل الکترود شتابدهنده در ۵۵۰- ولت بهینه‌ترین شرایط اپتیک باریکه را به ما می‌دهند. در این پتانسیل‌ها میزان شدت جریان برخوردی به الکترودها صفر و میزان شدت

جریان برخوردی به FC در بیشینه ترین حالت خود قرار دارد. همچنین انرژی باریکه نسبت به سایر نقاط بیشتر و شعاع باریکه نیز در بهینه ترین حالت است. در شکل‌های ۴۴-۳ و ۴۵-۳ به ترتیب شکل خطوط هم‌پتانسیل الکترودهای شبیه سازی سیستم استخراج و باریکه نهایی بعد از شبیه سازی الکترودها و با اعمال پتانسیل‌های مناسب نشان داده شده است.



شکل ۴۴-۳ خطوط هم پتانسیل الکترودهای شبیه سازی شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ



شکل ۳-۴۵ شکل باریکه نهایی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ شبیه سازی شده

۳-۳ نتیجه گیری

طبق شبیه سازی های صورت گرفته، ابعاد الکترودهای تشکیل دهنده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ را مورد بررسی قرار دادیم و با طراحی جدید و اعمال پتانسیل مناسب به الکترودها و شبیه سازی الکترودهای استخراج، کندکننده و شتابدهنده یک سیستم استخراج چهار الکترودی را به دست آوردیم که نسبت به سایر سیستم های استخراج، اپتیک باریکه را در شرایط بهینه و مناسب تری انجام می دهد. در مقایسه با سیستم تریودی، یک سیستم تترودی (چهار الکترودی) دارای مزایایی است:

- یک ترکیب مناسب از میزان پروانس باریکه P و $\frac{\Gamma}{f}$ می تواند باریکه ای با حداقل واگرایی ایجاد کند. در اینجا Γ نسبت ولتاژ و f نسبت روزنه ها است.
- توانایی نگهداری ولتاژ بالا را دارد.
- با افزایش Γ ، میزان پروانس بهینه افزایش می یابد و این برای چشمه ای با نوسانات تراکم پلاسما و یا عدم یکنواختی بارفضایی مطلب است.

دلیل فیزیکی این مزایا این است که وقتی $\frac{F}{f} > 1$ باشد در اینصورت عدسی دوم همگراکننده و هلال ساطع کننده یون محدب است و بنابراین اثرات انحراف کمتر خواهد بود.

فصل چهارم: مدلسازی و ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پینک

۴-۱ مقدمه

مدلسازی مرحله‌ای بین طراحی و شبیه سازی و ساخت است و در حقیقت آخرین مرحله قبل از شروع به ساخت سیستم طراحی شده می‌باشد که برای این منظور در این پروژه از نرم افزار SolidWorks استفاده کرده‌ایم. مدلسازی در این نرم افزار به منظور نحوه صحیح قرار گرفتن اجزای شبیه سازی شده در نرم افزار CST، کنار یکدیگر و با رعایت تمام اصول فیزیکی و ابعاد و هندسه مدنظر در شبیه سازی‌های صورت گرفته انجام می‌شود. این نرم افزار دارای سه محیط به نام‌های Part^{۲۷}، Assembly^{۲۸} و Drawing^{۲۹} می‌باشد. محیط اول برای رسم قطعه بوده، در محیط دوم قطعات یک مکانیسم بر روی هم سوار شده و در محیط آخر از آنها نقشه مهندسی برای نسخه چاپی تهیه می‌شود که در ادامه مدلسازی‌های صورت گرفته برای الکترودها و عایق‌ها جهت ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

۴-۲ مدلسازی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ

براساس شبیه سازی‌های انجام شده در فصل قبل، در ادامه موارد زیر را مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۱- مدلسازی و ساخت الکترودهای استخراج، کندکننده و شتابدهنده

۲- مدلسازی و ساخت عایق بین الکترودها

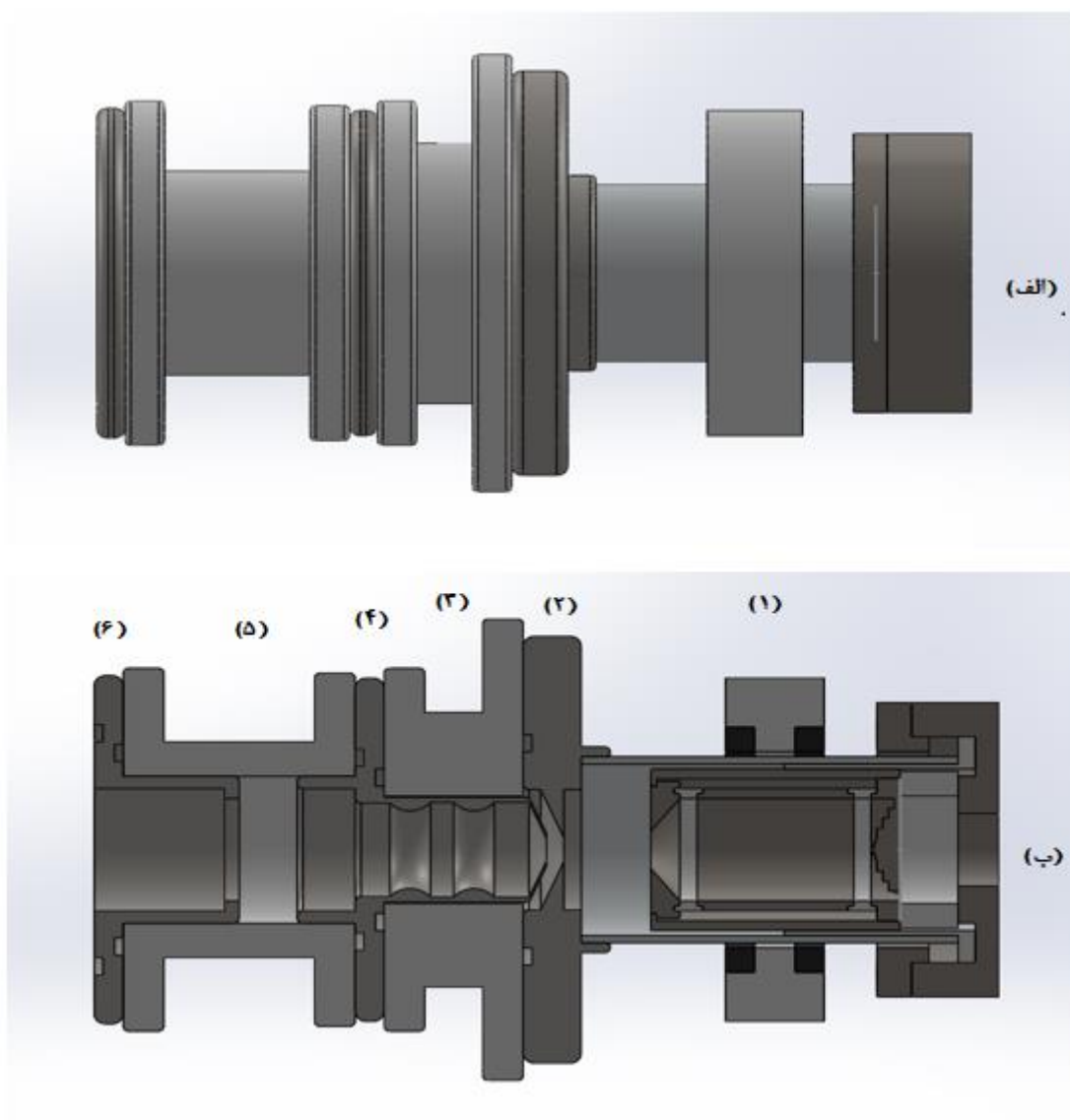
۳- قطعه تفلونی T شکل و فنجان فارادی

شکل ۴-۱ مدلسازی طرح انتخابی برای ساخت سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ در نرم افزار SolidWorks را نشان می‌دهد که در ادامه در مورد هریک از اجزا توضیح داده شده است.

^{۲۷} قطعه

^{۲۸} مونتاژ

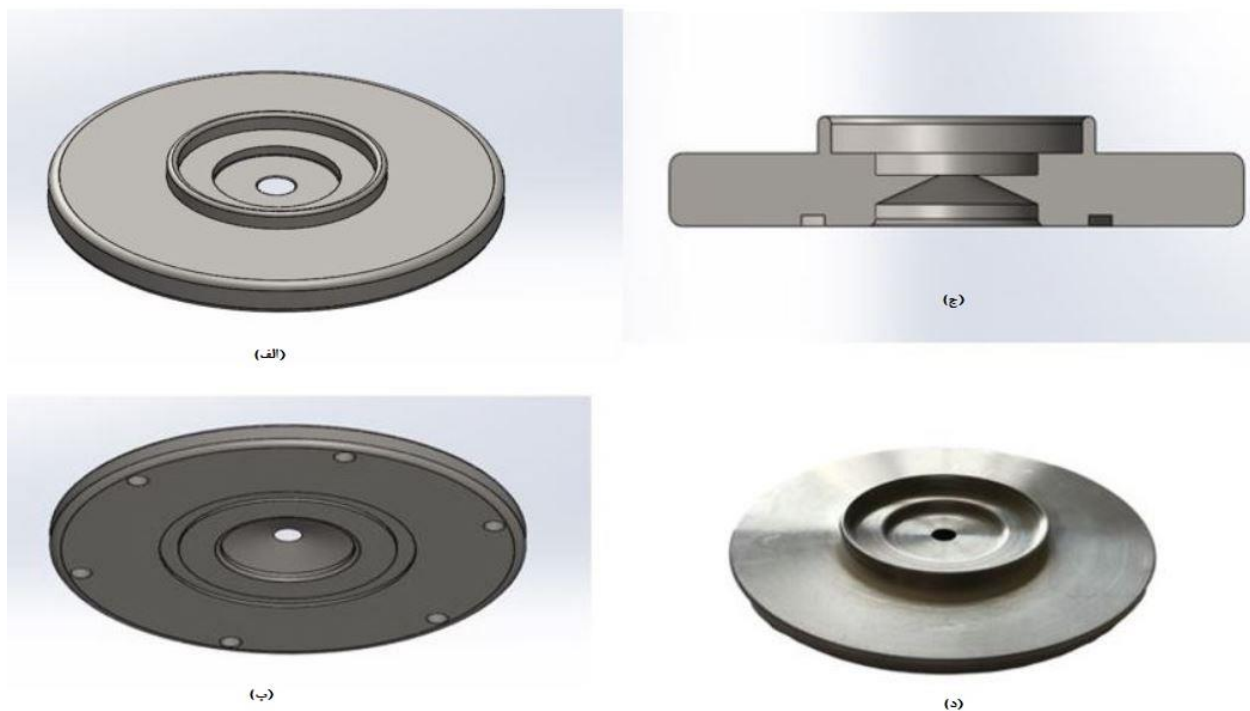
^{۲۹} نقشه کشی



شکل ۴-۱ (الف) طرح اتاقک یونش و سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ مدلسازی شده برای ساخت، (ب) برش مقطعی از طرح اتاقک یونش و سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ مدلسازی شده برای ساخت، (۱) مجموعه اتاقک یونش، (۲) الکتروود استخراج کننده، (۳) عایق بین الکتروود استخراج و الکتروود کندکننده، (۴) الکتروود کندکننده، (۵) عایق بین الکتروود کندکننده و الکتروود شتابدهنده، (۶) الکتروود شتابدهنده

۴-۲-۱ مدل‌سازی و ساخت الکتروود استخراج

در شکل ۲-۴ مدل‌سازی الکتروود استخراج نهایی در نرم افزار SolidWorks نشان داده شده است. در سطح الکتروود استخراج که به سمت اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ است، یک پله برای قرار گرفتن شیشه پیرکس که رابط بین اتاقک یونش و الکتروود دوم است و در سمت دیگر فرو رفتگی برای قرار گرفتن اورینگ^{۳۰} و در اطراف سطح الکتروود جای شش عدد پیچ در نظر گرفته‌ایم که در فصل ۵ هدف از این تغییرات به صورت کلی توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲-۴ طرح الکتروود استخراج (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د)

در انتخاب جنس مورد نظر جهت ساخت الکتروودها، نگیر بودن، وزن و قیمت آلیاژ فلزی انتخابی حائز اهمیت است که با توجه به در نظر گرفتن این موارد، از آلومینیوم برای ساخت الکتروودها استفاده شد. به منظور استفاده نکردن

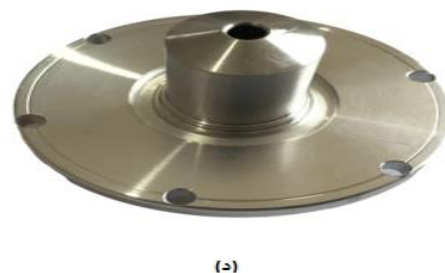
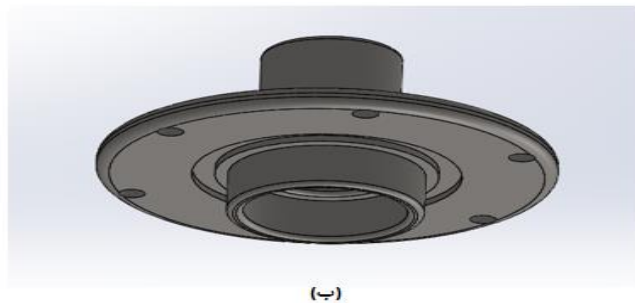
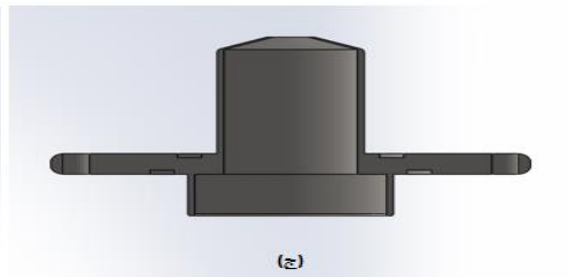
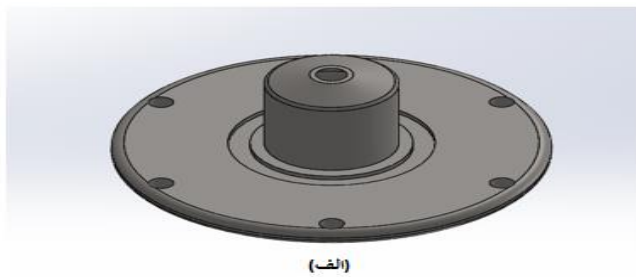
^{۳۰} O-ring

از مهره، در داخل، روزنه‌هایی که برای قرار گرفتن پیچ در نظر گرفته‌ایم قلاویز شده و همچنین برای جلوگیری از خوردگی آلیاژ آلومینیوم توسط پیچ، داخل روزنه‌ها هلی‌کوئل^{۳۱} قرار داده‌ایم. یکی از مشکلات رایج در صنایع این است که بعد از مدتی رزوه‌های مادگی خورده شده و از بین می‌روند و برای اصلاح آن نیز کارهای مختلفی انجام می‌دهند که می‌توان جوشکاری، قلاویزکاری مجدد و مواردی دیگر را نام برد که هر کدام از این روش‌ها مشکلات خودشان را دارند، ضمن اینکه باعث اتلاف وقت و هزینه‌های اضافی می‌شوند. در برخی موارد نیز امکان انجامشان وجود ندارد و به منظور حل این مشکلات می‌توان از هلی‌کوئل استفاده نمود. هلی‌کوئل رزوه‌های مادگی هستند که طبق استانداردهای بین‌المللی ساخته شده‌اند و به راحتی جایگزین رزوه‌های مادگی از بین رفته می‌شوند. به عبارت دیگر مغزی هلی‌کوئل مفتولی با جنس فولاد ضد زنگ بوده که به صورت فنر پیچیده شده و قابلیت جایگزین کلیه رزوه‌های مادگی میلیمتری و اینچی موجود در جهان را دارا است. ابعاد و هندسه الکترودهای شبیه سازی شده را در شکل ۳-۱۵ قابل مشاهده است.

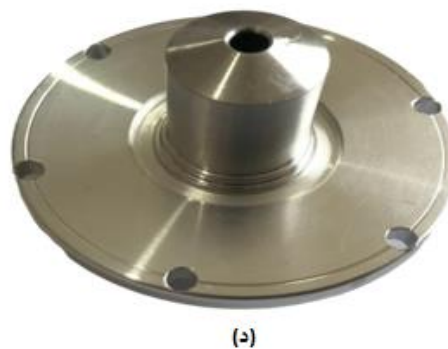
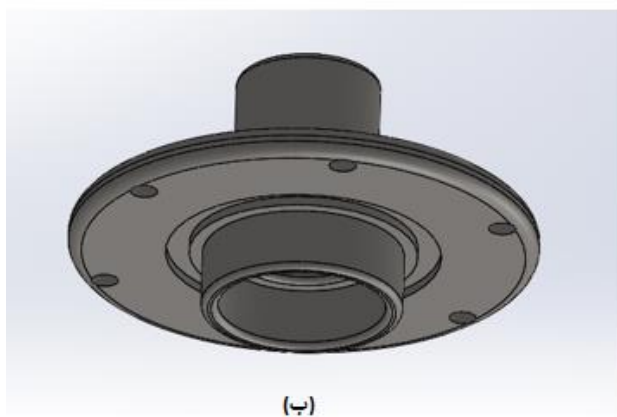
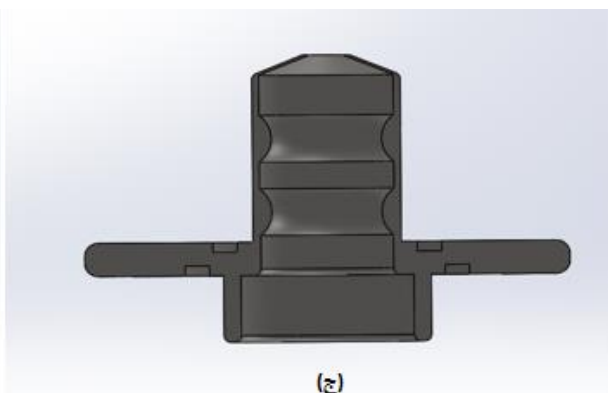
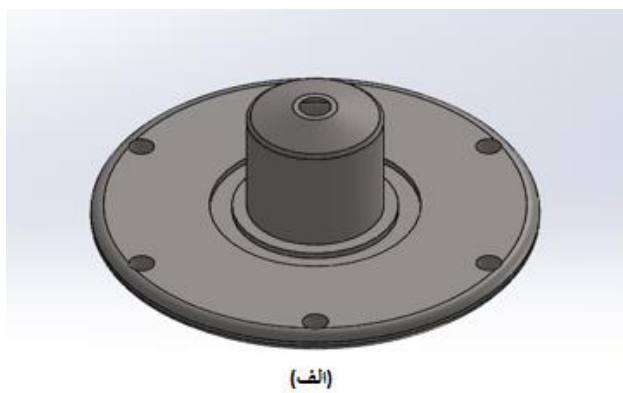
۴-۲-۲ مدل‌سازی و ساخت الکتروده کندکننده

در فصل قبل مدل‌های مختلف الکتروده کندکننده را در ابعاد و هندسه‌های مختلف شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده الکتروده مخروطی استوانه‌ای دوکوهانی تک پله‌ای نسبت به سایر مدل‌های طراحی شده انرژی و شعاع باریکه و همچنین شدت جریان برخوردی به فارادی کاپ بهینه تری دارد. هدف بررسی دو مدل الکتروده کندکننده دوکوهانی تک پله‌ای و الکتروده مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای به صورت تجربی می‌باشد. به این منظور این دو طرح را جهت ساخت مدل‌سازی کرده‌ایم. در شکل ۴-۳ و ۴-۴ به ترتیب مدل‌سازی الکتروده کندکننده استوانه‌ای تک پله‌ای و استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای نشان داده شده است.

^{۳۱} helicoil



شکل ۳-۴ طرح الکترو د کندکننده استوانه‌ای تک پله‌ای (الف - ج) و نمونه ساخته شده (د)

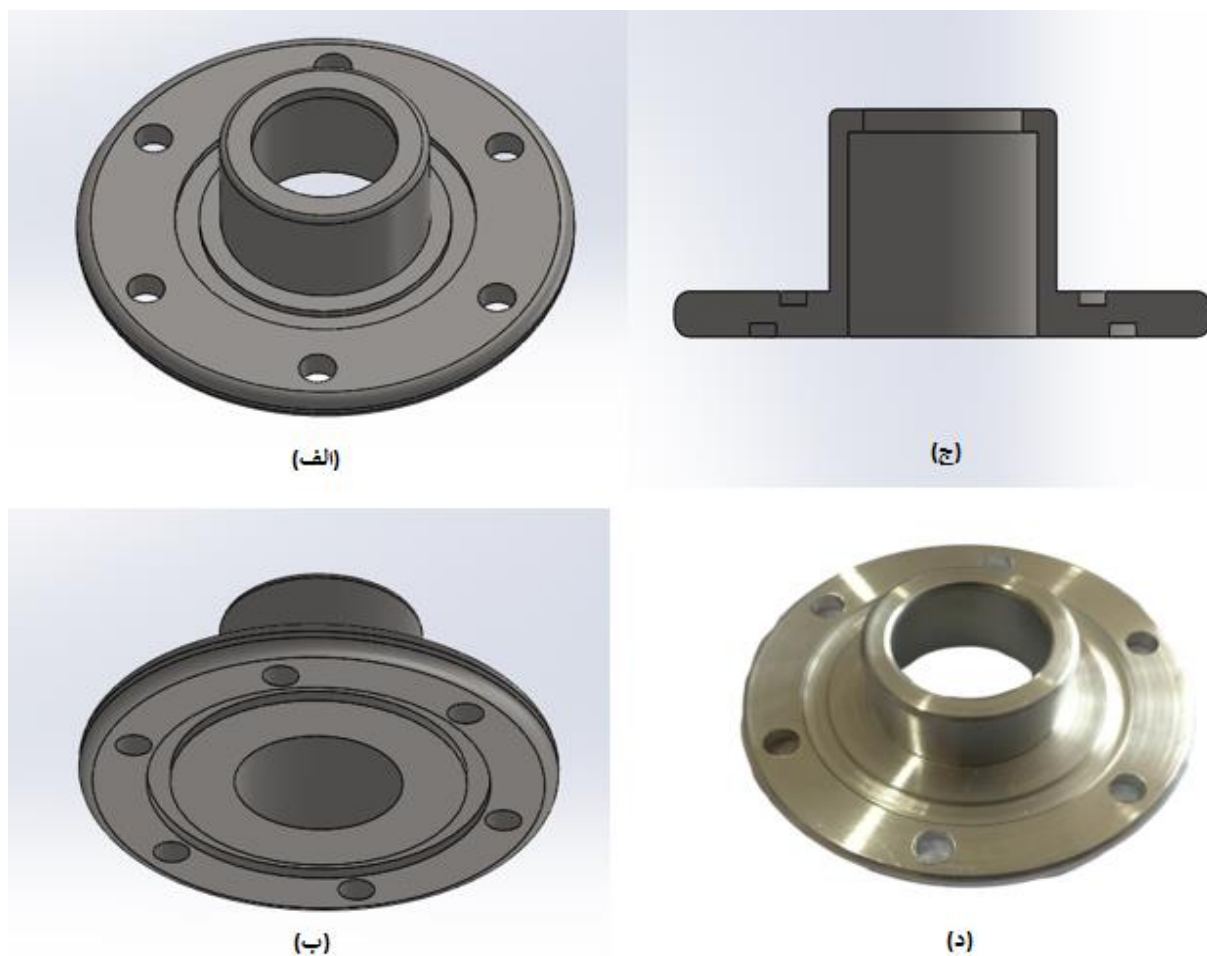


شکل ۴-۴ طرح الکترو د کندکننده استوانه‌ای دوکوهانی تک پله‌ای (الف - ج) و نمونه ساخته شده (د)

در دو سطح الکتروود کندکننده پله و فرورفتگی‌هایی به منظور هم راستا شدن با محور تخلیه و قرار گرفتن اورینگ و همچنین روزنه‌هایی برای محل قرارگیری پیچ بر روی سطح این الکتروودها در نظر گرفته‌ایم. جنس الکتروود کندکننده نیز همانند الکتروود استخراج آلومینیوم انتخاب شده است. ابعاد و هندسه این الکتروودها در شکل‌های ۴۳-۳ و ۴۴-۳ نشان داده شده است.

۴-۲-۳ مدل‌سازی و ساخت الکتروود شتابدهنده

در شکل ۴-۵ مدل انتخابی جهت ساخت الکتروود شتابدهنده قابل مشاهده است.



شکل ۴-۵ طرح الکتروود شتابدهنده (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د)

در دو طرف سطح الکتروود فرورفتگی‌هایی جهت قرارگیری اورینگ به منظور ایجاد خلأ و همچنین روزنه‌هایی در اطراف الکتروود جهت پیچ شدن به قطعه تفلونی T شکل که در ادامه در مورد آن توضیح داده خواهد شد، در نظر گرفته‌ایم. جنس این الکتروود نیز همانند سایر الکتروودها آلومینیوم انتخاب شده است. در تمامی الکتروودهای شبیه سازی و مدلسازی شده جهت ساخت، برای جلوگیری از تخلیه بار الکتریکی، تمام نقاط نوک تیز را به صورت پخی در نظر گرفته‌ایم.

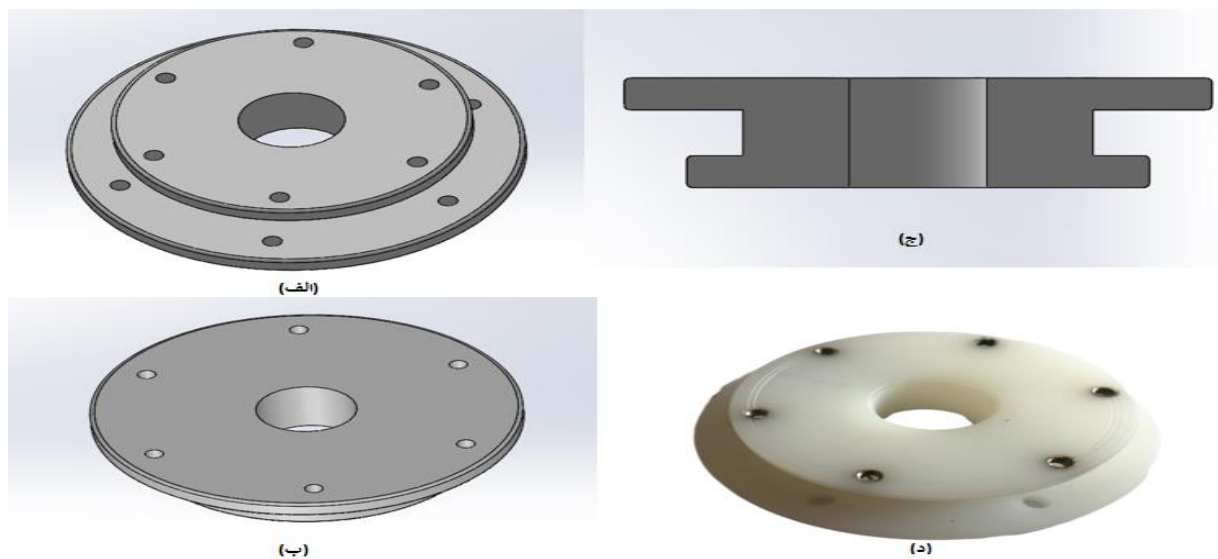
۴-۲-۴ مدلسازی و ساخت عایق‌های بین الکتروودها

به طور کلی در چشمه‌های یونی باید از موادی که دمای ذوب نسبتاً بالایی دارند، به عنوان عایق استفاده شود. پلی‌آمیدها از استحکام بسیار بالایی برخوردار بوده و در برابر کشش و سایش، اشعه‌های مخرب و حرارت معادل ۲۷۰ درجه سانتیگراد مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. از دیگر مزایای پلی‌آمیدها می‌توان به توازن میان استحکام و ضربه پذیری، خواص الکتریکی و شعله‌پذیری مناسب، استحکام مکانیکی بالا و دمای کاربری بالا اشاره کرد. با توجه به ویژگی‌های مطرح شده از این پلیمرها بعنوان عایق بین قطعات استفاده خواهیم کرد. شکل ۴-۶ عایق بین الکتروود استخراج و الکتروود کندکننده را نشان می‌دهد.

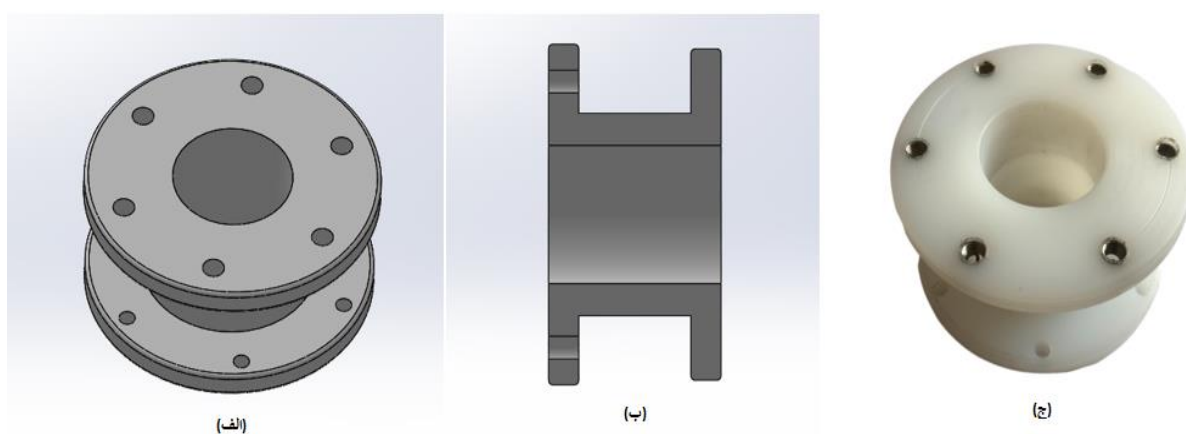
مدل عایق به صورتی طراحی شده است که الکتروودها را در خارج از خلأ در فاصله ۲۴ mm و در داخل خلأ روزنه الکتروودها را در فاصله ۳ mm (مقادیر ایده‌آل شبیه سازی شده) از همدیگر قرار دهد. هدف از این طراحی جلوگیری از تخلیه الکتریکی در خارج از خلأ و همچنین هم راستا کردن الکتروود استخراج و کندکننده در جهت محور تخلیه می‌باشد. در سطح خارجی این قطعه روزنه‌هایی جهت قرار گرفتن پیچ‌ها در نظر گرفته شده که در

سطحی که روزنه پیچ‌ها به الکتروود کندکننده متصل می‌شوند، هلی‌کویل شده که خود یک نوآوری برای حذف مهره و پیچ شدن فولادی برروی قطعه پلیمری است.

در شکل ۴-۷ عایق بین الکتروودهای کندکننده و شتابدهنده قابل مشاهده است.

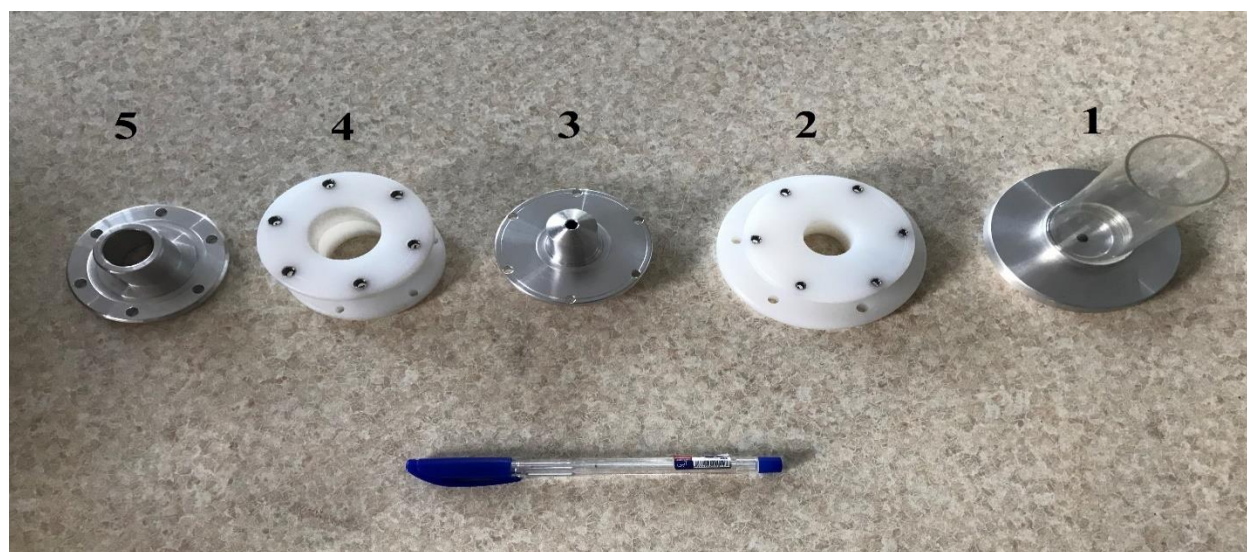


شکل ۴-۶ طرح عایق بین الکتروود استخراج و الکتروود کندکننده (الف-ج) و نمونه ساخته شده (د)

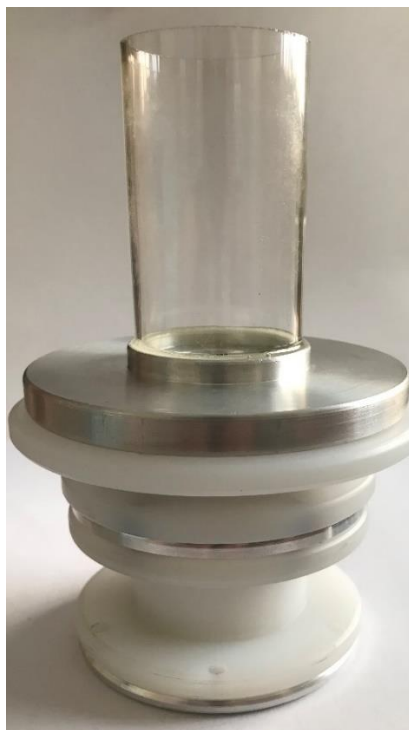


شکل ۴-۷ طرح عایق بین الکتروود کندکننده و الکتروود شتابدهنده (الف-ب) و نمونه ساخته شده (ج)

عایق بین این دو الکتروود نیز به گونه‌ای طراحی شده است که الکتروودها را در خارج از خلأ در فاصله ۴۰ mm و در داخل خلأ الکتروودها را در فاصله ۱۰ mm (مقادیر ایده‌آل شبیه سازی شده) از همدیگر قرار دهد. بر روی سطوح خارجی این عایق همانند عایق دیگر، روزنه‌هایی برای محل قرارگیری پیچ‌ها در نظر گرفته شده که سطح مربوط به سمت الکتروود شتابدهنده هلی‌کویل شده است. شکل ۴-۸ و ۴-۹ به ترتیب قطعات اصلی سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ را به صورت مجزا از یکدیگر و به صورت سرهم شده نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸ قطعات اصلی ساخته شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ به صورت مجزا از یکدیگر ۱- الکتروود استخراج چسب شده به لوله شیشه‌ای پیرکس ۲- عایق بین الکتروودهای استخراج و کندکننده ۳- الکتروود کندکننده ۴- عایق بین الکتروودهای کندکننده و شتابدهنده ۴- الکتروود شتابدهنده



شکل ۴-۹ قطعات اصلی ساخته شده سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ به صورت سرهم شده

۴-۲-۵ قطعه تفلونی T شکل و فنجان فارادی

به منظور برقراری اتصال الکتروود شتابدهنده که در انتهای مجموعه سیستم استخراج طراحی شده می باشد، به اتصالات پمپ خلأ و فنجان فارادی، قطعه تفلونی T شکلی در نظر گرفته شده که در شکل ۴-۱۰ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۰ قطعه تفلونی T شکل

۴-۲-۵-۱ فنجان فارادی

فنجان فارادی یک دستگاه اندازه‌گیری است که برای اندازه‌گیری جریان باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پروژه برای اندازه‌گیری جریان باریکه از فنجان فارادی طراحی و ساخته شده در مرجع ۴۰ استفاده شده است که در شکل ۴-۱۱ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۴-۱۱ فنجان فارادی برای اندازه‌گیری جریان باریکه چشمه یونی

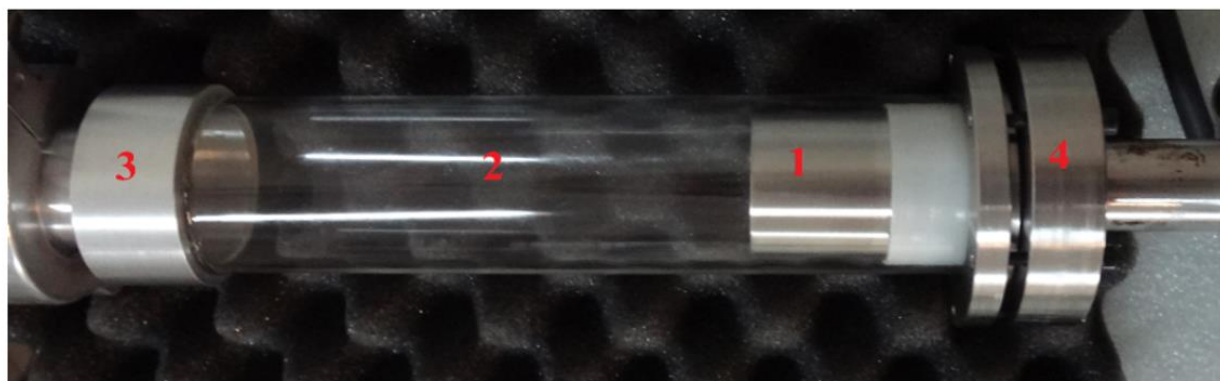
فصل پنجم: آزمایش و اندازه گیری

۵-۱ مقدمه

در این فصل در مورد چشمه یونی استفاده شده، نحوه سرهم کردن قطعات راه اندازی سیستم استخراج و نصب آن بر روی چشمه یونی پنینگ به تفصیل توضیح داده خواهد شد و در ادامه اثر پارامترهای مختلف مانند ولتاژ الکترودها، فشار گاز، جریان تخلیه اتاقک یونش و جریان استخراج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۲ چشمه یونی پنینگ

چشمه یونی پنینگ از کاتد و آنتی کاتد صفحه‌ای و آند استوانه‌ای توخالی تشکیل شده است که براساس تخلیه DC عمل می‌کند. کاتد و آنتی کاتد نسبت به آند پتانسیل منفی دارند. ساختار و عملکرد دقیق اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ توسط آقای فتحی در پایان نامه ایشان تحت عنوان "طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ" به صورت کامل بررسی شده است [۳۹]. در شکل ۵-۱ مجموعه اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ نشان داده شده است. مجموعه سیستم استخراج در انتهای چشمه یونی مذکور نصب خواهد شد.



شکل ۵-۱ مجموعه اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ، (۱) اتاقک یونش قرار گرفته در پوسته نگهدارنده، (۲) لوله شیشه‌ای پیرکس،

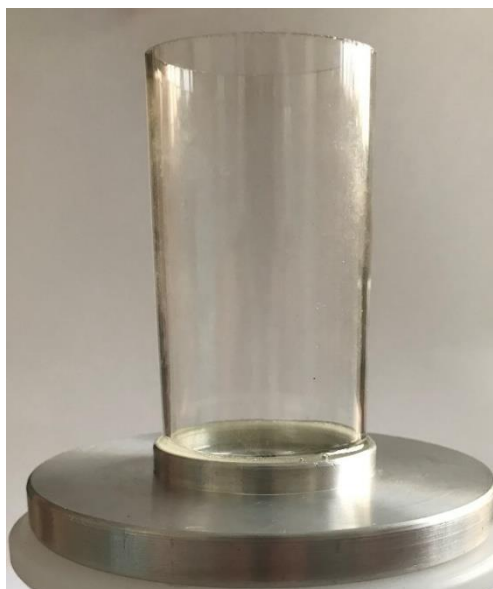
(۳) فلنج انتهایی لوله شیشه‌ای و (۴) فلنج ابتدای لوله شیشه‌ای [۳۹]

۵-۳ تمیزکاری قطعات

قطعات تراشکاری شده را ابتدا با آب و صابون شسته و سپس برای زدودن ذرات ریز و آلودگی‌هایی که با شستشوی معمولی از بین نمی‌روند در داخل دستگاه تمیزکننده اولتراسونیک^{۳۲} که به آن حمام اولتراسونیک نیز گفته می‌شود، به مدت شصت دقیقه قرار می‌دهیم و سپس با استفاده از دستکش قطعات را خارج کرده و آغشته به الکل کرده و در انتها قطعات را به منظور سرهم کردن خشک می‌کنیم.

۵-۴ سرهم کردن قطعات

در این بخش با استفاده از چسب دوقلوی صنعتی اوهو پلاس^{۳۳}، لوله شیشه‌ای پیرکس (که اتاقلک یونش چشمه یونی در آن قرار گرفته است) را به پله‌ای که برروی الکتروستخراج کننده قرار دارد مطابق با شکل ۵-۲ متصل می‌کنیم.



شکل ۵-۲ لوله شیشه‌ای پیرکس چسب شده به الکتروستخراج کننده

^{۳۲} Ultrasonic Cleaner Machine

^{۳۳} UHU PLUS

سمت دیگر لوله شیشه‌ای در داخل فلنج ابتدای مجموعه اتاقک یونش قرار می‌گیرد. پس از آغشته کردن اورینگ به گریس خلأ و قرار دادن در داخل شیار الکتروستخراج، عایق پلی‌آمیدی بین الکتروستخراج و کندکننده، به الکتروستخراج کننده پیچ می‌شود. اورینگ‌های الکتروستخراج کننده را مطابق با شکل ۵-۳ در پله‌های تراشکاری شده و الکتروستخراج کننده داخل عایق قرار می‌دهیم، سپس عایق بین الکتروستخراج کننده و شتابدهنده را پشت الکتروستخراج کننده قرار داده و سه قطعه را با استفاده از پیچ به یکدیگر متصل می‌کنیم.



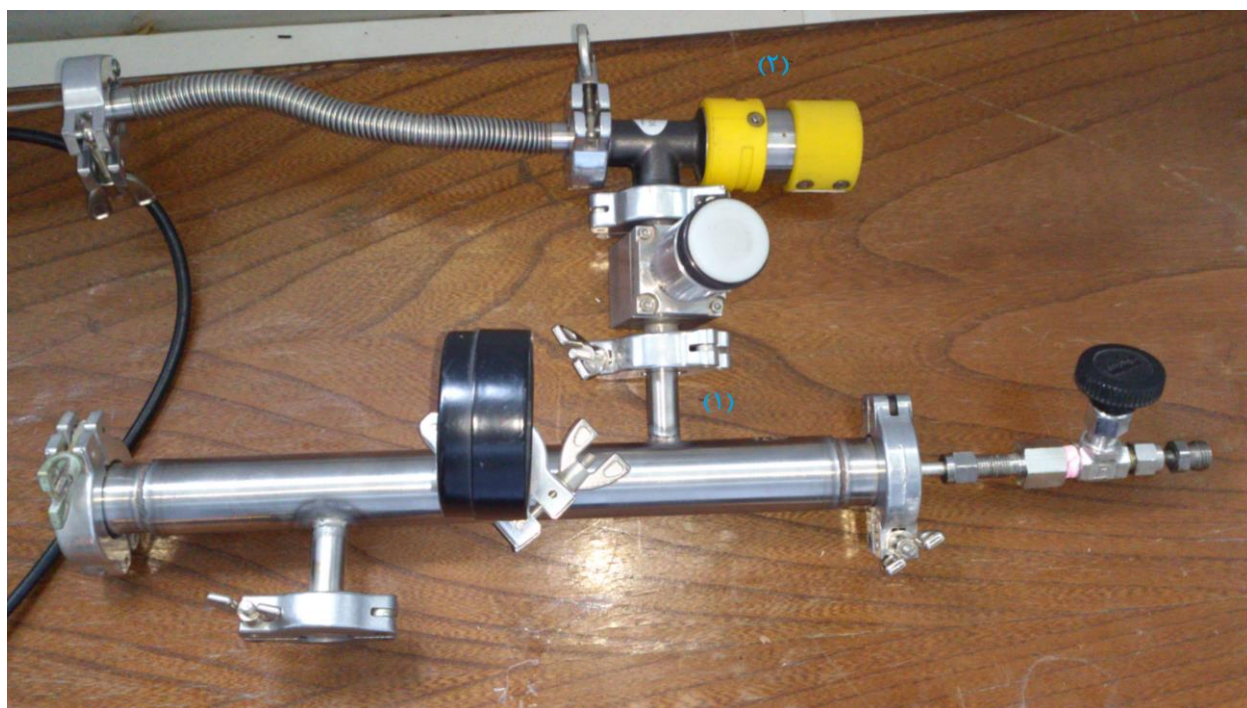
شکل ۵-۳ نحوه قرارگیری اورینگ در داخل شیار الکتروستخراج که به عنوان مثال در این شکل، اورینگ در شیار الکتروستجابدهنده نشان داده شده است.

الکتروستجابدهنده را در داخل عایق بین الکتروستخراج کننده و شتابدهنده قرار داده و قطعه تفلونی T شکل را با استفاده از روزنه‌های در نظر گرفته شده به مجموعه پیچ می‌کنیم. اتصالات خلأ را با استفاده از کلمپ^{۳۴} به DN ۲۵ قطعه تفلونی متصل کرده و سر دیگر قطعه را با استفاده از پیچ به فنجان فارادی وصل می‌کنیم. در ابتدای فلنج اتاقک یونش به منظور اتصال الکتریکی به صورت عایق شده، فیدترو و لوله تزریق گاز قرار داده شده است. لوله تزریق گاز به محفظه گازی دارای شیر نشستی^{۳۵} که در شکل ۵-۵ می‌توان مشاهده کرد، متصل شده است.

^{۳۴} Clamp

^{۳۵} Leak Valve

به منظور حفظ ایمنی کار، با استفاده از محفظه در نظر گرفته شده میزان گاز هیدروژن مورد استفاده را در فشار ۳ bar به مجموعه متصل می‌کنیم که در شکل ۴-۵ محفظه قابل مشاهده است. در انتها در شکل ۵-۵ شکل نهایی قطعات سرهم شده مجموعه اتاقک یونش و سیستم استخراج و اتصالات مربوط به محفظه تزریق گاز قابل مشاهده است.



شکل ۴-۵ محفظه تزریق گاز (۱) و شیر نشستی متصل شده به لوله تزریق گاز (۲)



شکل ۵-۵ شکل نهایی قطعات سرهم شده مجموعه اتاقک یونش و سیستم استخراج و اتصالات مربوط به محفظه تزریق گاز

۵-۵ آزمایش خلأ

براساس محدوده کاری خلأ مورد نیاز می‌توانیم از پمپ‌های خلأ مختلف استفاده کنیم. پمپ‌های خلأ همانطور که از نامشان پیداست برای ایجاد خلأ در یک محفظه خاص که به منظور انجام آزمایشات و کارهای مختلف دیگر ایجاد می‌شود به کار می‌روند. پمپ‌های خلأ انواع مختلفی دارند که پمپ خلأ روتاری^{۳۶} و پمپ‌های توربو مولکولار^{۳۷} دو نوع مهم از آنها است. معنای لغوی روتاری همان چرخشی و دوار می‌باشد و علت نامگذاری این پمپ به خلأ روتاری روغنی این موضوع می‌باشد که در محفظه داخلی آن دو تیغه به وسیله روتور به اندازه ۱۸۰ درجه چرخانده می‌شوند و به این شکل هوا از یک طرف وارد پمپ می‌گردد و پس از آنکه به وسیله مکانیزم پمپ فشار

^{۳۶} Rotary vacuum pump

^{۳۷} Turbo-Molecular Vacuum Pump

پایین ایجاد شد این هوا از سمت دیگر خارج می شود. این پمپ‌ها قادرند فشار را از 10^{-1} mbar تا 10^{-3} کاهش دهند. پمپ‌های توربو مولکولار از جمله پرکاربردترین پمپ‌های خلأ بالا و خیلی بالا می‌باشند. این پمپ‌ها قادرند فشارهایی تا محدوده 10^{-11} mbar ایجاد کنند. پمپ‌های توربو از تعدادی روتور و استاتور تشکیل شده‌اند که بر روی آنها پره‌هایی با زوایای مشخص قرار دارد. روتورها در پمپ توربو با سرعت بالا چرخیده و با برخورد مولکول‌ها به پره‌ها (پس از ورود به دهانه پمپ)، تکانه حرکتی بگونه‌ای به مولکول‌ها منتقل می‌شود که به سمت خروج (پمپ پشتیبان) پرتاب شوند. پمپ‌های توربو از چندین مرحله روتور و استاتور تشکیل شده‌اند که در هر مرحله یک فشرده‌سازی بر روی گاز انجام می‌شود و در انتها فشار به محدوده‌ای می‌رسد (خلأ متوسط و پایین) که توسط پمپ پشتیبان قابل تخلیه باشد. پمپ‌های توربو مخصوص خلأ بالا و خیلی بالا بوده زیرا تعداد مولکول‌ها باید به اندازه‌ای کم باشد که پس از برخورد با سطح پره بدون برخورد با سایر ذرات و پیش از دست دادن تکانه خود در اثر برخورد با سایر ذرات، به پره بعدی برسد. سرعت تخلیه پمپ‌های توربو به سائز دهانه ورودی، سرعت چرخش پره‌ها، ساختار داخلی پمپ و همچنین نوع گازهای داخل محفظه بستگی دارد. این پمپ‌ها معمولاً کمترین سرعت تخلیه را برای گاز هیدروژن دارند.

به منظور ایجاد خلأ در سیستم، ابتدا پمپ خلأ روتاری را روشن کرده و خلأ مجموعه را به محدوده mbar 2×10^{-2} می‌رسانیم و سپس پمپ خلأ توربو را به منظور نشستی یابی روشن نموده و پس از حصول اطمینان از نداشتن نشستی و رسیدن به خلأ مطلوب، پمپ توربو را خاموش و خلأ سیستم را به محدوده کاری می‌رسانیم. در شکل ۵-۶ و ۵-۷ به ترتیب فشار خلأ بدست آمده به وسیله پمپ توربو و روتاری که توسط فشارسنج پیرانی قرائت شده، نشان داده شده است.



شکل ۵-۶ فشار خلأ به دست آمده توسط پمپ توربو



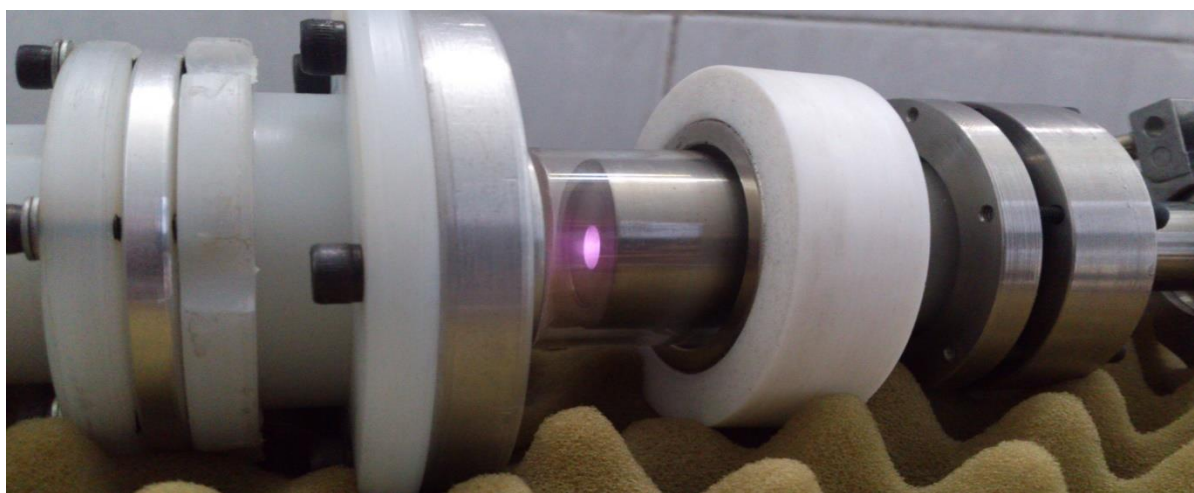
شکل ۵-۷ فشار خلأ به دست آمده توسط پمپ روتاری

۵-۶ روشن کردن چشمه یونی پنینگ

همانطور که قبلاً بیان کردیم به منظور روشن کردن چشمه یونی پنینگ، با خاموش کردن پمپ خلأ توربو، خلأ را در محدوده کاری نگه می‌داریم. قبل از شروع تعمیرات و یا انجام تستهای قبل از راه اندازی، لازم است جهت

جلوگیری از انفجار، آتش سوزی و گاز گرفتگی پرسنل، خطوط توسط یک گاز بی اثر و با خلوص بالا پاکسازی یا پرجینگ^{۳۸} گردند.

بدین منظور و برای انجام عملیات پرجینگ تزریق گاز هیدروژن را با استفاده از بازکردن شیر نشتی چندین بار گاز را به داخل مجموعه تزریق می‌کنیم تا از اکسید شدن سطوح قطعات جلوگیری و از خلوص گاز اطمینان حاصل کنیم. برای روشن کردن چشمه از منبع تغذیه ولتاژ بالای DC که می‌تواند حدود ۳ کیلو ولت پتانسیل و جریان ۱۰ میلی آمپر فراهم کند، استفاده شده است. شکل ۵-۸ لحظه روشن شدن چشمه یونی را بدون اعمال ولتاژ به سیستم استخراج، نشان می‌دهد.



شکل ۵-۸ روشن شدن چشمه یونی پنینگ بدون اعمال ولتاژ به الکترودهای استخراج

در ادامه تأثیرات فرآیند راه اندازی^{۳۹} اتاقک یونش چشمه یونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تهویه یا فرآیند راه اندازی برای چشمه‌های یونی جدید بسیار حائز اهمیت است که بر روی ولتاژ اشتعال، فشار گاز، تخلیه الکتریکی

³⁸ Purging

³⁹ Conditioning

بین سطوح و ولتاژ اعمالی به الکترودها تأثیرگذار است. شرایط روشن شدن چشمه یونی در طی فرآیند راه اندازی به مرور تغییر کرده و به حالت پایدار و ایده آل نزدیک می شود. در شکل ۵-۹ تأثیرات فشار بر حسب شدت جریان تخلیه در ولتاژ ثابت ۱ کیلو ولت که به آند متصل است، نشان داده شده که آزمایش دوم بعد از یک روز کار کردن چشمه در شرایط یکسان با آزمایش اول، اندازه گیری شده است.

طبق مطالعات برای محاسبه خطای داده های تجربی اگر در آزمایشی که N بار تکرار شده است و $n_i | i=1,2,...,N$ پیامدهای آن باشد و با فرض اینکه p_{n_i} بسامد رخداد n_i باشد و بخواهیم نمودار آن را رسم کنیم، در این صورت منحنی حاصل شبیه یک توزیع گاوسی خواهد بود و هرچه N بزرگتر باشد نمودار بیشتر بر یک توزیع بهنجار منطبق خواهد شد. در این شرایط نتیجه اندازه گیری ها به صورت میانگین حسابی و خطای استاندارد آنها به ترتیب به صورت زیر گزارش می شود:

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_N}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N} \quad (۱-۵)$$

مقدار واقعی n را که میانگین واقعی نیز خوانده می شود فقط با تعداد بینهایت اندازه گیری می توان بدست آورد ولی چون انجام تعداد بینهایت آزمایش ممکن نیست مقدار این پارامتر را با استفاده از معادله (۱-۵) بدست می آورند. مطابق با رابطه هرچه مقدار N بزرگتر باشد خطای اندازه گیری کوچکتر خواهد بود. خطای استاندارد با فرض $f(x_i) = \frac{1}{N}$ بر حسب انحراف معیار توزیع می شود:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2 \quad (۲-۵)$$

براساس آزمایش های انجام شده به صورت تجربی میزان خطای داده های بدست آمده با چهار بار اندازه گیری با استفاده از روابط (۱-۵) و (۲-۵) محاسبه شده که در نمودارها نشان داده شده است. به طور مثال در نمودار شکل ۵-۹ در فشار 9×10^{-2} mbar مقدار خطا در این نقطه به صورت زیر محاسبه میشود:

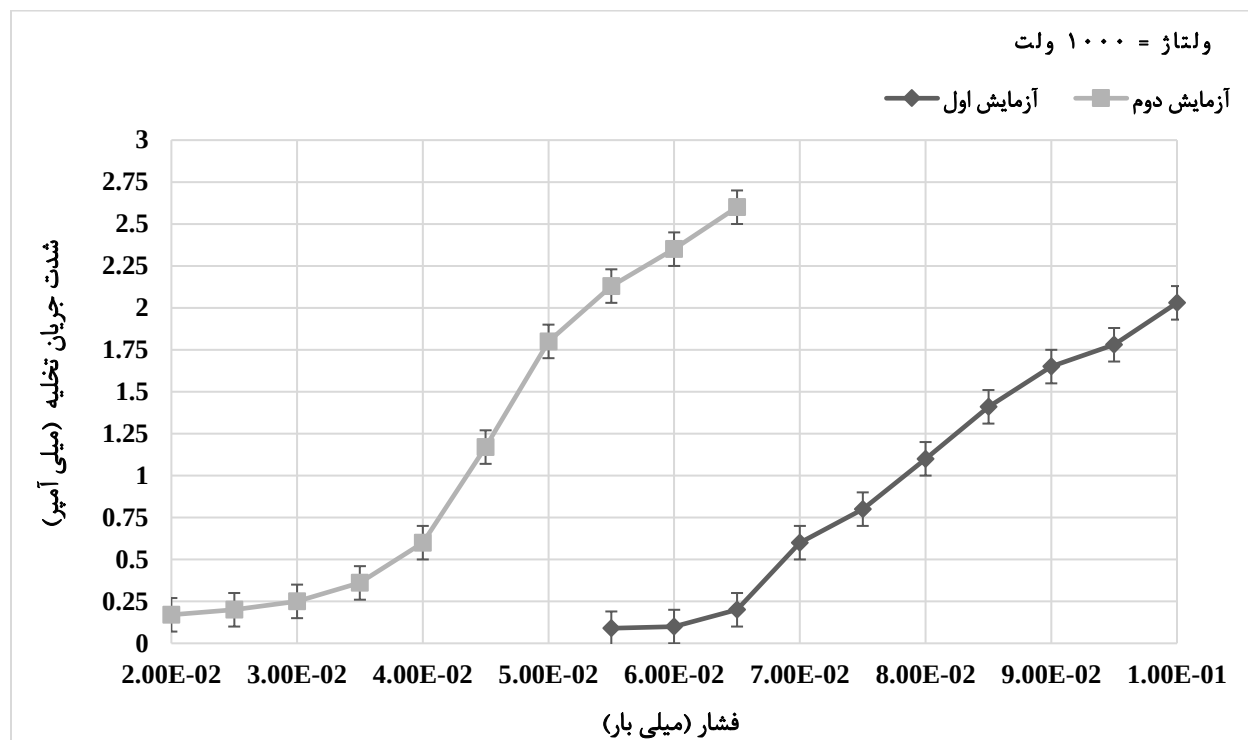
$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_N}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N} = \frac{1.65 + 1.69 + 1.56 + 1.71}{4} = 1.65$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |n_i - \bar{n}|^2 = \frac{1}{3} [|I_1 - \bar{I}|^2 + |I_2 - \bar{I}|^2 + |I_3 - \bar{I}|^2 + |I_4 - \bar{I}|^2]$$

$$= 0.0044$$

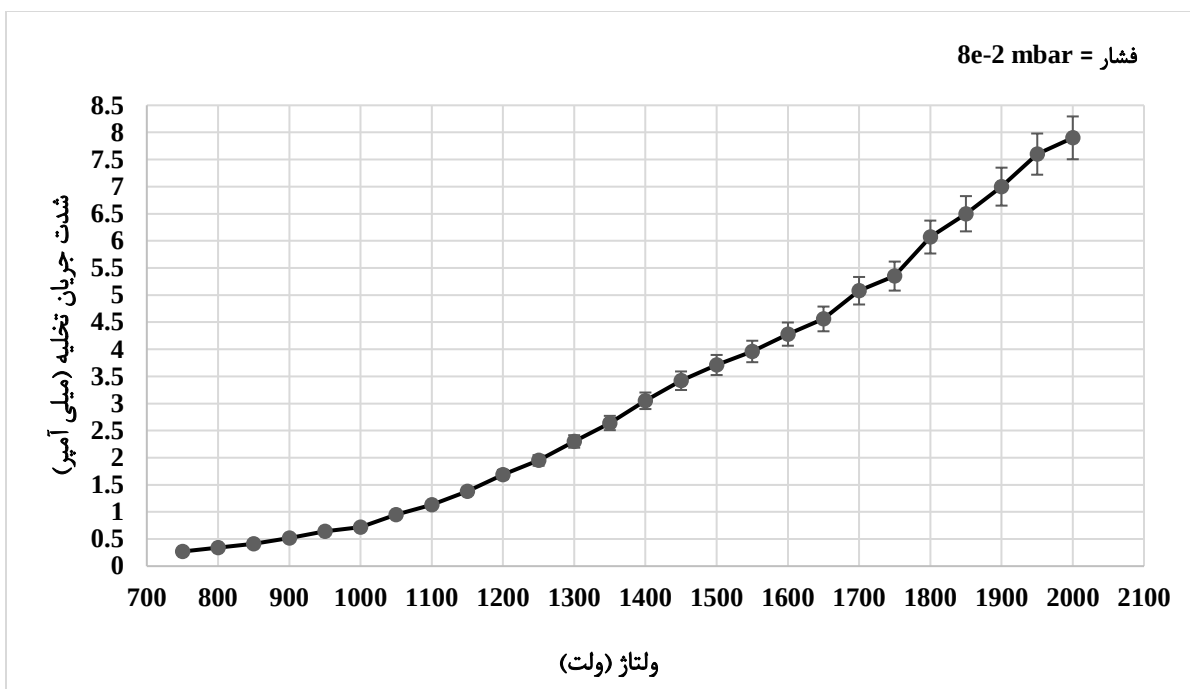
$$\bar{n} \pm \sigma_{\bar{n}} = \bar{I} \pm \sqrt{0/0044} = 1.65 \pm 0.06$$

خاطر نشان می شود اختلاف بین میزان شدت جریان بدست آمده در نتایج شبیه سازی نسبت به نتایج تجربی حدود ۳۵۰ میکروآمپر می باشد که این امر به دلیل محدودیت های محیط شبیه سازی برنامه CST در تشکیل پلاسما، ایجاد محیط خلا و تزریق گاز می باشد.

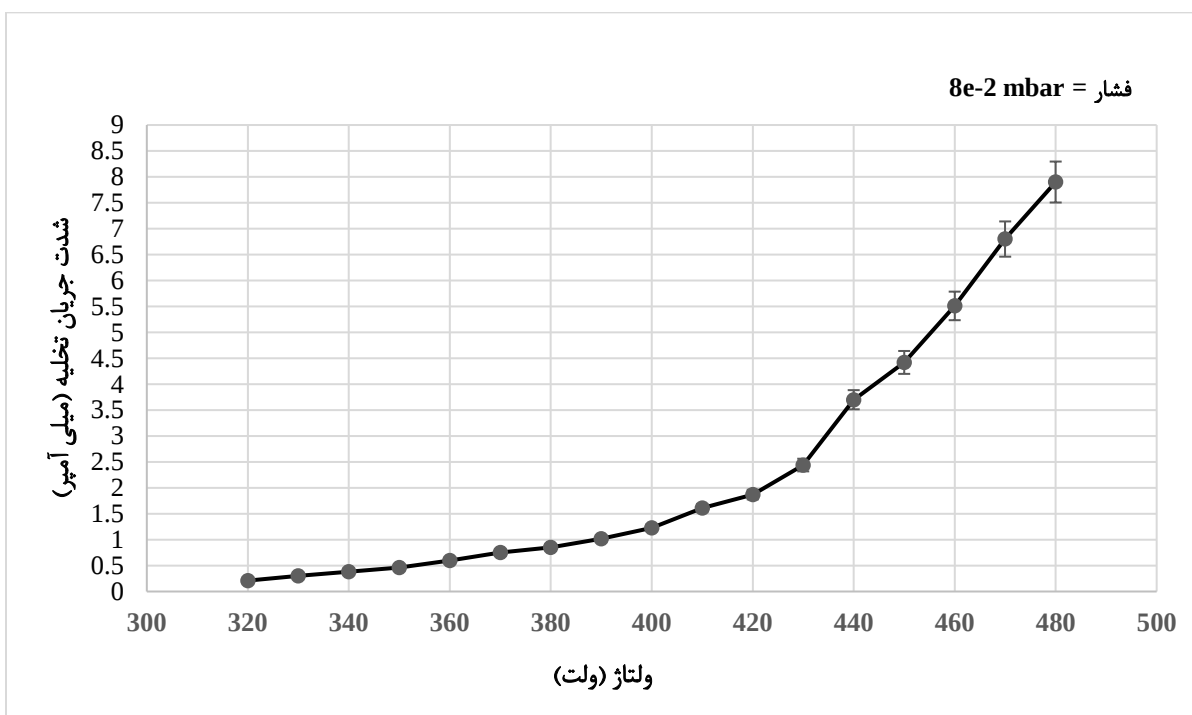


شکل ۹-۵ تأثیرات فشار بر حسب شدت جریان تخلیه در ولتاژ ثابت ۱ کیلو ولت

بر اساس نتایج بدست آمده در آزمایش اول، چشمه در فشار خلا 5.5×10^{-2} mbar روشن شده که همین نتیجه برای آزمایش دوم به 2×10^{-2} mbar کاهش پیدا کرده است، همچنین در شکل ۱۰-۵ و ۱۱-۵ نتایج آزمایش تأثیرات ولتاژ اشتعال بر حسب شدت جریان تخلیه در فشار ثابت 8×10^{-2} mbar در دو آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰ تأثیرات ولتاژ اشتعال بر حسب شدت جریان تخلیه در فشار ثابت 8×10^{-2} mbar در آزمایش اول

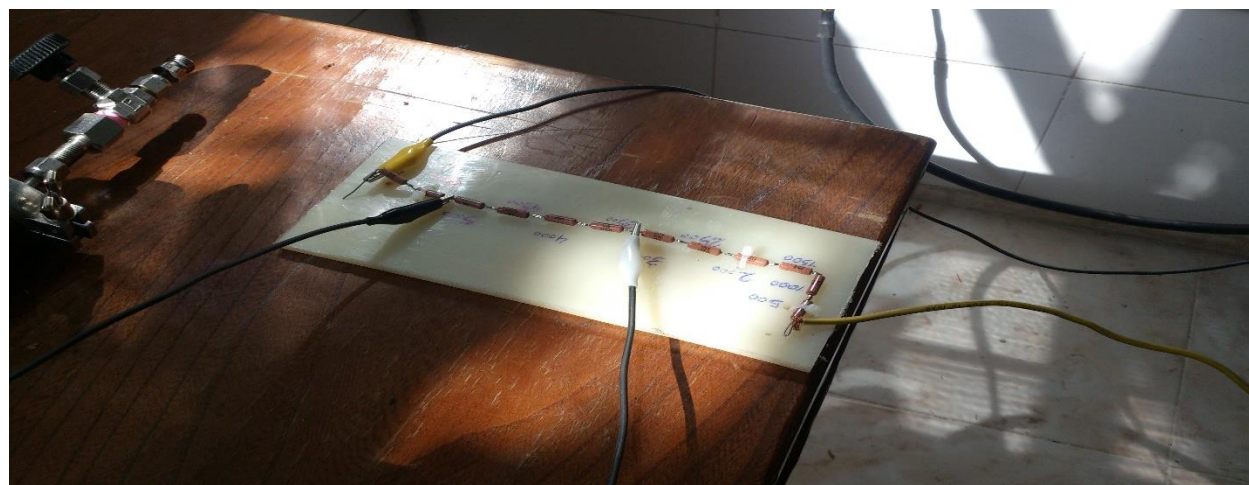


شکل ۵-۱۱ تأثیرات ولتاژ اشتعال بر حسب شدت جریان تخلیه در فشار ثابت 8×10^{-2} mbar در آزمایش دوم

براساس نتایج بدست آمده از نمودارها، ولتاژ اشتعال یا ولتاژ روشن شدن چشمه حدود ۴۳۰ ولت کاهش پیدا کرده است که بطور کلی با توجه به نتایج نمودارها بهبود شرایط راه اندازی کاملاً مشهود است.

۷-۵ اعمال و لتاژ به الکترودهای سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ

همانطور که قبلاً بیان کردیم با اعمال ولتاژ مناسب به الکترودهای سیستم استخراج کننده، اپتیک باریکه چشمه یونی بهینه می‌شود. با توجه به تعداد الکترودها و محدوده پتانسیل اعمالی به الکترودها، به سه منبع تغذیه ولتاژ بالا نیاز داریم که از یک منبع تغذیه ۳ کیلو ولت به همراه یک منبع تغذیه ۱۰۰ کیلو ولت و یک مقسم ولتاژ که به منبع تغذیه ۱۰۰ کیلو ولت جهت اعمال پتانسیل به الکترودها استخراج و شتابدهنده متصل شده، استفاده می‌کنیم که در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.

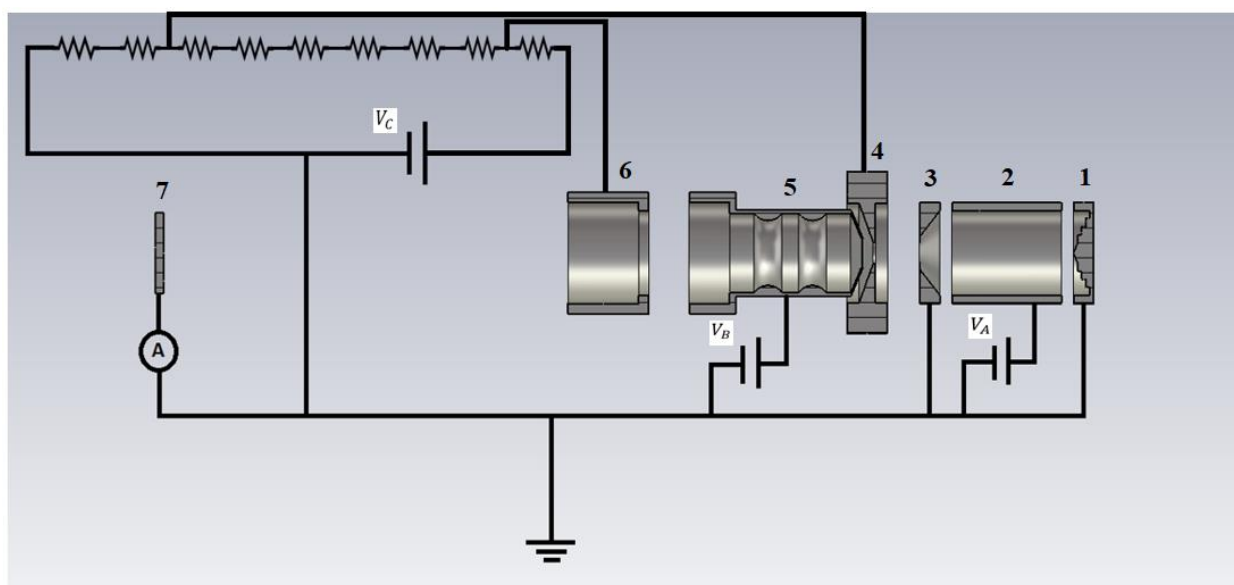


شکل ۵-۱۲ مقسم ولتاژ متصل شده به منبع تغذیه جریان بالای ۱۰۰ کیلو ولت

با اعمال ولتاژ ۶ کیلو ولت و قرار دادن مقاومت‌ها در مسیر ولتاژ ورودی، میزان ولتاژ به ازای هر مقاومت ۰/۵ کیلو ولت تا ولتاژ ۵۰۰ ولت کاهش می‌یابد. نحوه اتصالات الکترونیکی به مجموعه سیستم استخراج که به کمک گیره‌های سوسماری انجام شده، در شکل ۵-۱۳ و مدار الکترونیکی متصل شده به مجموعه چشمه یونی پنینگ در شکل ۵-۱۴ نشان داده است.



شکل ۵-۱۳ اتصالات الکترونیکی به مجموعه سیستم استخراج چشمه یونی پنینگ، (الف) سوسماری سفید اتصال الکتریکی الکتروستخراج، (ب) سوسماری قرمز اتصال الکتریکی الکتروستخراج، (ج) سوسماری مشکی اتصال الکتریکی الکتروستخراج



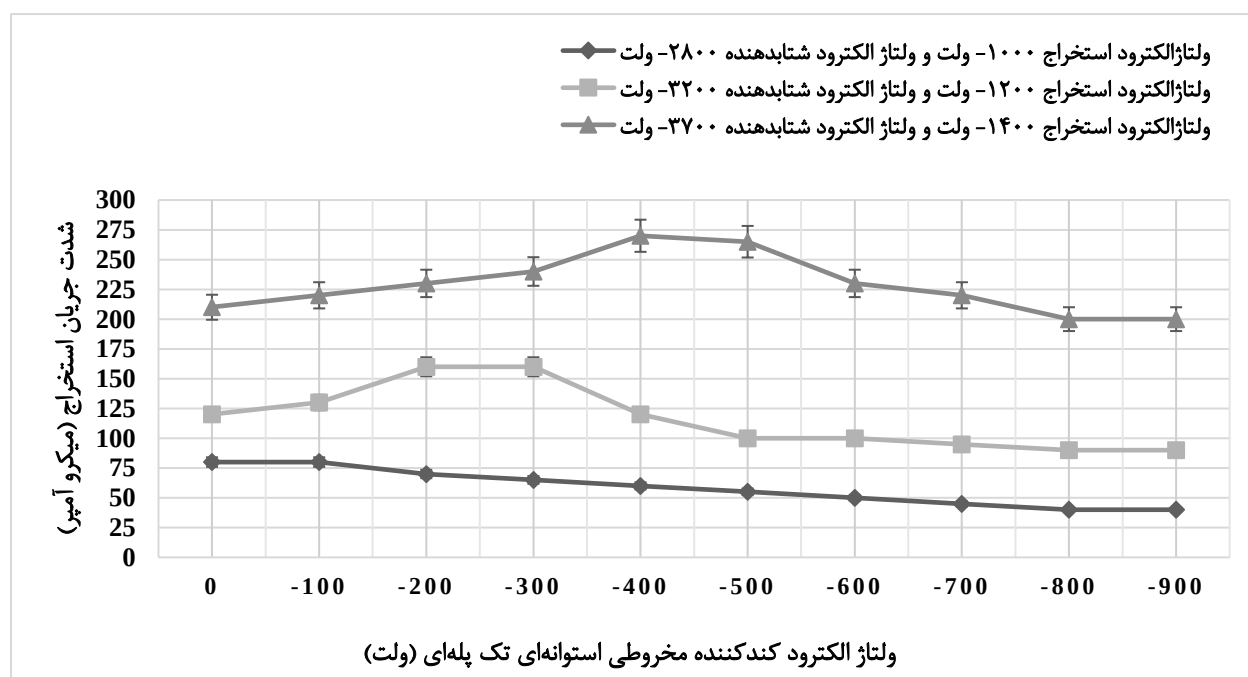
شکل ۵-۱۴ مدار الکترونیکی متصل شده به مجموعه چشمه یونی پنینگ ۱- کاتد ۲- آند ۳- آنتی کاتد ۴- الکتروستخراج ۵- الکتروستخراج کاندکننده ۶- الکتروستخراج شتابدهنده FC ۷- الکتروستخراج

۵-۸ آزمایش و اندازه گیری

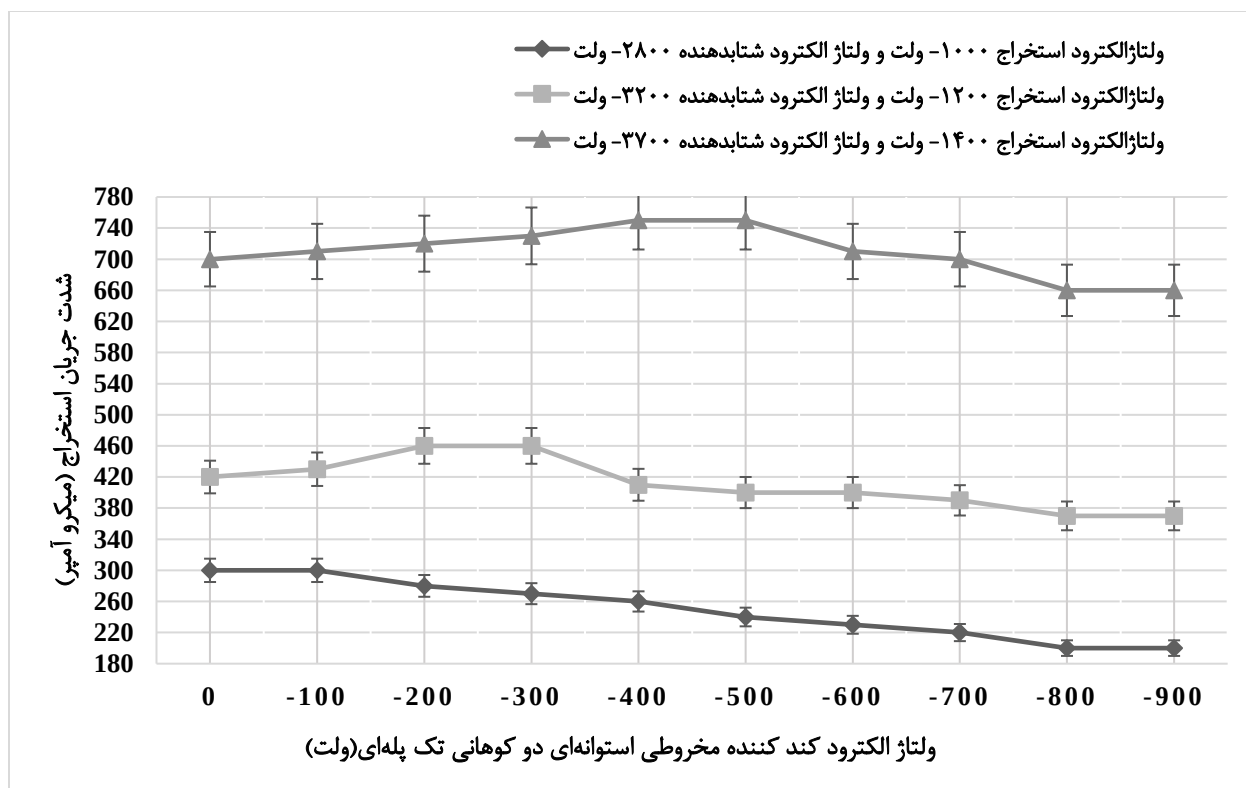
بطور کلی در این مرحله هدف اندازه‌گیری شدت جریان استخراج شده توسط فنجان فارادی که در فاصله ۳۰ سانتی‌متر از الکتروود شتابدهنده قرار دارد، نسبت به ولتاژهای مختلف الکتروودها و بررسی تأثیرات هندسه الکتروود کندکننده در فشار ثابت 6×10^{-2} mbar به صورت تجربی می‌باشد.

۵-۸-۱ اندازه‌گیری شدت جریان استخراج در ولتاژهای مختلف

در شکل ۵-۱۵ تأثیر ولتاژهای مختلف الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای برحسب شدت جریان استخراج شده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌کنید، زمانی که اختلاف پتانسیل بین الکتروود استخراج و کندکننده حدود ۹۰۰ ولت تا ۱۰۰۰ ولت باشد، شدت جریان استخراج شده بیشترین مقدار خود را خواهد داشت، همین رفتار در نمودار شکل ۵-۱۶ که تأثیر ولتاژ الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای برحسب شدت جریان استخراج شده را نشان می‌دهد، مشهود است.



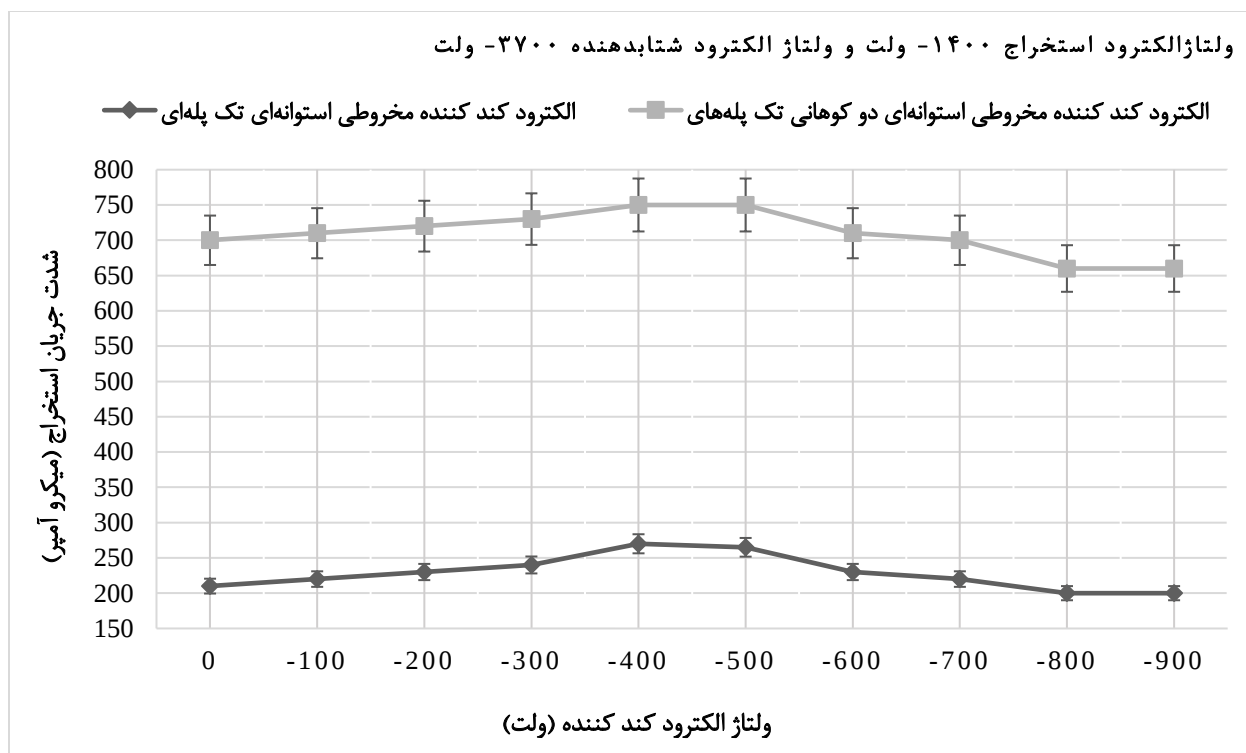
شکل ۵-۱۵ تأثیر ولتاژهای مختلف الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای برحسب شدت جریان استخراج



شکل ۵-۱۶ تأثیر ولتاژ الکترود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای بر حسب شدت جریان استخراج

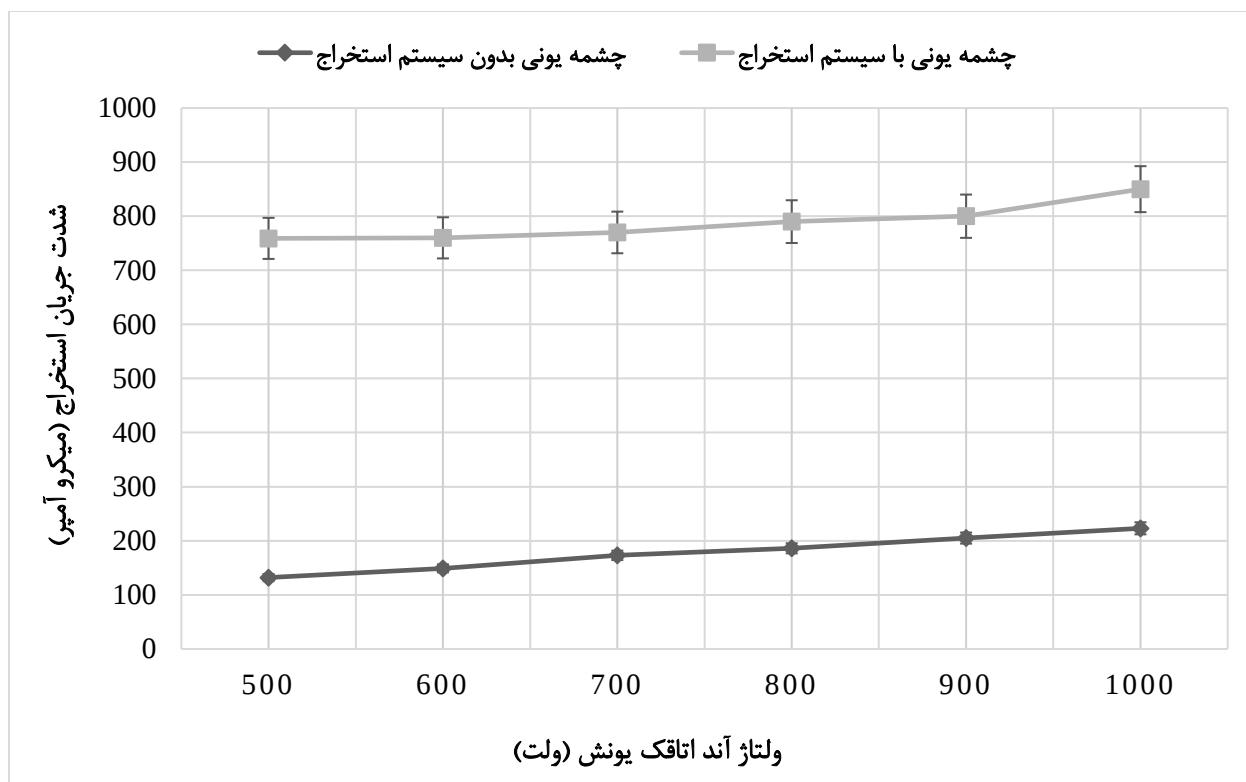
با افزایش ولتاژ الکترود کندکننده یا در حقیقت با کاهش اختلاف پتانسیل بین الکترود استخراج و کندکننده، میزان شدت جریان استخراج کاهش یافته و به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود، ضمناً برای جلوگیری از آسیب دیدن منبع تغذیه و مقسم ولتاژ و همچنین کاهش تخلیه الکتریکی بین سطوح، در ولتاژ اعمالی به الکترودها محدودیت‌هایی وجود داشت.

در نمودار شکل ۵-۱۷ تأثیرات ولتاژ الکترود کندکننده بر حسب شدت جریان استخراج برای دو مدل هندسه الکترود کندکننده که ولتاژ الکترود استخراج ۱۴۰۰- ولت و ولتاژ الکترود شتابدهنده ۳۷۰۰- ولت می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۷ تأثیرات ولتاژ الکتروود کند کننده بر حسب شدت جریان استخراج برای دو مدل هندسه الکتروود کند کننده که ولتاژ الکتروود استخراج ۱۴۰۰- ولت و ولتاژ الکتروود شتابدهنده ۳۷۰۰- ولت

براساس نتایج بدست آمده میزان شدت جریان استخراج شده برای مدل الکتروود کند کننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای نسبت به مدل مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای افزایش پیدا کرده است که این نتایج را در نمونه‌های شبیه سازی شده (فصل ۳) نیز بدست آمده بود. نمودار شکل ۵-۱۸ تأثیر ولتاژ اتاقک یونش بر حسب شدت جریان استخراج شده در حضور سیستم استخراج و بدون آن نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده، زمانی که سیستم استخراج در مجموعه قرار داده شود، میزان شدت جریان استخراج افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت که این امر از لحاظ فیزیکی کاملاً قابل توجیه است.



شکل ۵-۱۸ تأثیر ولتاژ اتاقک یونش بر حسب شدت جریان استخراج شده در حضور سیستم استخراج و بدون آن

۵-۹ نتیجه گیری

در این پایان نامه طراحی و ساخت الکترودهای سیستم استخراج با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها صورت گرفت. مطابق با نتایج تجربی بدست آمده، برای رسیدن به حالت بهینه اپتیک باریکه یونی، استفاده از الکترودهای طراحی شده ضروری است. سیستم استخراج مورد مطالعه به دلیل طراحی جدید و استفاده نکردن از چسب، قابلیت تعویض قطعات و نصب قطعات جدید طراحی شده را خواهد داشت که این امر خود سبب مطالعه آسان‌تر بر روی قطعات جدید خواهد شد. براساس نتایج تجربی بدست آمده، جریان استخراج اندازه‌گیری شده در سیستم استخراج چهار الکترودی در مقایسه با چشمه یونی پنینگ بصورت خود استخراج و سیستم‌های دو و سه الکترودی افزایش قابل توجهی داشته یعنی در شرایط یکسان برای چشمه، شدت جریان استخراج با قراردادن

سیستم استخراج در مسیر باریکه حدود چهار برابر افزایش داشته است و همچنین تأثیر هندسه الکتروود استخراج استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار و الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای بر روی جریان استخراج شده مشهود است. با قراردادن الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای در مسیر استخراج باریکه، میزان شدت جریان استخراج شده حدود $2/5$ برابر نسبت به الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای تک پله‌ای افزایش یافته است.

۵-۱۰ پیشنهادات

به منظور تکمیل مطالعات صورت گرفته در این پایان نامه، انجام موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- مطالعه بر روی هندسه‌های مختلف الکتروودهای پیشنهاد شده در این پایان نامه و مقایسه با نتایج الکتروود استخراج استوانه‌ای با روزنه مخروطی زاویه دار و الکتروود کندکننده مخروطی استوانه‌ای دو کوهانی تک پله‌ای
- تست و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف باریکه برای گازهای مختلف
- تغییر در ساختار اتصالات الکتروودها به منظور تست و اندازه‌گیری شدت نشر و قطر باریکه
- مطالعه بر روی تأثیر ولتاژ بازدارنده^{۴۰} فنجان فارادی بر جریان استخراج شده

⁴⁰ Suppressor

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

[۲] عسگرپر م، (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بهینه‌سازی جریان باریکه شتاب‌دهنده الکترواستاتیک

۲۰۰kV"، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[3] V Ovalle *et al.*, (2007), "Studying charged particle optics: an undergraduate course", *European Journal of Physics*.

[4] Martin Reiser, (2008) "*Theory and Design of Charged Particle Beams*" John Wiley & Sons.

[5] N. Chauvin, (2014), "Spece-Charge Effects", *Accelerator Physics CERN Yellow*, pp.63-83

[6] Sander R, (1989), Accelerator Instruments, in *AIP Conference*

[7] Zou, Y., H. Li, M. Reiser, and P. G. O'Shea. (2004) "Theoretical study of transverse emittance growth in a gridded electron gun." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* ۵۱۹/۱-2: 432-441.

[8] Konuma. Ma, (2005), 'Plasma Techniquse for Film deposition, *Alpha Science International*, U.K.

[9] Chen .F.F, (1984), "*Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*" Plenum. Volume1, New York.

[۱۰] فتحی ع، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ کاتد سرد" دانشکده

مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[11] I. G. Brown, (2004), "*The physics and technology of ion sources*", John Wiley & Sons.

[12] Reiser, M., & O'Shea, P. (1994), "*Theory and design of charged particle beams*", Vol. 312, New York: Wiley.

[۱۳] مسلمی پورکانی م، ابراهیمی بسابی ا، سوهانی م، (۱۳۹۶)، "بررسی ترابری باریکه یونی از یک چشمه یونی

بر اساس لنزهای الکترواستاتیکی تعلیقی و منفرد" مقاله‌نامه کنفرانس فیزیک ایران

- [14] Liebl, H., (2008), “*Applied Charged Particle Optics*” 1st Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York
- [15] M. M. Abdelrahman, N. I. Basal, S. G. Zakhary, (2012), “Analytical and simulation studies for diode and triode ion beam extraction systems” *chinese Physics C*.
- [16] Muna A. Al-Khashab, Abdullah E. Al-Abdullah, (2013), “The Effect of bore Diameters in Tow Electrodes Electrostatic Immersion Lens Design”, Department of Physics College of Science Unuversity of Mosull, Raf. J. Sci, vol 24, no.2 pp.82-91
- [17] M. A. Al-Khashab, A. L. M. Al-Abdullah, (2013), “Effect of the Electrode Bore Angle on the Two-Electrode Electrostatic Immersion Lens Design” *Jordan Journal of Physics*, vol6, Namber 1, pp.1-5
- [18] T. Kalvas, (2014), “Beam Extraction and Transport”, Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland, *Accelerator Physics CERN*, pp. 537-564
- [19] Helmut Wiedemann, (2007) “*Particle Accelerator Physics*”, Springer.
- [۲۰] مسلمی پورکانی م، (۱۳۹۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد: طراحی و شبیه سازی عوامل موثر بر خروجی یا چشمه یونی پنینگ، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [21] Peter Markt, (1962), “Space-charge-Limited Currents in Organic Crystals”, *Journal of Applied Physics* 33, 205.
- [22] Sura A. Obaid, (2013) “Comparison between Two Types of Electrodes for Electrostatic Quadrupole Lens”, Department of Physiology and Medical Physics, College of Medecine, Al Nahrain University, Baghdad, Iraq
- [23] Stanley Humphries, Jr., (1986) “*Principles of Charged Particle Acceleration*”, John Wiley and Sons
- [24] Omer Sise, Melike Ulu and Mevlut Dogan, (2005) “Multi-element cylindrical electrostatic lens systems for focusing and controlling charged particles”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 1
- [25] Huashun Zhang, (1999) “*Ion Sources*”, Springer, Berlin
- [26] 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.

[27] Yang, Z., P. Dong, J. D. Long, T. Wang, C. H. Lan, Y. F. Peng, T. Wei, X. Z. He, K. Z. Zhang, and J. S. Shi. (2012) "The study of discharge characteristic of the cold-cathode negative hydrogen PIG-type ion source." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 685 pp 29-34.

[28] Fathi, A., S. A. H. Feghhi, 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.

[29] Hawkes, P. W., & Kasper, E., (1996). "Principles of electron optics", Vol. 3, Academic press.

[30] Szilagy, M. (2012), "Electron and ion optics", Springer Science & Business Media.

[۳۱] ساداتی س، (۱۳۸۶) پایان نامه ارشد: "مطالعه، طراحی، شبیه سازی و ساخت ستون شتابدهنده الکترواستاتیکی ۲۰۰ kV با استفاده از کدهای کامپیوتری Superfish و SIMION جهت تولید نوترون " گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[32] Brunt, J. N. H., and F. H. Read. (1975) "Aberrations in electrostatic lenses." *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 8, no. 12: 1015.

[33] Renau, A., and D. W. O. Heddle. (1986) "Geometric aberrations in electrostatic lenses: II. Aberration coefficients and their interrelations." *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 19, no. 4: 288.

[34] Saminathan, S. (2011), "Extraction and transport of ion beams from an ECR ion source", *Facilitair Bedrijf, University of Groningen, Groningen*.

[35] Alexander D. Dymnikov and Gary A. Glass, (2011), "Comparison Of Electromagnetic, Electrostatic And Permanent Magnet Quadrupole Lens Probe-Forming Systems For High Energy Ions", *Application of Accelerators in Research and Industry*

[36] Jack E. Manuel, Szabolcs Z. Szilasi, Dustin Phillips, Alexander D. Dymnikov, Tilo Reinert, Bibhudutta Rout, Gary A. Glass, (2017), "Design and construction of an electrostatic quadrupole

doublet lens for nuclear microprobe application”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 404

[37] Bushra J. Hussein, Intesar H. Hashim, Dheyaa A. Nasrallah, (2014), “Ion Beam Focusing in Solenoid Magnetic Field”, *Ibn Al-Haitham Journal For Pure And Applied Science*, Vol. 27 (3) 2014

[38] CST STUDIO SUITE manual, (2015)

[۳۹] فتحی م، (۱۳۹۹) پایان نامه ارشد: "طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ " دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود

[۴۰] ابراهیمی بسابی ا، (۱۳۹۴) ، رساله دکتری: "طراحی و ساخت فارادی کاب آرایه‌ای برای تشخیص پروفاایل باریکه در شتاب دهنده" دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتو، دانشگاه شهید بهشتی

[۴۱] صادقچه ز، (۱۳۹۹) پایان نامه ارشد: "طراحی سیستم اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی به روش GVM برای یک شتابدهنده الکترواستاتیک" 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. In this project, our goal is selecting the appropriate geometry of the ion extraction system that can obtain the beam with the highest current and the best emission intensity, and achieving this goal requires the design, simulation and construction of the Penning ion source extraction system. This thesis describes the design, simulation and fabrication of a cold cathode ion source extraction system with axial extraction. First, the physical principles, structure and performance of the extraction system are described and then, based on the simulations performed by CST software, the appropriate model is selected and the design and construction steps of the extraction system are described. Experimental results show that with the new design of the extraction and deceleration electrode, the extracted current is increased.

Keywords: Penning ion source, Extraction system, CST simulation program, Electrode geometry, Extraction current



**Shahrood University of
Technology**

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

Design and Construction of an Ion Beam Extraction System for a Penning Ion Source

By: Neda Fathi Amin

Supervisor:

Dr. Ehsan Ebrahimibasabi

Advisor:

Dr. Seyyed Mostafa Sadat

October, 2021