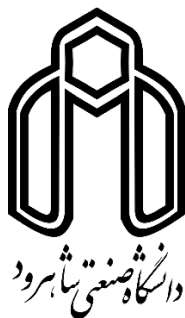


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

طراحی و شبیه سازی عوامل موثر بر خروجی یک چشمه یونی پنینگ

نگارنده: محسن مسلمی پورکانی

اساتید راهنما

دکتر مسلم سوهانی

دکتر احسان ابراهیمی بسابی

بهمن ۱۳۹۶

شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محسن مسلمی پورکانی
با شماره دانشجویی ۹۴۱۶۵۷۴ رشته فیزیک گرایش هسته‌ای
تحت عنوان طراحی و شبیه سازی عوامل موثر بر خروجی یک چشمه یونی پنینگ
که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل
اعلام می گردد:

☐ قبول (با درجه:)	☐ مردود
☒ نظری	☐ عملی
نوع تحقیق:	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مسلم سوهانی	استاد یار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر احسان ابراهیمی بسابی	استاد یار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	سید علی حسینی منصوری	استاد یار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حسن حسن آبادی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین توکلی عنبران	دانش یار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهیاری موفقی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



این اثر را با احترامات بی‌شائبه تقدیم می‌کنم به:

روح والامقام پدر عزیزم که اولین معلم زندگی‌ام بود و جوانمردی و اخلاق را سرمشق همیشگی‌ام قرارداد. پدری که اگرچه جسم خاکی‌اش در این دنیای فانی به اراده‌ی خالق هستی مرا در فراز و نشیب‌های روزهای تنهایی‌ام همراهی نکرد اما دعای خیرش همیشه و همه جا همراه و نگهبان و پشتیبانم بوده و خواهد بود.

مادر عزیزتر از جانم که عاشقانه تمام خود را بی‌هیچ چشم‌داشتی نثارم نمود و در لحظه لحظه‌ی زندگی‌ام همراهی‌ام کرد. او که برایم بهترین، مهربان‌ترین، فداکارترین و بی‌ادع‌ترین است. شمع وجودش روشنایی بخش همیشگی زندگی‌ام خواهد بود تا در بیراهه‌های حراس انگیز این دنیا راه را گم نکنم.

برادر مهربانم که جوانی‌اش را در راه پدری کردن برایم پیرکرد و همچون پدری دلسوز مرا در راه رسیدن به قله‌های پیشرفت و ترقی همراهی نمود.

تشکر و قدردانی:

اکنون که پس از سعی و تلاش و همت بسیار و با کمک و راهنمایی‌های راهگشای اساتید گرانقدرم و در راس همه به لطف خدای منان موفق به گردآوری این مجموعه علمی شده‌ام بر خود وظیفه می‌دانم تا از زحمات کلیه اساتید محترم به ویژه از جناب آقای دکتر مسلم سوهانی و جناب آقای دکتر احسان ابراهیمی از صمیم قلب تشکر و قدردانی نمایم. چرا که اگر توفیقی در مطلوب واقع شدن این مجموعه علمی حاصل شده است، بی‌شک به جهت راهنمایی‌ها، دلسوزی‌ها و سختگیری‌های متعهدانه این بزرگواران می‌باشد. خدا را به خاطر قرار دادن این عزیزان در مسیر حرکت علمی خود شاکرم و برایشان سلامتی و توفیقات روزافزون آرزومندم.

تعهدنامه :

اینجانب **محسن مسلمی پورکانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان **طراحی و شبیه‌سازی عوامل موثر بر خروجی چشمه‌ی یونی پنینگ تحت راهنمایی دکتر مسلم سوهانی و دکتر احسان ابراهیمی بسابی** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش دیگر پژوهشگران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

محسن مسلمی

بهمن ۱۳۹۶

مالکیت نتایج و حق نشر

- تمام حقوق مادی و معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم-افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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 این پایان نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

چشمه‌ی یونی وسیله‌ای است که باریکه‌ای از یون‌ها را تولید می‌کند. چشمه‌های یونی در طیف سنجی جرمی، جداسازی ایزوتوپی، همجوشی هسته‌ای، شتابدهنده‌ها، تولید نوترون، کاشت یون و حکاکی با یون استفاده می‌شوند. چشمه‌ها انواع مختلفی دارند که یکی از مهمترین آن‌ها چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG می‌باشد. این چشمه با توجه به سادگی ساختار و طول عمر بیشتر نسبت به دیگر چشمه‌ها، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. امروزه همه‌ی چشمه‌ها قبل از ساخت شبیه‌سازی می‌شوند، در این پایان نامه کار شبیه‌سازی چشمه‌ی پنینگ با استفاده از نرم افزار CST انجام و تاثیر عوامل مختلف روی باریکه‌ی یون خروجی از چشمه بیان شده است. از بین چیدمان‌های مختلف آهنربای دائمی دور چشمه، چیدمان دربرگیرنده‌ی حلقه‌ای برای محصورسازی ذرات داخل چشمه مفیدتر است. بهترین پتانسیل آند، کاتد و الکتروود استخراج هم به ترتیب ۱۵+، ۵۰۰- و ۳۰۰۰- ولت می‌باشد. برای انتقال باریکه خروجی از سیستم استخراج از الکترودهای کندکننده و شتابدهنده استفاده شده است. همچنین برای متمرکزسازی باریکه از لنزهای الکترواستاتیکی استفاده شده است. در بحث اپتیک باریکه و لنزهای الکترواستاتیکی برای کانونی کردن باریکه سیستم تریودی (لنزهای تعلیقی) نسبت به سیستم دیودی (لنزهای غوطه‌ور) مفیدتر بوده است.

کلمات کلیدی: شتابدهنده، چشمه‌ی یونی، پلاσμα، یونش، آند، کاتد، سیستم استخراج،

باریکه‌ی یونی، لنزهای الکترواستاتیکی.

مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. بررسی ترابرد باریکه یونی از یک چشمه یونی براساس لنزهای الکترواستاتیکی تعلیقی و

منفرد - کنفرانس فیزیک ۹۶ - ارائه به صورت پوستر

۲. بررسی چیدمان‌های آهنربای دائمی در چشمه‌ی یونی پنینگ - سومین کنفرانس ملی

شتابگرهای ذرات و کاربردهای آن‌ها - ارائه به عنوان پوستر

۳. بررسی سیستم استخراج دیودی و تریودی در چشمه‌ی یونی پنینگ - کنفرانس هسته‌ای

۹۶ - ارائه به صورت پوستر

۱ فصل اول: معرفی انواع چشمه‌های یونی	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ تاریخچه توسعه چشمه‌های یونی	۳
۱-۳ کاربردهای مهم چشمه‌های یونی	۶
۱-۴ طبقه‌بندی چشمه‌های یونی	۸
۱-۵ برخی از مهمترین چشمه‌های یونی	۱۰
۱-۵-۱ چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG	۱۰
۱-۵-۲ چشمه‌ی یونی تشدید سیکلوترونی الکترون	۱۰
۱-۵-۲-۱ مکانیسم عملکرد	۱۳
۱-۵-۳ چشمه‌ی یونی میکروویو	۱۵
۱-۵-۴ چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون	۱۸
۱-۵-۵ چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ	۲۰
۲ فصل دوم: چشمه‌ی یونی پنینگ	۲۵
۲-۱ مقدمه	۲۶
۲-۲ سیر تکامل چشمه یونی PIG	۲۶
۲-۳ کاربردهای چشمه یونی PIG	۳۰
۲-۴ ساختار و مکانیسم عملکرد چشمه یونی PIG	۳۰
۲-۴-۱ عوامل موثر بر عملکرد چشمه یونی PIG	۳۵

۳۵	 ۱-۱-۴-۲ میدان مغناطیسی
۳۵	 ۲-۱-۴-۲ فشار
۳۶	 ۳-۱-۴-۲ اختلاف پتانسیل
۳۶	 ۴-۱-۴-۲ جنس کاتد
۳۶	 ۵-۲ سیستم استخراج و انتقال باریکه
۳۷	 ۱-۵-۲ سیستم استخراج باریکه
۳۸	 ۱-۱-۵-۲ شکل‌گیری باریکه‌ی یونی در سیستم استخراج
۳۹	 ۲-۱-۵-۲ ساختار سیستم استخراج
۴۱	 ۳-۱-۵-۲ هندسه الکترودها
۴۱	 ۲-۵-۲ سیستم متمرکزسازی در انتقال باریکه
۴۲	 ۱-۲-۵-۲ لنزهای الکترواستاتیکی و انواع آن
۴۲	 ۱-۱-۲-۵-۲ سیستم دیودی
۴۳	 ۲-۱-۲-۵-۲ سیستم تریودی
۴۹	 ۳ فصل سوم: شبیه‌سازی چشمه یونی پنینگ
۵۰	 ۱-۳ مقدمه
۵۰	 ۱-۱-۳ معرفی نرم افزار CST
۵۳	 ۲-۳ فرآیند شبیه سازی چشمه
۵۳	 ۱-۲-۳ اتاقک یونش
۵۵	 ۲-۲-۳ سیستم استخراج

- ۳-۲-۳ عوامل موثر بر پروفایل باریکه ۵۶
- ۳-۲-۳-۱ پتانسیل آند و آنتی کاتد ۵۷
- ۳-۲-۳-۲ شعاع روزنه‌ی خروجی ۵۹
- ۳-۳-۲-۳ اثر میدان مغناطیسی بر روی چشمه یونی ۶۱
- ۳-۳-۲-۳-۱ چیدمان آهنرباها ۶۱
- ۳-۳-۲-۳-۲ طول آهنرباها ۶۸
- ۳-۳-۳-۲-۳ شدت میدان مغناطیسی آهنربا ۷۲
- ۳-۲-۴ سیستم استخراج ۷۵
- ۳-۴-۲-۱ سیستم دو الکترودی ۷۵
- ۳-۴-۲-۱-۱ پتانسیل الکتروود استخراج ۷۶
- ۳-۴-۲-۱-۲ زاویه‌ی الکتروود استخراج ۷۹
- ۳-۴-۲-۱-۳ فاصله‌ی الکتروود استخراج از آنتی کاتد ۸۰
- ۳-۴-۲-۲ سیستم سه الکترودی ۸۵
- ۳-۴-۲-۲-۱ پتانسیل الکتروود کندکننده ۸۵
- ۳-۴-۲-۲-۲ فاصله‌ی الکتروود کندکننده از الکتروود استخراج ۸۷
- ۳-۴-۲-۳ قطر دهانه‌ی الکتروود کندکننده ۹۰
- ۳-۴-۲-۴ زاویه‌ی الکتروود کندکننده ۹۰
- ۳-۴-۲-۵ طول الکتروود کندکننده ۹۱
- ۳-۲-۵ سیستم انتقال باریکه ۹۲

۹۳	 ۱-۵-۲-۳ الکترو د شتابدهنده
۹۴	 ۲-۵-۲-۳ الکترواستاتیکی
۹۴	 ۱-۲-۵-۲-۳ لنزهای دوتایی (غوطه‌ور)
۹۵	 ۱-۱-۲-۵-۲-۳ پتانسیل لنز دوم
۹۷	 ۲-۱-۲-۵-۲-۳ ضخامت لنزها
۹۹	 ۳-۱-۲-۵-۲-۳ فاصله‌ی بین لنزها و الکترو د شتابدهنده
۱۰۰	 ۴-۱-۲-۵-۲-۳ طول لنزها
۱۰۱	 ۵-۱-۲-۵-۲-۳ فاصله‌ی بین لنزها
۱۰۳	 ۲-۲-۵-۲-۳ لنزهای سه‌تایی (تعلیقی)
۱۰۴	 ۱-۲-۲-۵-۲-۳ پتانسیل لنز میانی
۱۰۶	 ۲-۲-۲-۵-۲-۳ ضخامت لنزها
۱۰۷	 ۳-۲-۲-۵-۲-۳ مدهای مختلف لنزهای تعلیقی
۱۱۱	 ۴ فصل چهارم: جمع‌بندی و پیشنهاد
۱۱۶	 ۱-۴ پیشنهاد
۱۱۷	 ۵ پیوست الف) تقسیم‌بندی کلی چشمه‌ها
۱۲۲	 ۶ فهرست منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: چشمه‌ی یونی ECR برای کاربرد کاشت یون ۱۲
- شکل ۲-۱: برش مقطعی از یک چشمه یونی ECR ۱۲
- شکل ۳-۱: توزیع میدان مغناطیسی در راستای شعاع و محور در اتاقک یونش چشمه‌ی یونی ECR ۱۵
- شکل ۴-۱: چشمه‌ی یونی میکروویو فشرده از نوع آنتنی ۱۶
- شکل ۵-۱: چشمه‌ی یونی میکروویو از نوع کاواک ۱۶
- شکل ۶-۱: نمایی از یک چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون ۱۹
- شکل ۷-۱: تراکم پلاسما در چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون ۲۰
- شکل ۸-۱: انواع چیدمان آهنربا در چشمه‌های مولتی کاسپ برای محصورسازی پلاسما ۲۲
- شکل ۹-۱: چیدمان قطب‌ها به صورت تناوبی در چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ ۲۳
- شکل ۱۰-۱: چیدمان آهنرباها و ساختار اتاقک تخلیه‌ی چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ ۲۴
- شکل ۱-۲: نمایی از چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG ۳۱
- شکل ۲-۲: چشمه‌ی پلاسما و سیستم استخراج آن ۳۷
- شکل ۳-۲: سیستم استخراج دیودی (سمت چپ) و تریودی (سمت راست) ۳۹
- شکل ۴-۲: اعمال پتانسیل به سیستم استخراج چشمه‌ی یون ۴۰
- شکل ۵-۲: زاویه‌ی پیرس در سیستم استخراج ۴۱
- شکل ۶-۲: لنزهای غوطه‌ور در دو مد الف) شتابدهنده و ب) کندکننده ۴۳
- شکل ۷-۲: توزیع پتانسیل لنزهای اینزل ۴۴
- شکل ۸-۲: نسبت قدرت لنزهای اینزل به پتانسیل الکتروود میانی ۴۵
- شکل ۹-۲: میدان الکتریکی، پتانسیل و باریکه‌ی عبوری از لنزهای اینزل در پتانسیل صفر و ۴۰۰ ولت ۴۶

- شکل ۲-۱۰: هندسه‌ی لنزهای اینزل ۴۷
- شکل ۲-۱۱: مثالی از لنزهای اینزل در مد کندکننده- شتابدهنده ۴۷
- شکل ۲-۱۲: هندسه‌ی مفید برای لنزهای اینزل در مد شتابدهنده- کندکننده ۴۸
- شکل ۳-۱: ساختار اتاقک یونش چشمه‌ی پنینگ ۵۳
- شکل ۳-۲: سطح تابنده ذره‌ی باردار که به عنوان پلاسمای درون چشمه شبیه سازی شده است ۵۴
- شکل ۳-۳: مسیر حرکت ذرات باردار در چشمه با اعمال پتانسیل ۱۵+ ولت به آند و ۵۰۰- ولت به کاتدها ۵۵
- شکل ۳-۴: مسیر حرکت باریکه در سیستم استخراج چشمه با و بدون الکتروستاتیک کننده ۵۶
- شکل ۳-۵: سطوح هم‌پتانسیل چشمه با و بدون الکتروستاتیک کننده ۵۶
- شکل ۳-۶: بیشینه چگالی جریان باریکه خروجی بر حسب پتانسیل کاتد ۵۷
- شکل ۳-۷: واگرایی باریکه‌ی خروجی بر حسب پتانسیل آنتی کاتد ۵۸
- شکل ۳-۸: باریکه‌ی خروجی از چشمه به ازای اعمال چند پتانسیل مختلف به آنتی کاتد ۵۹
- شکل ۳-۹: باریکه‌ی خروجی از سیستم بر حسب قطرهای مختلف روزنه‌ی آنتی کاتد ۶۰
- شکل ۳-۱۰: قطر باریکه‌ی خروجی بر حسب قطر روزنه‌ی آنتی کاتد در ۲۰ میلیمتری از آن ۶۱
- شکل ۳-۱۱: سه چیدمان مختلف آهنربای دائمی اطراف چشمه الف) جانبی، ب) دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای، ج) دربرگیرنده‌ی دو و سه حلقه‌ای ۶۲
- شکل ۳-۱۲: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محور آند برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای ۶۲
- شکل ۳-۱۳: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای ۶۳

- شکل ۳-۱۴: شدت میدان مغناطیسی روی محور آند برای دو چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای دو و سه حلقه‌ای ۶۴
- شکل ۳-۱۵: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو چیدمان دربرگیرنده دو و سه حلقه‌ای ۶۴
- شکل ۳-۱۶: تعداد یون‌های درون چشمه برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای .. ۶۵
- شکل ۳-۱۷: تعداد یون‌های درون چشمه برای دو چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای دو و سه حلقه‌ای ۶۵
- شکل ۳-۱۸: توزیع الکترون در چیدمان‌های مختلف آهنرباهای دائمی ۶۶
- شکل ۳-۱۹: تعداد الکترون‌های موجود در چشمه با گذشت زمان برای چیدمان‌های مختلف آهنربا ۶۷
- شکل ۳-۲۰: باریکه‌ی خروجی از چشمه برای چیدمان‌های مختلف آهنربای دائمی ۶۸
- شکل ۳-۲۱: شدت میدان مغناطیسی محوری و شعاعی برای سه طول مختلف آهنربای دائمی ۶۹
- شکل ۳-۲۲: بیشینه چگالی جریان باریکه‌ی خروجی از چشمه بر حسب طول آهنرباها ۷۰
- شکل ۳-۲۳: زمان ترابرد یون‌ها بر حسب طول آهنرباها ۷۰
- شکل ۳-۲۴: جریان ایجاد شده در آنتی کاتد بر حسب طول آهنرباها ۷۱
- شکل ۳-۲۵: باریکه‌ی خروجی از چشمه برای چند طول مختلف آهنرباها ۷۱
- شکل ۳-۲۶: باریکه‌ی خروجی از چشمه در شدت‌های مختلف آهنرباها ۷۳
- شکل ۳-۲۷: شدت میدان مغناطیسی در امتداد محوری و شعاعی برای چند شدت مختلف آهنرباها ۷۳
- شکل ۳-۲۸: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب شدت میدان آهنرباها ۷۴
- شکل ۳-۲۹: زمان ترابرد تعداد یکسان یون بر حسب شدت میدان آهنرباها ۷۴

شکل ۳-۳۰: جریان ایجاد شده در آنتی کاتد بر حسب شدت میدان آهنرباها ۷۵

شکل ۳-۳۱: باریکه خروجی از سیستم استخراج در پتانسیل های الف (۱/۵، ب) ۳ و ج) ۶ کیلوولتی ۷۷

شکل ۳-۳۲: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب پتانسیل الکتروود استخراج .. ۷۸

شکل ۳-۳۳: قطر باریکه ی خروجی از الکتروود استخراج بر حسب پتانسیل در فاصله ی ۱۰ میلی متری این الکتروود ۷۸

شکل ۳-۳۴: چگالی جریان خروجی بر حسب زاویه ی الکتروود استخراج ۷۹

شکل ۳-۳۵: شدت نشر باریکه خروجی بر حسب زاویه ی الکتروود استخراج ۸۰

شکل ۳-۳۶: قطر باریکه ی خروجی بر حسب زاویه ی الکتروود استخراج ۸۰

شکل ۳-۳۷: باریکه ی خروجی بر حسب چند فاصله ی مختلف الکتروود استخراج از آنتی کاتد ۸۲

شکل ۳-۳۸: جریان ایجاد شده در الکتروود استخراج بر حسب فاصله اش از آنتی کاتد ۸۳

شکل ۳-۳۹: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب فاصله ی الکتروود استخراج از آنتی کاتد ۸۳

شکل ۳-۴۰: شدت نشر باریکه ی خروجی بر حسب فاصله ی الکتروود استخراج از آنتی کاتد ... ۸۴

شکل ۳-۴۱: قطر باریکه ی خروجی بر حسب فاصله ی الکتروود استخراج از آنتی کاتد در فاصله ی ۴ سانتی متری از الکتروود استخراج ۸۴

شکل ۳-۴۲: باریکه ی خروجی بر حسب پتانسیل های مختلف الکتروود کندکننده ۸۶

شکل ۳-۴۳: قطر باریکه خروجی بر حسب پتانسیل الکتروود کندکننده در فاصله ی ۳۰ میلی متری از آن ۸۷

شکل ۳-۴۴: باریکه خروجی در فاصله های مختلف الکتروود کندکننده از الکتروود استخراج ۸۸

شکل ۳-۴۵: جریان ایجاد شده ناشی از برخورد یون ها به الکتروود کندکننده بر حسب فاصله از الکتروود استخراج ۸۹

- شکل ۳-۴۶: شدت نشر باریکه خروجی از الکتروند کندکننده بر حسب فاصله این الکتروند از الکتروند استخراج ۸۹
- شکل ۳-۴۷: قطر باریکه‌ی خروجی از الکتروند کندکننده بر حسب فاصله از الکتروند استخراج ۹۰
- شکل ۳-۴۸: قطر باریکه‌ی خروجی از الکتروند کندکننده در فاصله‌ی ۹ سانتیمتری از آن .. ۹۱
- شکل ۳-۴۹: باریکه‌ی خروجی از الکتروند کندکننده به ازای چند طول مختلف این الکتروند . ۹۲
- شکل ۳-۵۰: باریکه‌ی خروجی از چشمه با حضور الکتروند شتابدهنده ۹۳
- شکل ۳-۵۱: باریکه‌ی خروجی از چشمه با حضور الکتروند شتابدهنده و تغییر پتانسیل الکتروند استخراج ۹۴
- شکل ۳-۵۲: باریکه خروجی از لنزهای غوطه‌ور برای چند پتانسیل مختلف لنز دوم..... ۹۶
- شکل ۳-۵۳: بیشینه میدان الکتریکی بین لنزها بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به اول ۹۶
- شکل ۳-۵۴: قطر باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول ۹۷
- شکل ۳-۵۵: چگالی جریان نقطه‌ی کانونی بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول ۹۷
- شکل ۳-۵۶: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در ضخامت‌های مختلف ۹۸
- شکل ۳-۵۷: شدت نشر باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب ضخامت لنزها ۹۹
- شکل ۳-۵۸: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در فاصله‌های مختلف از الکتروند شتابدهنده ۱۰۰
- شکل ۳-۵۹: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در طول‌های مختلف آن ۱۰۱
- شکل ۳-۶۰: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در چند فاصله‌ی مختلف بین آنها ۱۰۲
- شکل ۳-۶۱: شدت نشر باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب فاصله‌ی بین آنها ۱۰۳
- شکل ۳-۶۲: باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی به ازای چند پتانسیل مختلف لنز میانی .. ۱۰۵
- شکل ۳-۶۳: فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی بر حسب نسبت پتانسیل لنز

- میان‌ی به لنزهای طرفین ۱۰۶
- شکل ۳-۶۴: چگالی جریان نقطه‌ی کانونی بر حسب نسبت پتانسیل لنز میان‌ی به لنزهای طرفین ۱۰۶
- شکل ۳-۶۵: باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی در مدهای مختلف ۱۰۸
- شکل ۳-۶۶: میدان الکتریکی درون لنزهای تعلیقی در راستای محوری و شعاعی برای سه مد عملکرد ۱۰۸
- شکل ۳-۶۷: فاصله‌ی کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میان‌ی به لنزهای اطراف برای سه مد مختلف ۱۰۹
- شکل ۳-۶۸: فاصله‌ی کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میان‌ی به لنزهای دیگر برای لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی ۱۰۹
- شکل ۴-۱: نمایی از ساختار نهایی چشمه ۱۱۳
- شکل ۴-۲: مشخصات هندسی اتاقک یونش ۱۱۴
- شکل ۴-۳: مشخصات هندسی سیستم استخراج ۱۱۴
- شکل ۴-۴: مشخصات هندسی سیستم انتقال ۱۱۵
- شکل ۴-۵: پارامترهای خروجی از چشمه در هر بخش ۱۱۵

۱ فصل اول: معرفی انواع چشمه‌های یونی

۱-۱ مقدمه

چشمه‌ی یون، یک علم نیمه تجربی و فنی بسیار گسترده با کاربردهای فراوان می‌باشد. این علم اگرچه قدیمی است اما هنوز به سرعت در حال توسعه است و پیشرفت آن به بسیاری از رشته‌های علمی و فناوری‌های صنعتی وابسته است. بحث چشمه‌های یون در بسیاری از علوم بنیادی مثل فیزیک پلاسما، شیمی پلاسما، فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای اهمیت دارد. مرزهای علمی و تکنولوژیکی طیف سنجی جرمی، شتابدهنده‌ها، جداسازی ایزوتوپی، استفاده از نیرومحرکه‌ی یون، همجوشی گرما هسته‌ای کنترل شده و پرتودرمانی از جمله مباحثی هستند که منجر به توسعه‌ی چشمه‌ها می‌شوند. امروزه چشمه‌های یونی بیشتر برای فرایندهای صنعتی مثل کاشت یون، حکاکی با یون، میکروآنالیز، میکروساخت و غیره مهم هستند [۱].

پیشرفت چشمه‌های یون تنها به دانش‌های علمی مختلف مثل تخلیه‌ی الکتریکی داخل گاز، فیزیک اتمی، فیزیک پلاسما، فیزیک سطح، اپتیک یون و ریاضیات کامپیوتری بستگی ندارد، بلکه به بسیاری از تکنولوژی‌هایی که اخیراً توسعه پیدا کردند مثل ابزار تشخیصی باریکه، تجهیزات ولتاژ بالای پیشرفته، سیستم‌های خلاء جدید، میدان‌های مغناطیسی بزرگ و با دقت بالا، تفنگ‌های الکترونی با شدت جریان بالا، میکروکامپیوترها و مواد خاص هم بستگی دارد [۱].

مطالعات گسترده‌ای در هشتاد سال گذشته پیرامون این بحث انجام شده که یکی از نمودهای آن مقالاتی است که در این باره نوشته شده، برای مثال در دهه‌ی گذشته در هر سال حدود ۴۰۰ مقاله در کنفرانس‌ها و مجلات مختلف در موضوع چشمه‌های یونی ارائه و به چاپ رسیده است [۱]. موضوع این پایان‌نامه مطالعه و شبیه‌سازی یکی از قدیمی‌ترین و همچنان مهمترین نوع چشمه‌ی یونی به نام چشمه‌ی یونی پنینگ^۱ است.

^۱ Penning Ion source

۱-۲ تاریخچه توسعه چشمه های یونی

در آغاز قرن بیستم برخی چشمه های یونش سطحی^۱ (SIS) و چشمه های برخورد الکترون^۲، با شدت و انرژی کم، در طیف سنجی جرمی استفاده و توسعه داده شد. در دهه ی ۳۰ موفقیت های شتابدهنده ی کوک کرافت- والتون^۳ باعث توسعه ی چشمه های تخلیه ی گازی (تخلیه الکتریکی داخل گاز) با فرکانس بالا شد که از نمونه می توان به چشمه ی پنینگ (PIG) اشاره کرد [۱].

در طی جنگ جهانی دوم برنامه جداسازی ایزوتوپی ارتقاء یافت، که این امر منجر به توسعه ی چشمه های یونی گردید. با مطالعه بر روی چشمه ی پلاسمای کاند گرم^۴ (HCPS) در یک میدان مغناطیسی و همین طور چشمه ی یون های سنگین فلزی، جریان باریکه ی خروجی از 10^{-6} تا 10^{-1} آمپر افزایش یافت.

دهه ی ۵۰ (۱۹۵۰ تا ۱۹۵۹) دوره ای بود که چشمه ها به سرعت توسعه داده شدند، همین امر باعث توسعه تعداد زیادی از شتابدهنده های وان دوگراف شد. مطالعه روی چشمه های رادیو فرکانسی^۵ (RF) و توسعه ی شتابدهنده های انرژی بالا باعث ابداع و توسعه ی چشمه ی دوپلاسماترون^۶ (DP) شد. شتابدهنده ی تاندم^۷ به توسعه ی چشمه ی یون منفی^۸ کمک کرد. به علاوه تحقیقات مستقل روی چشمه برخورد الکترون^۹، که برای کاربردهای نیرومحرکه ای استفاده می شد، منجر به توسعه ی فنی استفاده از چند روزنه ی استخراج و خنثی سازی بار فضایی شد [۱].

^۱ Surface Ion Source

^۲ Electron Impact Source

^۳ Cockcroft-Walton

^۴ Hot Cathode Plasma Source

^۵ Radio Frequency

^۶ Duoplasmatron

^۷ Tandem

^۸ Negative Ion Source

^۹ Electron Impact Source

در طول دهه‌ی ۶۰ انواع مختلف چشمه‌ها پیشرفت کردند. چشمه‌ی دوپلاسماترون به طور ویژه و با جزئیات بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت، چشمه‌ی پنینگ هم برای تولید یون‌های چند باری مطابق با نیاز تحقیقات فیزیکی یون‌های سنگین، مورد استفاده قرار گرفت [۱].

در دهه‌ی ۷۰ تحقیقات روی چشمه به دوره‌ی باشکوه‌ی وارد شد. نیازهای جدیدی که در رشته‌های علمی مختلف مطرح شده بود و موفقیت‌های جدید در بحث چشمه‌ها که در دیگر رشته‌های فیزیک بنیادی مثل فیزیک پلاسما و فیزیک سطح ایجاد شده بود، درک و توسعه‌ی چشمه‌ها را افزایش داد [۱].

از دهه‌ی ۸۰ به بعد در بحث پیشرفت و توسعه چشمه‌ها به صورت موردی اشاره می‌شود [۱]:

(۱) در تحقیقات همجوشی هسته‌ای به یک تزریق‌کننده‌ی قدرتمند ذرات خنثی نیاز است. در همین رابطه انواع چشمه‌هایی که در آنها تخلیه الکتریکی با کاتد گرم صورت می‌گیرد و مخصوصاً چشمه‌ی یون مولتی‌کاسپ^۱ استفاده و توسعه داده شد. در این چشمه‌ها که ایجاد پلاسمای پایدار شرط مهمی بود از سیستم استخراج با چند روزنه استفاده می‌شد. همه‌ی این عوامل جریان باریکه یون هیدروژن را از ۱ به ۱۰۰ آمپر، انرژی باریکه را از ۲۰ تا ۵۰۰ کیلوالکترون‌ولت و زمان تناوب چشمه (چشمه‌های پالسی) را از یک هزارم ثانیه تا ۱۰ ثانیه افزایش داد.

(۲) انواع چشمه‌ی یون منفی پاشنده^۲ (SNIS) با لایه‌ی سزیم برای برطرف کردن نیازهای شتابدهنده تاندم ساخته شد.

(۳) انواع جدید چشمه‌های یون چند باری مثل چشمه‌ی یون باریکه الکترون^۳، چشمه‌ی

^۱ Multicusp

^۲ Sputter Negative Ion Source

^۳ Electron Beam Ion Source (EBIS)

یون تشدید سیکلوترونی الکترون^۱، چشمه‌ی یون خلاء تبخیر فلزات^۲، چشمه یون پلاسمای لیزر^۳ و غیره برای برآورده کردن نیازهای فیزیک یون‌های سنگین توسعه داده شد. از آن زمان به بعد تقریباً همه‌ی یون‌های سنگین قابلیت تولید داشتند و تحقیقات چشمه به مرحله‌ی جدیدی رسید که تقریباً همه‌ی پارامترهای پلاσμα باید شدیداً کنترل می‌شد.

(۴) چشمه‌ی یون قطبیده^۴ به طور گسترده مطالعه و در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای و فیزیک انرژی بالا بهبود پیدا کرد.

(۵) باریکه‌ی پایدار یونی در حد چند ۱۰ میلی آمپر در صنعت نیمه رساناها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاشت یون و لیتوگرافی به یک باریکه‌ی متمرکز نیازمندیم و باریکه‌ی یونی پرانرژی و پرشدت همچنین در تغییر سطح و تولید آلیاژهای سطحی کاربرد دارد. برای این کاربردها چشمه‌های یون فلزی^۵، چشمه‌ی یون میکروویو^۶، چشمه‌ی یون خلاء تبخیر فلزات^۷، چشمه‌ی یونش با میدان قوی^۸ مورد مطالعه قرار گرفت. تولید باریکه‌ی یون رادیواکتیو^۹ به سرعت توسعه داده شد. برای تولید یون‌های رادیواکتیو به چشمه‌هایی با حالت بار زیاد، یونهای با خلوص بالا، بازده یونش بالا و زمان استراحت کم نیاز است. در این رابطه چشمه‌های HCPS, SIS, LIS, ECRIS و غیره مطالعه شدند.

(۶) چندین نوع چشمه‌ی یونی مهم مثل چشمه‌ی یون میکروویو، چشمه‌ی یون

^۱ Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS)

^۲ Metal Evaporation Vacuum (MEVVA)

^۳ Laser Ion Source (LIS)

^۴ Polarized Ion Source

^۵ Metal Ion Source

^۶ Microwave Ion Source (MWIS)

^۷ Metal Evaporation Vacuum Ion Source

^۸ Gas Field Ion Source (GFIS)

^۹ Radioactive ion beam (RIB)

مولتی کاسپ آهنربایی، چشمه‌ی یون خلاء تبخیر فلزات در اندازه‌های مختلف در دسترس قرار گرفت.

(۷) پیشرفت زیادی در برخی انواع ترکیب شده از چشمه‌های یون مثل ECR+Cusped، DP+Cusped و DP+PIG+Cusped شکل گرفت.

از این تاریخچه می‌توان نتیجه گرفت که انگیزه‌ی اصلی استفاده و توسعه‌ی چشمه‌ها نیازهای جدیدی بوده که بوسیله‌ی رشته‌های مختلف علمی یا فناوری‌های جدید مطرح شده است. لذا ساخت چشمه‌های جدید منجر به نتایج جدیدی هم در رشته‌های مختلف شده است. به دیگر بیان هر موفقیت اساسی در فناوری چشمه‌ها باعث رشد رشته‌های دیگر علمی و فنی شده است. به این ترتیب می‌توان پیش‌بینی کرد که توسعه‌ی چشمه‌های یونی همچنان ادامه پیدا خواهد کرد.

۱-۳ کاربردهای مهم چشمه‌های یونی

نیاز به چشمه‌های یونی در رشته‌های علمی و مهندسی مختلف با هم یکسان نیست، در واقع هیچ چشمه‌ای وجود ندارد که برای همه‌ی کاربردها مناسب باشد. برای انتخاب یک چشمه‌ی مناسب برای یک هدف خاص، شناخت انواع نیازها و ویژگی‌های خاص انواع چشمه‌ها بسیار مهم است. جدول ۱-۱ کاربردهای چشمه‌های یونی را به تفکیک نوع یون و چشمه بیان می‌کند. عملکرد چشمه‌ی یون بستگی به تکنولوژی و تنظیم آن چشمه برای کاربرد مورد نظر دارد. به همین دلیل است که چشمه‌ی یونی یک دانش فنی و نیمه‌تجربی است. بنابراین معمولاً یک معیاری برای تنظیم چشمه لازم است و این معیار ارتباط تنگاتنگی با هدف استفاده از آن چشمه دارد [۱].

جدول ۱-۱: کاربردهای چشمه‌های یون به تفکیک نوع یون و چشمه [۱]

کاربردها	یون	چشمه ها
طیف سنج جرمی	عناصر مختلف	SIS , EIS , MEVVA , ECR
جداسازی ایزوتوپی	عناصر مختلف	ECR , LIS , SIS , MEVVA , NIS , HCPS
تولید کننده نوترون	D^+ و H^+	DP , HCPS , PIG , Bucket
شتابدهنده- ی وان-دو-گراف	He^+ و H^+	RF , DP , ECR
شتابدهنده- ی تاندم	انواع یون‌های منفی	SNIS , DP
شتابدهنده- ی انرژی بالا	H^+	DP , ECR , Bucket , polarized
	H^-	SPS , Volume H-
شتابدهنده- ی یون‌های سنگین	انواع یون‌های چندبار بار مثبت	ECR , EBIS , LIS , SIS , PIG
جوش هسته‌ای	D^+ و H^+	Bucket , DuoPIG
	D^- و H^-	SPS , Volume H-
نیرو محرکه- ی یون	Hg^+ و Cs^+ و Xe^+	RF , EIS
کاشت یون	B^+ و P^+ و As^+ و ...	ECR , MEVVA , DP , HCPS
	NIS و PIS	HFIS , DP , NIS
حکاکی با یون	Cr^+ و Ar^+ و N^+	ECR , MEVVA , HCPS , DP , NIS

در اصل دو جنبه برای مطالعه و طراحی چشمه‌ی یون وجود دارد: تولید یون و استخراج یون.

برای مثال در یک چشمه‌ی یونی پلاسما، ابتدا با تخلیه‌ی الکتریکی داخل گاز یک پلاسما تولید

می‌شود و سپس بوسیله‌ی لنزهای الکترواستاتیکی شاری از یون‌ها از بین یک روزنه یا شکاف خارج و شتابدار می‌شوند [۱]. یک چشمه‌ی یون از بخش‌های زیادی شامل منبع تغذیه، پمپ خلاء، وسایل خنک‌کننده، سیستم‌های حفاظت و کنترل و ابزار تشخیص شار تشکیل شده است که در تولید و استخراج باریکه مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۴ طبقه‌بندی چشمه‌های یونی

چشمه‌ها را می‌توان به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. یک روش طبقه‌بندی بر حسب روش‌های تولید یون (مکانیسم‌های تولید یون) است. طبق این روش چشمه‌ها به ۶ دسته تقسیم می‌شوند [۱].

- (۱) چشمه‌ی یونش سطحی^۱، که با روش یونش در سطح، یون تولید می‌کند.
- (۲) چشمه‌ی پاشنده^۲، که با روش پاشش، اتم‌ها را تبدیل به یون می‌کند.
- (۳) چشمه‌ی انتشار میدان قوی^۳، که با استفاده از یک میدان قوی اتم‌ها را یونیزه می‌کند.
- (۴) چشمه‌ی انتقال بار^۴، که با روش انتقال بار بین اتم‌ها و مولکول‌ها یون تولید می‌کند.
- (۵) چشمه‌ی بمباران الکترونی^۵، که بوسیله‌ی بمباران اتم‌ها و مولکول‌ها با الکترون، آن‌ها را یونیزه می‌کند.
- (۶) چشمه‌ی یونی پلاسما^۶، که با روش‌های مختلف پلاسما تولید می‌کند. در بیشتر چشمه‌های یون از این مکانیسم برای تولید یون استفاده می‌کنند. چشمه‌های یونی پلاسما مطابق با روش‌های ایجاد پلاسما به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

^۱ Surface ionization source

^۲ Sputter source

^۳ High field-emission source

^۴ Charge transfer source

^۵ Electron bombardment source

^۶ Plasma ion source

a. چشمه‌های یونی با کاتد گرم^۱، که خود به دسته‌های زیر تقسیم می‌شود.

i. چشمه‌ی یونی پنینگ یا چشمه‌ی یون تخلیه جرقه‌ای (Arc) با میدان الکتریکی و مغناطیسی موازی و شبه یکنواخت.

ii. چشمه‌ی یونی میکروویو^۲ با میدان مغناطیسی آینه‌ای.

iii. چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون^۳ با میدان مغناطیسی غیر یکنواخت.

iv. چشمه‌ی یونی فریمن^۴ با میدان مغناطیسی و الکتریکی عمود بر هم.

v. چشمه‌ی یونی بمباران الکترون^۵ یا bucket با میدان‌های مغناطیسی چند قطبی نوک‌تیز.

b. چشمه‌ی یونی با کاتد سرد^۶

c. چشمه‌ی یونی رادیو فرکانسی و میکروویو^۷

(۷) چشمه‌های یونی خاص؛ برای مثال: چشمه‌ی یون لیزر^۸، چشمه‌ی یونی یونش با

میدان^۹، چشمه‌ی یون تبخیر با میدان^{۱۰}.

روش دیگر طبقه‌بندی چشمه‌ها، طبقه‌بندی بر حسب نوع یون تولیدی است. طبق این طبقه‌بندی -چون تنها دو نوع یون از چشمه‌ها خارج می‌شود، چشمه‌ها به دو دسته‌ی چشمه‌ی یون مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. اما تقسیم‌بندی بهتر این است که چشمه‌هایی که یون‌های چندباری تولید می‌کنند و همین‌طور چشمه‌هایی که ساختار بزرگی نسبت به بقیه دارند را هم در دسته‌های جداگانه قرار دهیم. بنابراین چشمه‌ها را به چهار دسته‌ی چشمه‌های یون مثبت، چشمه‌های یون منفی، چشمه‌های یون چندباری و چشمه‌های بزرگ تقسیم کنیم، تقریباً تمام چشمه‌های موجود را

^۱ Hot-cathode ion sources

^۲ Microwave ion source

^۳ Douplasmatron ion source

^۴ Freeman ion source

^۵ Electron bombardment

^۶ Cold-cathode ion sources

^۷ Radio-frequency and microwave ion sources

^۸ Laser ion source

^۹ field ionization ion source

^{۱۰} field evaporation ion source

می‌توان در این تقسیم بندی جا داد. در پیوست الف این تقسیم بندی بیان شده است. در ادامه به برخی از مهمترین چشمه‌های یونی اشاره می‌شود [۱].

۱-۵ برخی از مهم‌ترین چشمه‌های یونی

چشمه‌های یونی بخش‌های لازم و ضروری شتابدهنده‌ها هستند، زیرا ذراتی را تولید می‌کنند که می‌توانند توسط دیگر اجرای شتابدهنده، تا انرژی‌های از چند کیلو الکترون ولت تا چند ترا الکترون ولت شتاب داده شوند. چشمه‌های یونی برای شتابدهنده‌ها با توجه به باریکه‌ی خروجی مورد نیاز، نوع یون، شدت و پراکندگی انرژی باریکه انتخاب می‌شوند. از مهمترین و رایج ترین چشمه های یونی که در شتابدهنده‌های آزمایشگاهی نیز مورد استفاده قرار می گیرند، می توان به موارد زیر اشاره کرد [۲].

- ✓ چشمه‌ی یونی PIG
- ✓ چشمه‌ی یونی ECR
- ✓ چشمه‌ی یونی Microwave
- ✓ چشمه‌ی یونی Douplasmatron
- ✓ چشمه‌ی یونی Multi-cusp

۱-۵-۱ چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG

با توجه به اینکه موضوع این پایان نامه شبیه‌سازی این چشمه است، در یک فصل جداگانه و به تفصیل به معرفی این چشمه می‌پردازیم.

۱-۵-۲ چشمه‌ی یونی تشدید سیکلوترونی الکترون

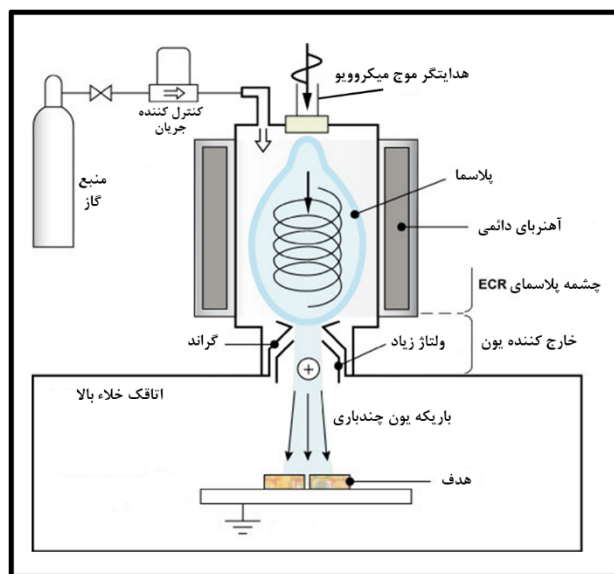
ریشه‌ی پیدایش چشمه‌ی یونی ECR به گداخت در پلاسما در سال ۱۹۶۹ برمی‌گردد که

استفاده از گرمای تشدید سیکلوترونی الکترون^۱ (ECRH) که برای گرم کردن پلاسما برای ایجاد همجوشی استفاده می‌شد و متعاقباً برای تولید یون‌های چند باری (چند بار مثبت یا چند بار منفی) در پلاسما پیشنهاد شد [۳].

نام این چشمه از روش تشکیل پلاسمای آن ناشی می‌شود، به عبارت دیگر این چشمه برای ایجاد پلاسما از امواج میکروویو و تشدید حرکت سیکلوترونی الکترون استفاده می‌کند به همین دلیل به آن چشمه‌ی تشدید سیکلوترونی الکترون یا به اختصار ECR می‌گویند. این چشمه برای غلبه به محدودیت‌های چشمه‌ی PIG مثل حالت بار کم، فرسایش شکاف‌ها و کاتد طراحی شد [۲].

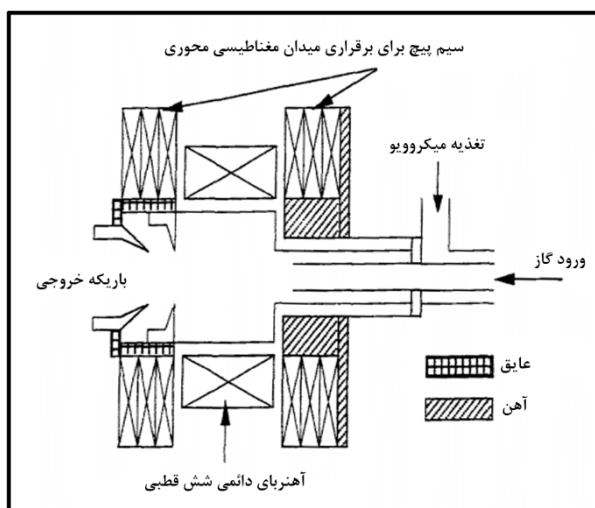
چشمه‌ی یونی ECR به طور گسترده برای تولید باریکه‌ی یون چند بار مثبت با کیفیت بالا برای شتاب دهنده‌ها، تحقیقات فیزیک اتمی و کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. سرمایه‌گذاری روی توسعه‌ی این چشمه‌ها برای دستیابی به باریکه‌ای از یون‌ها با حالت بار و شدت بیشتر و همین‌طور باریکه‌ای از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو و یا کمیاب، برای تحقیقات در فیزیک هسته‌ای با یون‌های سنگین اهمیت دارد [۳، ۴]. شکل ۱-۱-۱ چیدمان یک چشمه‌ی ECR که برای کاشت یون استفاده شده را نشان می‌دهد.

^۱ Electron Cyclotron Resonance Heating



شکل ۱-۱: چشمه یونی ECR برای کاربرد کاشت یون

از مشخصات این چشمه می‌توان به عمر طولانی، توانایی یونیزه کردن اکثر عناصر جدول تناوبی، تولید باریکه‌ی پیوسته از هر عنصر در شدت‌های مختلف، تولید جریان‌های زیاد از یون‌های چندباری اشاره کرد [۲، ۳]. شکل ۱-۲ مقطع دیگری از یک چشمه یونی ECR را نشان می‌دهد. این چشمه انواع مختلفی دارد که هر کدام برای کاربردی مناسب هستند [۴].



شکل ۱-۲: برش مقطعی از یک چشمه یونی ECR

۱-۵-۲ مکانیسم عملکرد

چشمه‌ی یونی ECR با استفاده از محصورسازی مغناطیسی و گرمای تشدید سیکلوترون الکترون، پلاسمای حاوی الکترون‌های پر انرژی و یون‌های سرد را تولید می‌کند [۳، ۵]. یونش تا حد زیادی بوسیله‌ی برخورد الکترون‌ها ایجاد می‌شود و درجه‌ی آن هم بستگی به چگالی الکترون‌های گرم و زمان محصورسازی یون دارد [۴].

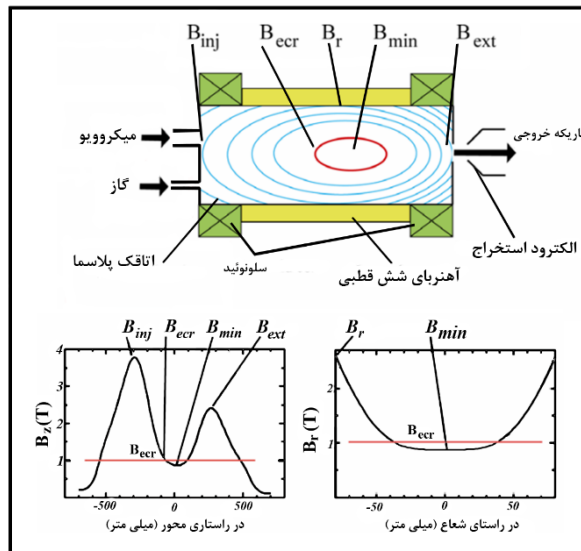
الکترون‌های پلاسما به دو دسته تقسیم می‌شوند: الکترون‌های سرد (با انرژی حدود 20 eV) و الکترون‌های گرم (با انرژی حدود 100 keV یا بیشتر)، این در حالی است که انرژی یون‌های نوعی چند الکترون ولت است. برخوردهای پی در پی الکترون‌ها با اتم‌ها و یون‌ها باعث یونش و در نتیجه تولید یون‌های اولیه با حالت بار زیاد می‌شود. برای اینکه با برخوردهای پی در پی الکترون‌ها یونش اتفاق بیفتد، باید یون‌ها و الکترون‌ها به اندازه‌ی کافی (زمان کافی) محصورسازی شوند، برای مثال در یک چشمه‌ی ECR نوعی برای تولید یون‌های با حالت بار زیاد باید زمان محصور سازی حدود 10^{-2} s باشد. تبادل بار با اتم‌های خنثی باید حداقل شود بنابراین فشار باید 10^{-6} torr یا کمتر باشد. برای اینکه یون‌ها بتوانند به سمت بیرون از پلاسما و در سیستم انتقال باریکه شتاب بگیرند اتاقک پلاسما در ولتاژ مثبت است. در حالی که اصول اساسی عملکرد چشمه‌ی یون ساده هستند، جزئیات مربوط به فیزیک پلاسما، فیزیک اتمی و گرمای سیکلوترونی الکترون از یک سو و فناوری‌های موردنیاز برای تولید میدان مغناطیسی قوی و تغذیه‌ی میکروویو فرکانس بالا از سوی دیگر، ساده نیستند [۳].

اصولاً در چشمه‌ی یونی ECR یونش بواسطه‌ی برخوردهای پی در پی الکترون‌های پر انرژی رخ می‌دهد، به همین دلیل سطح مقطع یونش در برخورد الکترون خیلی مهم است. یون‌های سنگین چندبار مثبت به دو شکل از دست می‌روند: تبادل بار با اتم‌های خنثی و اتلاف در محصورسازی پلاسما. سطح مقطع تبادل بار یون‌های باردار با خنثی‌ها به شدت بزرگ هستند، اما خوشبختانه نرخ برهم‌کنش‌ها با سرعت پرتابه متناسب است و اتم‌های خنثی خیلی آهسته‌تر از الکترون‌ها هستند. برای

برابر نگه داشتن نرخ تولید بواسطه‌ی برخورد الکترون با نرخ اتلاف بواسطه‌ی تبادل بار، برای یون‌های با حالت بار بزرگ، باید چگالی اتم‌های خنثی در پلاسما دو مرتبه کمتر از چگالی الکترون باشد [۳].

فرایندهای حاکم بر محصورسازی ذرات در یک چشمه‌ی یونی ECR پیچیده هستند. دمای الکترون‌ها و یون‌ها متفاوت هستند و زمان محصورسازی آنها خیلی مهم است، به علاوه الکترون‌ها هم دماهای مختلفی دارند و زمان محصورسازی با دمای الکترون متناسب است. طبیعتاً زمان محصورسازی در این چشمه یک پارامتر تعیین کننده است. در چشمه‌ی یونی ECR برخلاف دیگر چشمه‌ها، مانند EBIS، نمی‌توانیم برای استخراج یون‌های محصور، محصورسازی را در هر زمان دلخواهی قطع کنیم؛ به نحویکه اگر زمان محصورسازی خیلی کوتاه باشد یون‌ها زمان کافی برای رسیدن به حالت بار زیاد را ندارند و اگر زمان محصورسازی خیلی طولانی باشد یون‌ها به جای اینکه به شکل یک باریکه‌ی پایدار خارج بشوند، با حالت بار بیش از حد موجب بی‌نظمی در پلاسما می‌شوند، این در حالی است که بیشتر مدل‌های محصورسازی با فرض پلاسمای ساکن است. نتیجه اینکه برای بهتر کردن محصورسازی پلاسمای ECR باید منظم عمل کرد [۳].

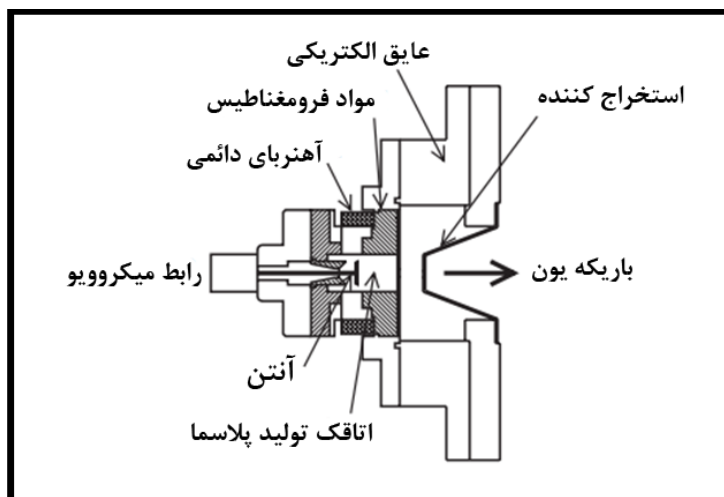
محصورسازی به کمک میدان مغناطیسی حاصل از سلونوئید و شش قطبی مغناطیسی حاصل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده سلونوئیدهایی که در دو طرف چشمه قرار دارند، یک آینه‌ی مغناطیسی را ایجاد می‌کنند. میدان مغناطیسی سلونوئیدی که در سمت استخراج اتافک پلاسما قرار دارد از سلونوئیدی که ابتدای اتافک قرار گرفته ضعیف‌تر است، نمودار توزیع میدان مغناطیسی در راستای محوری گویای این مطلب است.



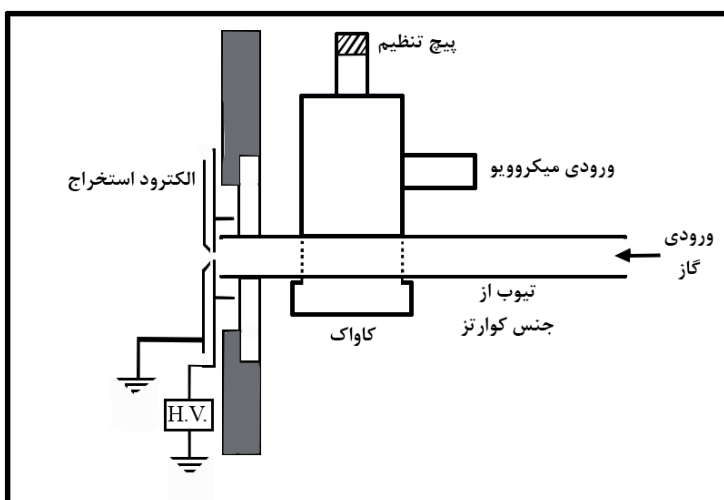
شکل ۳-۱: توزیع میدان مغناطیسی در راستای شعاع و محور در اتاقلک یونش چشمه‌ی یونی ECR

۳-۵-۱ چشمه‌ی یونی میکروویو

چشمه‌ی یونی میکروویو برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ مطرح شد، نام این چشمه از روش تولید پلاسمای آن می‌آید، در این چشمه بوسیله‌ی اعمال امواج میکروویو به گاز در حضور میدان مغناطیسی، پلازما تولید می‌شود. این چشمه‌ها بر اساس کاربردهایشان به چند دسته تقسیم بندی می‌شوند اما با توجه به ساختار به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند، دسته‌ی اول از کاواک و دسته‌ی دوم از آنتن برای اعمال امواج میکروویو استفاده می‌کنند [۶]. شکل ۴-۱ مقطعی از نوع آنتنی و شکل ۵-۱ نوع کاواکی این چشمه را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱: چشمه یونی میکروویو فشرده از نوع آنتنی [۷]



شکل ۵-۱: چشمه یونی میکروویو از نوع کاواک [۸]

از ویژگی‌های این چشمه می‌توان به تولید پلاسمای پایدار، عملکرد یکنواخت، درجه یونش و بازده گاز بالا، واگرایی انرژی کم (حدود 5 eV)، مصرف کم گاز و طول عمر بالای آن اشاره کرد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که این چشمه راحت‌تر از دیگر چشمه‌ها به صورت خودکار کنترل شود. چون در این چشمه از الکتروستات برای تولید پلاسما استفاده نمی‌شود، این باعث افزایش عمر چشمه می‌شود و می‌توان در آن از مواد شیمیایی فعال استفاده کرد، این چشمه حتی با مواد رادیواکتیو هم کار می‌کند و می‌تواند باریکه‌ای پایدار از یون‌های مختلف را برای زمان طولانی فراهم کند. می‌توان گفت که این چشمه در سخت‌ترین شرایط هم کار می‌کند [۱، ۹، ۱۰]. نسل پیشرفته‌تر این چشمه بواسطه وجود

آهنربای دائمی، پلاسمای با چگالی زیاد تولید می کند و به همین دلیل می تواند جریانی از باریکه‌ی یونی از مرتبه mA ایجاد کند [۷].

با توجه به این ویژگی‌ها، این چشمه در پردازش مواد، شتابدهنده‌ها، کاشت یون، رسوب باریکه‌ی یونی برای شکل‌گیری روکش فلزی با خلوص بالا استفاده می‌شود. از این چشمه در بیشتر موارد برای تولید یون‌های مثبت استفاده می‌شود [۷، ۱۱]. این چشمه با توجه به طول عمر بالا و چگالی بیشتر پلاسمای تولیدی و باریکه‌ی تمیزتری که تولید می‌کند یکی از قسمت‌های مهم فرآیند کاشت یون است [۱۲، ۱۳].

چشمه‌ی یونی میکروویو با آهنربای دائمی برای تولید شار زیادی از نوترون استفاده شده است. در گذشته برای تولید نوترون از چشمه‌ی یونی پنینگ استفاده کرده‌اند، اما این چشمه برای چگالی جریان باریکه‌ی خروجی محدودیت ایجاد کرده و تنها قادر به تولید برخی یون‌ها است که این ویژگی منجر به بازده کم تولید نوترون می‌شود. از چشمه‌های RF و دوپلاسماترون نیز برای تولید شار نوترون استفاده می‌شود؛ اما استفاده از چشمه‌ی یونی میکروویو در مقایسه با چشمه‌های دیگر مزایای عمده‌ای از جمله: محدوده‌ی وسیع فشار کار درون اتاقک تخلیه (در مقایسه با چشمه‌ی RF و دوپلاسماترون که در فشار کمتر عمل می‌کنند)، امکان کار پیوسته برای مدت زیاد، جریان یونی بالا و واگرایی کم باریکه دارد [۱، ۱۴، ۱۵].

اساس کار چشمه‌های یونی میکروویو بر تشدید امواج میکروویوی است که از درون یک کاواک با فرکانس 2.45 GHz بدست می‌آید [۶] و با اثر بر الکترون‌های آزاد موجود در گاز آن‌ها را به حرکت و برخورد با اتم‌ها وادار می‌کند. در این چشمه یونش بدون تشدید در میدان مغناطیسی رخ داده و بیشتر برای ایجاد جریان‌های بالا از یون‌های تک‌باری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این چشمه چگالی پلاسما زیاد، میدان مغناطیسی قوی و فشار گاز نسبتاً بالا است، که این شرط برای ایجاد جریان زیاد از یون‌های یک بار مثبت لازم است [۱، ۱۶]. به علت عدم وجود اثرات تشدید در این چشمه، می‌توانیم

چگالی ذرات خنثی را زیاد و باریکه‌های با شدت بیشتر بدست بیاوریم. افزایش چگالی پلاسما، اثرات غیرخطی را بیشتر می‌کند [۱۷].

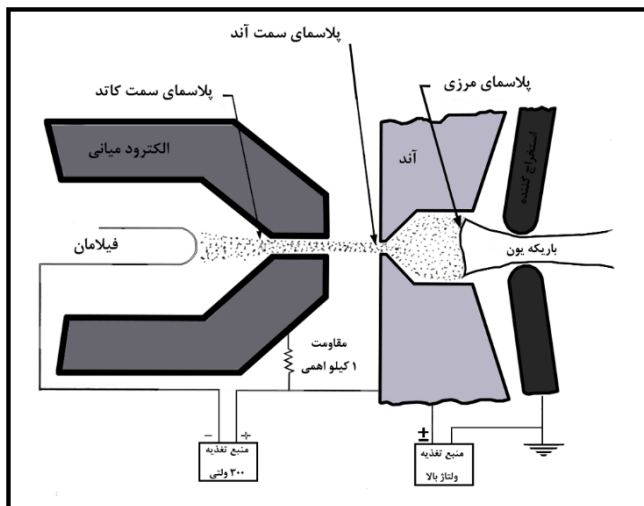
۱-۵-۴ چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون

چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون یکی از مهمترین و قدرتمندترین چشمه‌های یونی است. مطالعه و تحقیق روی این چشمه از سال ۱۹۶۰ شروع شد و رفته رفته استفاده از این چشمه بیشتر شد. ساختار چشمه به نحوی است که در آن دو مرتبه پلاسما تشکیل شده و سپس یون‌ها از آن خارج می‌شوند، برتری‌های این چشمه نسبت به دیگر چشمه‌ها و همین‌طور نام‌گذاری آن از این مسئله نشئت می‌گیرند [۱].

از مزیت‌های این چشمه می‌توان بازده بالا (بین ۵۰ تا ۹۰ درصد)، محدوده‌ی وسیع شدت جریان‌های تولیدی (میلی آمپر تا آمپر)، درخشندگی بالا و توانایی تولید یون‌های منفی و همین‌طور یون‌های چندبار مثبت را نام برد. این چشمه می‌تواند جریان‌های زیاد از عناصر گازی تولید کند ولی برای تولید یون از جامدات مطالعه نشده است. یون‌های چندباری می‌تواند در چشمه‌ی دوپلاسماترون بوسیله‌ی تنظیم مناسب میدان مغناطیسی و هندسه‌ی الکتروود میانی تولید شوند. این چشمه می‌تواند در شتابدهنده ذرات، کاشت یون، تحلیل باریکه‌ی یونی، جرم سنجی برای تمام عناصر و اصلاح مواد بوسیله‌ی باریکه‌ی یونی مورد استفاده قرار گیرد [۱، ۱۸].

این چشمه در فشار 10^{-6} تا 10^{-3} میلی بار کار می‌کند و از معایب این چشمه می‌توان پیچیده بودن ساختار و نیاز به خنک‌سازی اشاره کرد [۱]. قسمت‌های اصلی یک چشمه‌ی دوپلاسماترون شامل فیلامان، الکتروود میانه، آند، آهنربای دائمی و فنجان توسعه^۱ می‌باشد (شکل ۱-۶).

^۱ Expansion Cup



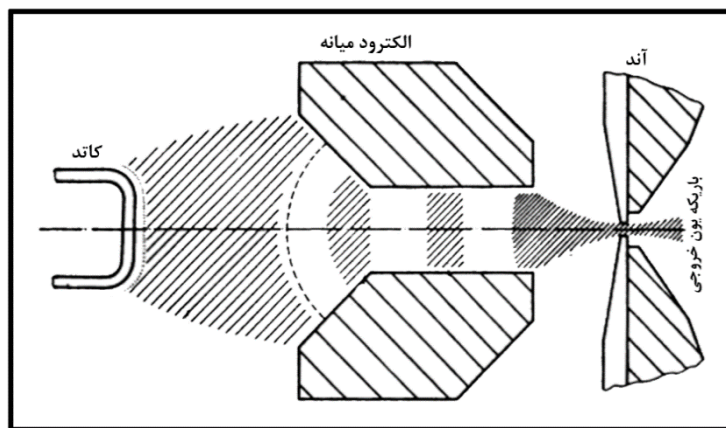
شکل ۱-۶: نمایی از یک چشمه یونی دوپلاسماترون [۱۹]

برای ایجاد پلازما در این چشمه فیلامان به صورت سرد یا گرم الکترون تولید می کند. آند و الکتروود میانه که از مواد فرومغناطیس ساخته شده اند قطب های مغناطیسی را تشکیل می دهند [۱، ۲].

آهنرباهای سلنوئیدی اطراف اتاقک پلازما، میدان مغناطیسی لازم برای محصورسازی پلازما را فراهم می کنند. جریان خروجی از چشمه به چگالی پلازما در ناحیه ی استخراج بستگی دارد. یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت قوی بین محدوده ی الکتروود میانی و آند شکل گرفته است، به طوری که بیشترین میدان مغناطیسی نزدیک روزنه ی آند است، به همین دلیل چگالی پلازما در این چشمه یکنواخت نبوده و بیشترین چگالی در نزدیکی آند قرار دارد. در واقع چگالی کمتر پلازما بین فیلامان و الکتروود میانی و چگالی بیشتر پلازما بین الکتروود میانی و آند قرار دارد [۱، ۲، ۱۸، ۲۰].

زمانی که الکترون ها از الکتروود میانی به سمت آند حرکت می کنند، به خاطر افزایش تدریجی میدان مغناطیسی، مولفه ی عمودی سرعت الکترون ها افزایش و مولفه ی موازی آن کاهش می یابد. جریان خروجی باعث کاهش مولفه ی عمودی سرعت و در نتیجه افزایش چگالی الکترون ها در آن ناحیه می شود. در واقع پلازما بوسیله ی میدان مغناطیسی جلوی سیستم استخراج فشرده می شود (شکل ۱-۷)، به همین دلیل چگالی پلازما در این ناحیه بسیار زیاد می شود به طوری که برای

استخراج یون‌ها به یک فنجان توسعه نیاز است تا چگالی جریان را قدری کاهش دهد، در صورت عدم استفاده از این فنجان، باریکه‌ی خروجی به شدت واگرا خواهد شد. طراحی فنجان توسعه مطابق با سرعت شعاعی یون‌ها و شدت میدان انجام می‌شود [۱، ۳]. فنجان توسعه سریع وسیع می‌شود و یک سلونوئید کوچک اضافی هم برای تمیز کردن باریکه در فنجان قرار دارد. همچنین یک الکتروود که در بایاس منفی درون فنجان توسعه قرار دارد که الکترون‌های برگشتی را در درون پلاسما دفع کرده و باعث یونش ثانویه نزدیک آند می‌شود [۲۰]. در نهایت با تنظیم آهنربا و کنترل تراکم پلاسما میزان یون خروجی خواسته‌شده بدست می‌آید [۱].



شکل ۱-۷: تراکم پلاسما در چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون [۲۱]

۵-۵-۱ چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ

چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ معرفی شد و استفاده از آن به سرعت رشد کرد. از انواع مختلف این چشمه می‌توان چشمه‌های مولتی کاسپ با آنتن RF داخلی، مولتی کاسپ با آنتن RF خارجی و مولتی کاسپ پاشنده را نام برد [۲، ۲۲].

چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ توانایی تولید باریکه با چگالی جریان‌های زیاد و ذرات پرانرژی را داشته و به همین دلیل برای تحقیقات در زمینه‌ی شکافت و کاشت یون استفاده می‌شود. این چشمه می‌تواند باریکه‌هایی از یون‌های مثبت و منفی برای شتاب‌دهنده‌ها را تولید کند. این چشمه برای

استفاده در فعالیتهای گداخت و نوع پاشندهی آن جهت تولید انواع یونهای مثبت و منفی برای پردازش مواد و رسوبگیری فیلمهای نازک بوسیلهی پاشش توسعه داده شده است [۲, ۲۲, ۲۳].

ساختار این چشمهها را می توان به چند بخش تقسیم کرد، این بخشها که در شکلگیری پلاسما نقش مهمی را ایفا می کنند در زیر آمده است :

❖ فیلامان به عنوان کاتد عمل می کند

❖ اتاقک پلاسما که نقش آند را بازی می کند

❖ آهنربای دائمی که عمل محصورسازی را انجام می دهد

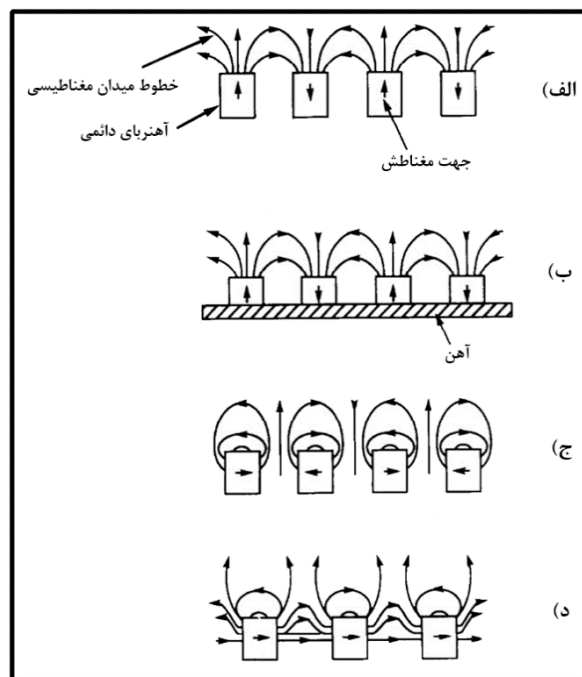
❖ الکتروود استخراج یا الکتروود پلاسما

چشمههای یونی مولتی کاسپ عملکرد ساده و آسانی دارند. الکترونهای موردنیاز برای فرایندهای یونش و شکلگیری پلاسما توسط فیلامانی از جنس تنگستن که نسبت به آند در بایاس منفی قرار دارد، تولید می شود. فیلامان در ناحیهی خالی از میدان مغناطیسی قرار گرفته و الکترونهای تولید شده در راستای خطوط میدان مغناطیسی به سمت آند حرکت می کنند [۲, ۳].

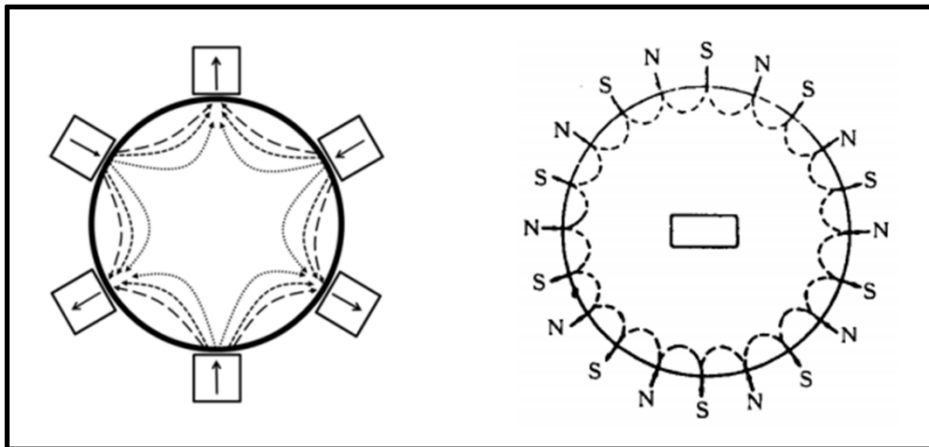
ناحیهی اتلاف الکترون در این چشمه کوچک است. این ناحیه که بوسیلهی متوسط طول قطبها و ضخامت روزنههای مغناطیسی تعیین می شود، حدود دو برابر شعاع چرخش الکترونهای اولیه است [۲, ۳, ۲۲]. الکترونهای کم انرژی و یونها در پلاسما بوسیلهی ترکیبی از میدان مغناطیسی (که توسط آهنرباهای دائمی در ساختار مولتی کاسپ ایجاد می شود) و میدان الکتریکی (که بواسطهی اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند شکل می گیرد) محصور می شوند. برای افزایش بازده یونش، ناحیهی اتلاف الکترون بوسیلهی میدان مغناطیسی هلالی کمینه می شود و به این شکل یک محصورسازی عالی برای ایجاد پلاسمای سرد و همگن جلوی شکاف استخراج (که در مقایسه با آند، قطر کوچکی دارد) فراهم می شود [۲, ۳, ۲۲].

شکل ۱-۸ انواع چیدمان آهنرباهای دائمی در چشمههای مولتی کاسپ را نشان می دهد، این

چیدمان‌ها برای محصورسازی پلاسما در چشمه‌های یون مثبت و منفی استفاده می‌شوند. شکل ۹-۱ نیز مشهورترین چیدمان چندقطبی اطراف حجم پلاسما که همان تناوبی می‌باشد، را نشان می‌دهد. خطوط هلالی (کاسپ)، خطوط شار مغناطیسی تولید شده بوسیله‌ی آهنربای دائمی را نشان می‌دهد. شدت میدان مغناطیسی (B) نزدیک آهنربا بیشینه و با فاصله گرفتن از دیواره‌ی اتاقک پلاسما کاهش پیدا می‌کند. اتاقک چشمه‌ی یونی بوسیله‌ی آهنرباهای دائمی در پیکره بندی مولتی کاسپ (قطب شمال و جنوب تناوبی) محاصره شده است [۲۴]. بدیهی است که میدان مغناطیسی تقارن محوری دارد [۲۲].



شکل ۹-۱: انواع چیدمان آهنربا در چشمه‌های مولتی کاسپ برای محصورسازی پلاسما [۲۵]



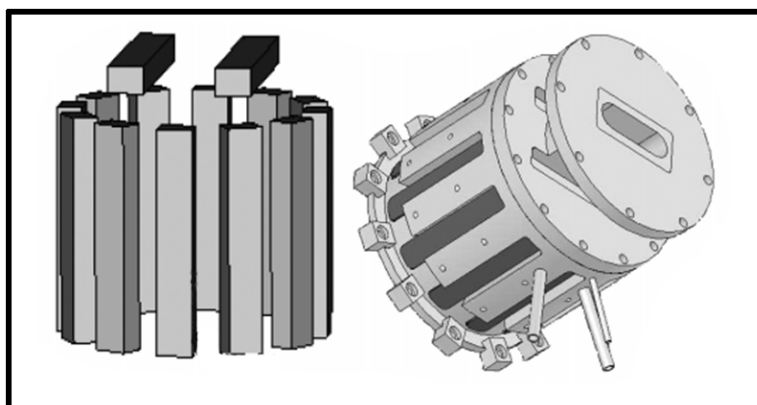
شکل ۹-۱: چیدمان قطب‌ها به صورت تناوبی در چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ [۲۴]

تغییر میدان مغناطیسی درون اتاقک تابع تعداد قطب‌های آهنربا است. افزایش تعداد آهنرباها، شدت میدان مغناطیسی (B) را در دیواره‌ی اتاقک و همچنین وسعت ناحیه‌ی بدون میدان مرکزی را افزایش می‌دهد. ناحیه‌ی بدون میدان مرکزی همان جایی است که یون‌ها در تله می‌افتند. مقدار میدان مغناطیسی از دیواره‌ی اتاقک (بیشترین مقدار) به سمت مرکز به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند [۲۴]. چگالی پلاسما به طول اتاقک پلاسما، هندسه آهنربا، ولتاژ و جریان تخلیه الکتریکی بستگی دارد [۲].

ممکن است فاکتور هندسه به فاصله‌ی بین آهنرباها بستگی داشته باشد. افزایش فاصله بین آهنرباها باعث وسیع‌تر شدن ناحیه‌ی بدون میدان مرکزی و افزایش اثر آینه‌ای نزدیک دیواره‌ها می‌شود. ناحیه‌ی بدون میدان مرکزی تابع فاصله‌ی بین قطب‌های مغناطیسی است. معمولاً هدف از بهینه‌سازی محصورسازی پلاسما در این چشمه، تغییر هندسه‌ی محصورسازی و افزایش ناحیه‌ی مرکزی و بالطبع افزایش حجم پلاسما است که باعث افزایش تعداد الکترون‌ها و یون‌ها در ناحیه‌ی مرکزی (ناحیه‌ی محصورسازی پلاسما) می‌شود [۲۴].

شکل ۱۰-۱ ساختار یک چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ را نشان می‌دهد، تعداد ۱۴ آهنربای دائمی از جنس ساماروم کبالت (۱۲ تا اطراف اتاقک و ۲ تا بالای اتاقک) و یک اتاقک تخلیه از جنس

استیل ضدزنگ با شعاع داخلی ۵۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد [۲۲].



شکل ۱-۱۰: چیدمان آهنرباها و ساختار اتاقک تخلیه‌ی چشمه‌ی یونی مولتی کاسپ [۲۶]

در این فصل ساختار چشمه یونی معرفی، تاریخچه و مهمترین کاربردهای انواع مختلف چشمه‌ها به طور اجمالی بیان گردید. در ادامه مهمترین چشمه های یونی تشریح شد. با توجه به کارهای انجام شده پیرامون چشمه‌های یونی و ویژگی‌های چشمه‌ی یونی پنینگ (PIG)، در این پایان نامه قصد بر این است که تاثیر عوامل مختلف بر روی باریکه‌ی خروجی این چشمه‌ی یونی با شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد. در فصل دوم چشمه‌ی پنینگ و عوامل موثر بر کارایی آن به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲ فصل دوم: چشمه‌ی یونی پنینگ

۲-۱ مقدمه

چشمه‌ی یونی PIG یا سنجه‌ی یونی پنینگ^۱ یکی از چشمه‌های یونی پلاسما است، که اختراع آن در اصل مدیون کشف روش تخلیه‌ی گاز بوسیله‌ی فیلپس^۲ است. این چشمه که طراحی ساده‌ای دارد و به آسانی عمل می‌کند، بعد از اولین تخلیه‌ی آزمایشی در سال ۱۹۳۶ توسط پنینگ^۳، توسعه داده شد. علت نام گذاری این چشمه به چشمه‌ی پنینگ هم به همین مطلب برمی‌گردد. این چشمه توسط پنینگ برای فشارسنجی در فشار پایین پیشنهاد شد و بعداً برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت [۲۷-۲۹].

چشمه‌ی یونی پنینگ از تخلیه DC برای تولید یون استفاده می‌کند، بنابراین طراحی چشمه خیلی ساده‌تر از چشمه‌هایی است که در آن‌ها تخلیه بوسیله‌ی امواج میکروویو و رادیوفرکانس انجام می‌شود. در کارکرد عادی باریکه‌ی یون خروجی از این چشمه ممکن است مرتبه‌ی یونش بین ۱ تا ۱۰ داشته باشد. چشمه‌هایی مثل ECR و EBIS هم حالت بار زیاد تولید می‌کنند اما جریان باریکه‌های یونی در این چشمه‌ها از لحاظ بزرگی کمتر از چشمه‌ی یونی PIG است [۲۷، ۳۰].

از آنجایی که این چشمه بدون فیلمان کار می‌کند، عمر زیادی داشته و به نگهداری ناچیزی نیاز دارد. به همین دلیل چشمه‌ی یونی پنینگ به طور گسترده در تحقیقات و کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود و یک چشمه‌ی مناسب برای کار تحت میدان مغناطیسی زیاد است [۳۱، ۳۲].

۲-۲ سیر تکامل چشمه یونی PIG

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این چشمه و مخصوصاً سادگی طراحی و ساخت آن،

^۱ Penning ion gauge

^۲ C.E.S. Phillips

^۳ F.M. Penning

بیشتر تیم‌های تحقیقاتی از بین چشمه‌های یونی مختلف، این چشمه را برای کار انتخاب کردند. اغلب چشمه‌ها قبل از اینکه ساخته بشوند، با یک نرم افزار شبیه‌سازی می‌شوند. در این شبیه‌سازی‌ها بیشتر تمرکز روی طراحی کاتدها و سیستم استخراج است. در ادامه به برخی از مهمترین آن‌ها اشاره می‌کنیم.

در سال ۲۰۰۴ آقای یو^۱ و همکارانش در دانشگاه پکن، چشمه‌ی یونی پنینگ از نوع کاتد سرد برای تولید باریکه‌ی یون‌های اکسیژن منفی و در نهایت استفاده در یک شتابدهنده‌ی RFQ^۲ را توسعه دادند. این تیم در ساخت چشمه از آهنربای دائمی استفاده کردند. یون‌های اکسیژن منفی با شدت 1.5 mA تولید و تاثیرات میدان مغناطیسی، جنس کاتد و شکاف استخراج بر آن بررسی شد [۳۳].

در سال ۲۰۰۶ آقای هی^۳ و همکارانش در آزمایشگاه فیزیک جدید آکادمی علوم چین، پشت چشمه‌ی یونی PIG یک تفنگ الکترونی برای تولید الکترون قرار دادند و اثر تزریق الکترون در پلاسمای چشمه را در افزایش باریکه‌ی خروجی بررسی کردند. این تیم چشمه‌ی جدیدشان را E-PIG نام گذاری کردند [۳۰].

در سال ۲۰۰۷ آقای رُوی^۴ و همکارانش در ایالات متحده بر روی چشمه‌ی پنینگی کار کردند که جریان ۱ میلی آمپری از یون هیدروژن مثبت تولید می‌کند. این افراد اعلام کردند که کارایی این چشمه با گاز هلیوم شبیه هیدروژن است [۳۴].

در سال ۲۰۰۸ آقای کومارداس^۵ با همکارش آقای شیام^۶ در مرکز تحقیقات اتمی بهابها^۷ در

^۱ Jinxiang Yu

^۲ Radio Ferequency Quadrupole

^۳ W. He

^۴ Joshua L. Rovey

^۵ Basanta Kumar Das

^۶ Anurag Shyam

^۷ Bhabha Atomic Research Center

هند، یون‌های دوتریوم را از یک چشمه‌ی پنینگ خارج کردند. این دو نفر با بررسی جنس الکتروود و زاویه‌ی الکتروود استخراج بر روی سیستم استخراج این چشمه تمرکز کردند و اعلام کردند که عامل مهم در استخراج یون از این چشمه، هندسه‌ی الکتروود استخراج است. آنها با بررسی زاویه‌ی الکتروود نیز اعلام کردند: همگرایی یون‌های خروجی از چشمه بستگی به زاویه‌ی الکتروود استخراج دارد و هر چه زاویه بزرگتر باشد، همگرایی بیشتری داریم [۳۵].

در سال ۲۰۱۰ آقای نورای^۱ و همکارانش در دانشکده فیزیک دانشگاه اونتاریوی غربی^۲ مدلی از چشمه‌ی یونی پنینگ فرانکفورت^۳ را توسعه دادند. ویژگی خاص این چشمه مد جدید تخلیه‌ی آن بود که در فشار زیاد و ولتاژ کم و جریان بالا عمل می‌کرد. واگرایی انرژی باریکه‌ی خروجی از این چشمه بسیار کم و در حدود ۳ الکترون ولت است. یون‌های خروجی از این چشمه نسبت به مدل‌های قبلی چشمه‌ی فرانکفورت بار بیشتری داشت (دو برابر). این تیم جزئیات عملکرد این چشمه را به دقت بررسی کردند و نشان دادند که با تنظیم دقیق میدان مغناطیسی و فشار گاز، کارایی چشمه بهینه می‌شود. این تیم از روش لیزر – فلوروسنس^۴ در آنالیز انرژی باریکه‌ی خروجی استفاده کرده است، این روش در بررسی باریکه‌ی شتابدهنده‌ها کاربرد وسیعی دارد [۲۸].

در سال ۲۰۱۱ آقای داس^۵ و همکارانش در هند، پارامترهای تخلیه و جریان خروجی چشمه‌ی پنینگ را برای گازهای مختلف مثل دوتریوم، هلیوم، نیتروژن، اکسیژن و آرگون محاسبه کردند [۳۱]. در همین سال آقای نوری^۶ و همکارانش در دانشگاه شهید باهنر کرمان، جهت بررسی شکست الکتریکی در چشمه‌های پنینگ، مدلی از این چشمه را در آزمایشگاه این دانشگاه توسعه دادند و به

^۱ Nouri

^۲ University of Western Ontario

^۳ Frankfurt Penning Ion Source

^۴ Laser-Fluorescence

^۵ B. K. Das

^۶ H. Noori

رابطه‌ای در خصوص ولتاژ شکست نیز رسیدند [۳۶].

در سال ۲۰۱۲ آقای وانگ^۱ و همکارانش در انجمن فیزیک سیالات چین تغییری در این چشمه ایجاد کردند و آن استفاده از عایق الکتریکی در ابزار اندازه‌گیری باریکه است. مسیر باریکه‌ی یون هیدروژن منفی شبیه سازی و اثر شار گاز و شدت میدان مغناطیسی، جریان تخلیه و ولتاژ استخراج بر روی باریکه بررسی شده است [۳۷].

در سال ۲۰۱۳ آقای یئون^۲ در کره بر روی کاربرد این چشمه در شتابدهنده کار کرد و سعی کرد تا حجم چشمه را کاهش دهد. این چشمه را که یون‌های هیدروژن منفی برای شتابدهنده تولید می‌کند، با نرم افزار CST شبیه‌سازی و مسیر حرکت الکترون‌ها را بررسی و نتایج آزمایشگاهی ارائه کرد. همین‌طور آقای لونگ^۳ و همکارانش در آکادمی فیزیک مهندسی چین یک چشمه‌ی یونی پنینگ برای یک سیکلوترون طراحی کردند [۳۲، ۳۸].

در سال ۲۰۱۴ خانم فتحی^۴ و همکارانشان در دانشگاه شهید بهشتی تهران چیدمان‌های مختلف آهنرباهای دائمی برای ایجاد میدان مغناطیسی محوری در چشمه پنینگ را بررسی و با توجه به پارامتر محصورسازی ذرات در این چشمه بهترین چیدمان را مشخص کردند. این تیم در همین سال موفق به ساخت یک چشمه‌ی یونی پنینگ برای استفاده در یک شتابدهنده‌ی الکترواستاتیکی شدند [۳۹].

در سال ۲۰۱۶ آقای ذاکر حسینی^۵ از دانشگاه امیرکبیر با همکاری آقای چای^۶ از کره جنوبی، مطالعاتی را بروی چشمه‌ی یونی PIG دانشگاه امیرکبیر انجام دادند. با استفاده از نرم افزار CST این

^۱ T. Wang

^۲ Y.H. Yeon

^۳ J.Long

^۴ A. Fathi

^۵ F. Zakerhosseini

^۶ J. Chai

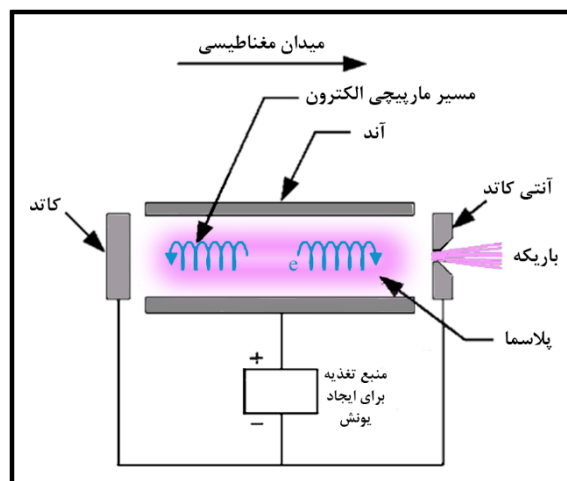
چشمه را شبیه سازی و با استفاده از نرم افزار ANSYS توزیع دمای بخش های مختلف چشمه را محاسبه کردند. در ادامه اثرات گرمای تخلیه الکتریکی بر روی تغییر شکل کاتد را مورد بررسی قرار دادند [۴۰].

۳-۲ کاربردهای چشمه یونی PIG

این چشمه به علت ساختار ساده، حجم فشرده و طول عمر کافی به طور گسترده در رشته های مختلف تحقیقاتی مثل تولید نوترون، تحقیقات مواد و حکاکی روی سطح استفاده می شود، همین طور یک گزینه مناسب برای تولید جریان های زیاد یا باریکه های یونی پیوسته برای تحقیقات بنیادی و عملی بشمار می رود. این چشمه برای کاربردهای مختلفی مثل کند و پاش، تبخیر از سطح و جداسازی ایزوتوپی الکترومغناطیسی و کاربردهای هم جوشی (گداخت) هم مورد استفاده است [۲۷-۳۲، ۳۴، ۳۵، ۳۸].

۴-۲ ساختار و مکانیسم عملکرد چشمه یونی PIG

در ساده ترین شکل یک چشمه ی پنینگ از یک چیدمان خطی تشکیل شده است. دو کاتد صفحه ای که بوسیله ی یک آند که معمولاً استوانه ای توخالی است، از هم جدا شده اند و همگی درون یک میدان مغناطیسی محوری قرار گرفته اند. همان طور که در شکل ۱-۲ مشاهده می کنید چشمه از لحاظ هندسی تقارن استوانه ای دارد. زمانی که پنینگ به عنوان یک چشمه ی یونی با استخراج محوری استفاده می شود، روزنه ای برای استخراج یون بر روی یکی از کاتدها (آنتی کاتد یا الکتروود پلاسما) ایجاد می شود [۲۷، ۲۸، ۳۰، ۳۵، ۳۸].



شکل ۱-۲: نمایی از چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG

این چشمه برای تولید الکترون‌ها در اتاقک تخلیه و در نهایت شکل‌گیری پلازما، از یک کاتد استفاده می‌کند که می‌تواند سرد یا گرم باشد. در ناحیه‌ی پلازما یونش ناشی از تابش الکترون‌ها ایجاد می‌شود. الکترون از یک کاتد تابش شده و درون آند استوانه‌ای شتاب گرفته و از کاتد دیگر (آنتی کاتد) منعکس می‌شود. مسیر الکترون بواسطه‌ی حضور میدان مغناطیسی مارپیچی است. الکترون‌ها به دلیل انعکاس متوالی از کاتدها حول محور و در مرکز آند به دام می‌افتند. میدان مغناطیسی محوری الکترون‌ها را محصور می‌کند و از اینکه آن‌ها به صورت شعاعی به سمت آند حرکت کنند جلوگیری می‌کند. در نتیجه الکترون‌های اولیه مسیر بیشتری طی کرده و احتمال اینکه در ستون پلازما با گازهای زمینه و یون‌ها برخورد کنند، افزایش پیدا می‌کند [۲، ۳۰، ۳۵].

همین طور که الکترون‌ها دائماً بین کاتد و آنتی کاتد حرکت می‌کنند بواسطه‌ی برخورد با مولکول‌ها و اتم‌های گاز، یونش ایجاد می‌شود. پس فرایند یونش در این چشمه یک فرآیند مرحله به مرحله است. یون‌ها به طور غیر مستقیم از طریق یک شکاف در آنتی کاتد یا آند خارج می‌شوند [۲، ۳۰].

ولتاژ بالای DC بین آند و کاتد اعمال می‌شود، ولتاژ اعمالی از مرتبه ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ ولت است. چیدمان متقارن الکترودها با افزایش مسیر حرکت الکترون‌های یونیزه کننده در این ناحیه، بازده یونش

را افزایش می‌دهد. طول مسیر حرکت الکترون‌های یونیزه کننده با اضافه کردن میدان مغناطیسی در طول محور اتاقک تخلیه بیشتر می‌شود. در طول میدان مغناطیسی جهت مسیر الکترون‌های یونیزه کننده یک چرخش پیرامون خطوط میدان مغناطیسی با فرکانس w_{ce} و شعاع r_{ec} پیدا می‌کند، که در آن m_e : جرم الکترون، B : بزرگی میدان مغناطیسی، $v_{\perp}$: مولفه‌ی عمودی سرعت در میدان مغناطیسی محوری می‌باشد.

$$w_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (1-2)$$

$$r_{ec} = \frac{m_e v_{\perp}}{eB} \quad (2-2)$$

فرکانس اغلب به فرکانس سیکلوترونی الکترون نیز مشهور است؛ شعاع چرخش نیز به عنوان شعاع لارمور^۱ نامیده می‌شود. معادله‌های مشابهی هم برای اجزای یونیزه شده در تخلیه برقرار است که فقط به جای بار و جرم الکترون، به ترتیب بار و جرم اجزای یونیزه را قرار می‌دهیم. برای الکترون‌ها در چشمه یونی پنینگ، مقادیر نوعی فرکانس و شعاع چرخش به ترتیب 7.03×10^9 rad/s و 2.4 mm براساس یک میدان مغناطیسی محوری با قدرت 400 G و بیشینه‌ی انرژی عرضی الکترون 800 eV می‌باشد. میدان مغناطیسی محوری برای الکترون‌های یونیزه کننده، محصورسازی ایجاد می‌کند و عموماً شعاع چرخش الکترون‌ها کوچکتر از ابعاد اتاقک یونش است. افزایش مسیر حرکت الکترون‌های یونیزه کننده از طریق چیدمان متقارن الکترودها و محصورسازی مغناطیسی محوری باعث می‌شود که یونش در فشار گاز کمتری ایجاد شود [۲۷]. برای اینکه یون‌ها به مقدار بار دلخواه برسند باید از نظر زمانی به اندازه‌ی کافی در پلاسما نگهداری شوند. این مطلب به محصورسازی یون‌ها در ناحیه‌ی یونش مربوط است [۳۰، ۳۸].

^۱Larmor radius

الکترون‌های آزاد بوسیله‌ی اعمال میدانی الکتریکی شتاب‌دار شده و با ذرات خنثی برخورد می‌کنند. اگر الکترون‌ها انرژی کافی داشته باشند، برخوردها می‌توانند یک یا چند الکترون را از ذرات خنثی جدا کنند، که نتیجه‌اش ایجاد یون و الکترون‌های ثانویه است. الکترون‌های اولیه در هر برخورد انرژی از دست می‌دهند و تا زمانی که انرژی کافی برای کندن الکترون را داشته باشند، به یونیزه کردن ادامه می‌دهند و یا در برخورد با دیواره اتاقک یونش از بین می‌روند. الکترون‌های ثانویه با اعمال میدانی الکتریکی شتاب‌دار شده و ذرات خنثی را یونیزه می‌کنند. با این فرایند پلاسما ایجاد می‌شود. جدول ۱-۲ لیست برخوردهای مختلفی که توانایی تولید الکترون در گاز محیط (هیدروژن) را دارند، نشان می‌دهد. فرآیند یونش حاکم، یونش مولکول‌های هیدروژن با برخورد الکترون است. یون‌های ایجاد شده از طریق این فرآیند یونش خیلی سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند و با میدان مغناطیسی محوری به خوبی محصور نمی‌شوند. یون‌ها با توزیع متقارن پتانسیل در ناحیه تخلیه به سمت دو کاتد جارو، و همچنین با اعمال میدانی الکتریکی شتاب‌دار می‌شوند. الکترون‌های ثانویه به سمت عقب یعنی ناحیه‌ی ایجاد یونش شتاب‌دار می‌شوند و دوباره در این فرآیند شرکت می‌کنند.

جدول ۱-۲: برخوردهایی که در گاز هیدروژن منجر به تولید الکترون می‌شوند [۲۷]

$e^{-} + H_2 \rightarrow e^{-} + H + H$	88 eV
$e^{-} + H_2 \rightarrow e^{-} + e^{-} + H_2^{+}$	15.4 eV
$e^{-} + H \rightarrow e^{-} + e^{-} + H^{+}$	13.6 eV
$e^{-} + H_2 \rightarrow e^{-} + e^{-} + H + H^{+}$	18 eV
$e^{-} + H_2 \rightarrow e^{-} + e^{-} + e^{-} + H^{+} + H^{+}$	46 eV

اتفاق یونش با ایجاد یک روزنه استخراج که یون‌ها بتوانند از پلاسما خارج شوند تبدیل به یک چشمه‌ی یونی می‌شود. در تخلیه پنینگ ایجاد یک یا چند روزنه در کاتد یا آند به یون‌ها اجازه می‌دهد که از آن مکان به سمت ناحیه خلا خارج بشوند [۲۷].

برای استخراج یون‌ها به الکترودهای استخراج یا لنزهای الکترومغناطیسی، پتانسیلی تحت عنوان پتانسیل استخراج اعمال می‌کنیم و به همین دلیل بین آن‌ها میدان الکتریکی ایجاد می‌شود، شیب میدان الکتریکی در ناحیه استخراج باعث می‌شود که یون‌ها به شکل یک باریکه خارج و برای کاربرد نهایی شتابدار شوند، به این شکل الکترودهای استخراج ذرات باردار را از ناحیه پلاسما بیرون می‌کشد و آن‌ها را در یک جهت خاص شتاب می‌دهد. به همین دلیل هندسه‌ی الکترودهای استخراج یک فاکتور مهم برای استخراج موثر یون‌ها از پلاسمای چشمه‌ی یونی است [۳۵].

جریان یون خروجی تابعی از چگالی پلاسمای درون چشمه یون و اندازه‌ی شکاف استخراج است. چگالی پلاسما درون تخلیه پنینگ نسبتاً کم و از مرتبه‌ی 10^{10} cm^{-3} است و به این خاطر اشکال بزرگی در استفاده از چشمه‌ی یونی پنینگ برای کاربردهای تولید نوترون بوجود می‌آید، علت آن هم جریان کم خروجی است [۲۷].

با وجود محدودیت‌های اعمال شده بدلیل چگالی کم پلاسمای چشمه‌ی یونی پنینگ، این چشمه به واسطه ابعاد کوچک و مصرف تغذیه کم به آسانی قابل دسترس است، چنین چشمه‌هایی برای اینکه در آینده برای تولید نوترون استفاده شوند، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. چشمه‌های یونی که با امواج میکروویو و رادیوفرکانسی کار می‌کنند اغلب برای نگهداری تخلیه چند صد وات تغذیه مصرف می‌کنند، در حالیکه چشمه‌های پنینگ استفاده شده در سیستم‌های تولید نوترون تجاری اغلب تغذیه کمتری از مرتبه‌ی چند ده وات مصرف می‌کنند. طراحی سیستم تولید نوترون با استفاده از چشمه‌ی یونی پنینگ در مقایسه با دیگر چشمه‌ها خیلی ساده‌تر است، چون مکانیسم‌هایی که در آن‌ها تخلیه با امواج ایجاد می‌شود اغلب نیاز به طراحی سیستم‌های بزرگ و پیچیده دارند [۲۷].

اصولاً وضعیت عملکرد توسط ساختار، جنس الکترودها و سه شرط خارجی شامل منبع تغذیه، میدان مغناطیسی و تغذیه گاز مورد نظر تعیین می‌شود. در طول عملکرد، ذرات بارداری که به آند جذب می‌شوند جریانی را تحت عنوان جریان تخلیه ایجاد می‌کنند که با قرار دادن آن در پتانسیل

صفر کم می‌شود [۲۹, ۳۲].

۱-۴-۲ عوامل موثر بر عملکرد چشمه یونی PIG

عوامل زیادی بر ایجاد یونش و تشکیل پلاسما در این چشمه تاثیر گذار هستند که در ادامه به مهمترین موارد اشاره می‌شود:

۱-۴-۲-۱ میدان مغناطیسی

برای فشار گاز و ولتاژ یونش معین، ویژگی‌های چشمه از بزرگی میدان مغناطیسی و در نتیجه محصورسازی مغناطیسی ذرات درون پلاسما متأثراند. میدان مغناطیسی بزرگ نتیجه‌اش کوچک شدن شعاع چرخش یون و الکترون است. بنابراین چگالی پلاسما با افزایش میدان مغناطیسی، افزایش می‌یابد و معمولاً به طور آشکاری جریان خروجی از چشمه هم زیاد می‌شود. از نظر آزمایشگاهی هرچند جریان خروجی با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد اما از یک جایی به بعد هم با افزایش میدان، کم می‌شود [۲۷, ۳۳]. که این موضوع در فصل سوم بررسی شده است.

۱-۴-۲-۲ فشار

برای یک میدان مغناطیسی و اختلاف پتانسیل معین، چشمه‌ی پنینگ می‌تواند در چند مد عمل کند که به فشار گاز درون اتاقک یونش بستگی دارد. در مدت محصورسازی، جریان خروجی از چشمه عموماً با فشار گاز درون چشمه متناسب است. فشار زیاد درون اتاقک یونش باعث افزایش چگالی ذرات خنثی می‌شود. همچنین مسیر آزاد میانگین الکترون‌ها، که برای ایجاد یونش اهمیت دارد، کاهش پیدا می‌کند. فشار عموماً در ورودی گاز به اتاقک یونش اندازه‌گیری می‌شود. از لحاظ تاریخی، تخلیه در فشار گاز کمتر از 0.1 mTorr به عنوان عملکرد در "فشار کم" طبقه بندی شده است. عموماً در آزمایش‌ها از فشاری در محدوده‌ی 0.5-3.0 mTorr استفاده می‌شود. چشمه‌هایی که

در فشار بیشتر کار می‌کنند در محدوده‌ی "فشار زیاد" قرار دارند. در فشار گاز زیاد، عملکرد چشمه‌ی پنینگ ناپایدار می‌شود [۲۷].

۲-۴-۱-۳ اختلاف پتانسیل

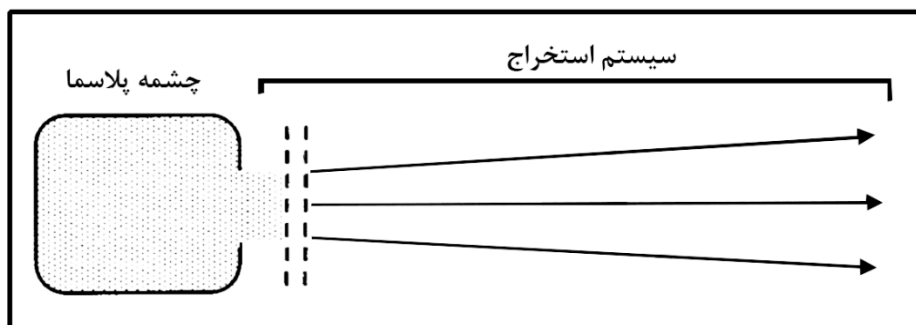
در فشار گاز و میدان مغناطیسی معین، جریان یون خروجی با افزایش اختلاف پتانسیل افزایش می‌یابد. با اعمال اختلاف پتانسیل بین آند و دو کاتد میدان الکتریکی ایجاد و الکترون‌ها بواسطه‌ی این میدان درون اتاقک یونش شتابدار شده و انرژی بیشتری بدست می‌آورند. این الکترون‌ها، قبل از اینکه کل انرژی آن‌ها به زیر مقدار موردنیاز برای یونیزه کردن برسد، می‌توانند گازهای خنثی زیادی را یونیزه کنند [۲۷].

۲-۴-۱-۴ جنس کاتد

در چشمه‌ی یونی PIG از نوع کاتد سرد، یونش توسط الکترون‌های ثانویه‌ی تابیده شده از کاتد رخ می‌دهد. تعیین کاتدی که با گسیل الکترون‌های زیاد منجر به ایجاد یون‌های بیشتری (پلاسمایی با چگالی زیاد) شود در بازده خروجی چشمه یونی موثر می‌باشد. در ساخت کاتدها برای افزایش تابش الکترون از موادی استفاده می‌شود که تابع کار کمی دارد مثل LaB_6 [۳۳].

۲-۵ سیستم استخراج و انتقال باریکه

چشمه‌ی یونی از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول، که در قسمت‌های قبل نیز تشریح گردید، محفظه‌ی تولید یون است که مثل یک مخزن یون‌ها را ذخیره می‌کند. بخش دوم سیستم استخراج باریکه است که یون‌ها را از منبع تحویل گرفته و به شکل یک باریکه درمی‌آورد [۳، ۲۷، ۴۱]. این دو بخش در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: چشمه‌ی پلاسما و سیستم استخراج آن [۳]

۲-۵-۱ سیستم استخراج باریکه

سیستم استخراج مشخصات عمومی باریکه مثل جریان یون و کیفیت باریکه را تعیین می‌کند. بدین ترتیب سیستم استخراج وظیفه‌ی تطبیق یون خروجی از چشمه با سیستم انتقال باریکه که در ادامه به آن اشاره شده را انجام می‌دهد [۳].

استخراج باریکه‌ی یونی از هر چشمه به پارامترهای زیادی همچون هندسه‌ی الکترودها، تعداد الکترودها، پتانسیل اعمال شده به الکترودها، حالت بار باریکه‌ی خروجی و شکل پلاسمای مرزی بستگی دارد. پلاسمای مرزی به چگالی پلاسما، شدت میدان ایجاد شده در سیستم استخراج و توزیع الکترون‌ها در اتاقک یونش وابسته است [۴۱].

در یک سیستم استخراج موارد زیر باید در نظر گرفته شود [۱، ۴۱]:

- ۱) برای دستیابی به انرژی و جریان مطلوب باریکه را به خوبی متمرکز کند.
- ۲) بیشترین تعداد یون خروجی را داشته باشد و بواسطه‌ی برخوردهایی که در ناحیه‌ی استخراج اتفاق می‌افتد کمترین خسارت به الکترودها وارد شود، این باعث افزایش طول عمر الکترودها می‌شود.
- ۳) از لحاظ فنی درست طراحی شده باشد. یعنی خوب تراز شده باشد، به آسانی ساخته و نصب شود، تحمل اعمال پتانسیل بالا و بمباران ناشی از یون‌های عبوری را داشته باشد.

الکترودها نباید در شرایط کار تغییر شکل بدهند.

(۴) اختلاف پتانسیل‌های اعمالی افت و خیز کمی داشته باشند.

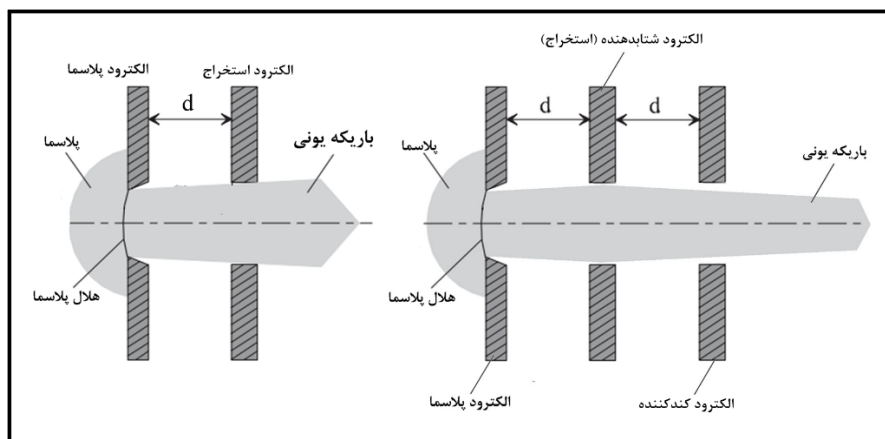
۲-۵-۱-۱ شکل‌گیری باریکه‌ی یونی در سیستم استخراج

استخراج یون از مخزن ذرات باردار و شکل‌گیری باریکه‌ی یونی بوسیله‌ی سیستم استخراج انجام می‌شود. ساده‌ترین نمونه سیستم دو الکترودی (دیودی) است که از الکترودها پلاسما و الکترودها شتاب‌دهنده تشکیل شده است [۳].

باریکه بعد از خروج از الکترودها شتاب‌دهنده و اگر است. برای جلوگیری از واگرایی باریکه الکترودها سومی تحت عنوان الکترودها کندکننده به سیستم اضافه می‌شود. به این ترتیب یک سیستم استخراج سه الکترودی شکل می‌گیرد [۳].

سیستم استخراج تریودی (سه الکترودی)، پتانسیل منفی روی محور سیستم استخراج فراهم می‌کند. پتانسیل منفی بین الکترودها شتاب‌دهنده و کندکننده مانعی برای خروج الکترون‌ها از باریکه ایجاد می‌کند و آنها را درون باریکه نگه می‌دارد. این الکترون‌ها برای جبران حالت بار لازم هستند [۴۱].

الکترودها پلاسما الکترودی است که پلاسما را در مرکز استخراج محدود می‌کند. لازم به ذکر است می‌توان طراحی این الکترودها را به گونه‌ای در نظر گرفت که علاوه بر استخراج باریکه، عملیات متمرکز سازی باریکه را نیز انجام دهد [۴۱]. شکل ۲-۳ سیستم استخراج دیودی و تریودی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: سیستم استخراج دیودی (سمت چپ) و تریودی (سمت راست) [۳]

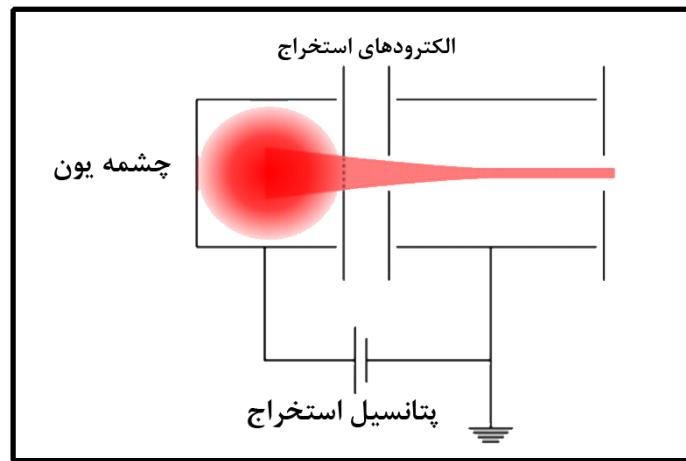
برای تزریق باریکه در شتابدهنده و کاربردهای دیگر مهم است که یون‌ها با کمترین زاویه‌ی پراکندگی خارج شوند. اگر بیشتر از ۸۰ درصد جریان باریکه، زاویه‌ی واگرایی کمتر از ۲۰ میلی رادیان داشته باشد، باریکه‌ی یونی مطابق شکل ۱۳ خارج می‌شود. مطلوب این است که هر چه باریکه از سیستم استخراج فاصله می‌گیرد واگرایی کمی داشته باشد، به همین دلیل اغلب از سیستم استخراج سه تایی استفاده می‌شود. نکته‌ی مهم دیگر به حداقل رساندن بیراهی اپتیکی در سیستم استخراج است که در باریکه‌ی واگرا بیشتر می‌شوند. از عوامل موثر بر واگرایی باریکه، می‌توان به دمای یون‌ها و همین‌طور ضخامت و شکل الکتروود پلاسما اشاره کرد [۳].

۲-۱-۵-۲ ساختار سیستم استخراج

اغلب سیستم استخراج چشمه‌های یونی از یک الکتروود صفحه‌ای حاوی روزنه‌ی خروج (الکتروود پلاسما یا آنتی‌کاتد) و حداقل یک الکتروود دیگر به عنوان الکتروود کشنده (استخراج کننده) تشکیل شده است. اختلاف پتانسیل بین الکتروودها میدان الکتریکی لازم برای شتاب گرفتن و استخراج ذرات باردار از چشمه‌ی یونی را فراهم می‌کند. سیستم استخراج می‌تواند شامل الکتروودهای بیشتری نیز باشد. سیستم استخراج، باریکه را با انرژی E خارج می‌کند.

$$E = q(\phi_{plasma} - \phi_{beamline}) \quad (3-2)$$

طبق رابطه ی (۳-۲) : E انرژی و q بار ذرات در اختلاف پتانسیل بین پلاسما ϕ_{plasma} (جایی که یون ها شکل گرفتند) و خط باریکه $\phi_{beamline}$ تعریف می شود [۴۲]. نمایی از نحوه ی اعمال پتانسیل به چشمه یونی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: اعمال پتانسیل به سیستم استخراج چشمه یون [۴۲]

جریان باریکه ی یونی خارج شده را هم می توان مطابق با رابطه ی (۴-۲) تخمین زد،

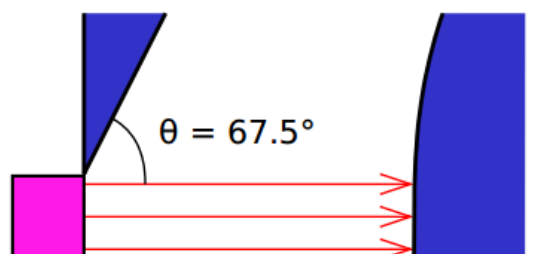
$$I = \frac{1}{4} A q n < v > \quad (4-2)$$

که در این رابطه، A مساحت روزنه ی الکتروود پلاسما، q بار ذرات، n چگالی ذرات باردار باریکه و $<v>$ میانگین سرعت ذرات خارج شده از پلاسمای چشمه ی یونی است. با فرض توزیع ماکسول بولتزمن، میانگین سرعت ذرات خارج شده از پلاسما با رابطه ی (۵-۲) داده می شود [۴۲]. که در این رابطه K ثابت بولتزمن، T دمای پلاسما و m جرم یون ها است.

$$< v > = \sqrt{\frac{8KT}{\pi m}} \quad (5-2)$$

۲-۵-۳ هندسه الکترودها

نیرویی که یون‌ها بواسطه‌ی وجود بار فضایی به یکدیگر وارد می‌کنند، باعث می‌شود که باریکه واگرا شده و این واگرایی به علت سرعت پایین باریکه مخصوصاً در اولین روزنه‌ی استخراج اتفاق می‌افتد. برای خنثی کردن نیروی بار فضایی در جهت انتقال، الکترودها می‌توانند طوری شکل بگیرند که میدان الکتریکی در اولین روزنه علاوه بر شتاب دادن، باریکه را متمرکز نیز بکند. همانطور که در شکل ۲-۵ نیز نشان داده شده است، نیل به این هدف با زاویه دادن به لبه کاتد میسر می‌شود. در این هندسه که به هندسه پیرس^۱ نیز معروف است الکتروود نسبت به جهت حرکت باریکه تحت زاویه 67.5° درجه قرار می‌گیرد. به نحویکه شکل میدان ایجاد شده باعث می‌شود که باریکه به طور موازی از چشمه خارج شود. این زاویه برای چشمه‌های پلاسما بهترین نیست و فقط برای چشمه‌هایی که در آن‌ها سطح تابنده وجود دارد بهترین زاویه‌ی الکتروود استخراج است [۴۲].



شکل ۲-۵: زاویه‌ی پیرس در سیستم استخراج [۴۲]

۲-۵-۲ سیستم متمرکزسازی در انتقال باریکه

چندین نوع ابزار متمرکزسازی^۲ در انتقال باریکه‌ی یون‌های کم انرژی استفاده می‌شود. در این بین رایج‌ترین ابزار حاضر چهارقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که قدرت متمرکزکنندگی زیادی دارند. انواع دیگر ابزار متمرکزکنندگی لنزهای متقارن استوانه‌ای هستند که ساخت و نصب این

^۱ Pierce geometry

^۲ Focus

لنرها روی باریکه، نسبت به چهارقطبی‌ها آسان تر است. سلنوئید گلاس^۱ و لنزهای اینزل^۲ از این نوع هستند [۴۳، ۴۴].

۲-۵-۱-۲ لنزهای الکترواستاتیکی و انواع آن

لنزهای الکترواستاتیکی به طور گسترده در اپتیک ذرات باردار استفاده می‌شوند، که به عنوان متمرکزکننده در سیستم‌های باریکه‌ی یونی به کار می‌روند. هدف، متمرکز کردن ذرات باردار زیادی در حجم کم است. این هدف با استفاده از لنزهای الکترواستاتیکی حاصل می‌شود [۴۳].

لنزهای الکترواستاتیکی، سیلندرهایی هستند که نسبت به باریکه با تقارن استوانه‌ای نصب می‌شوند. کارایی این لنزها به پارامترهای مختلفی همچون نسبت ولتاژ آن‌ها، اندازه‌ی سیلندر و فضای بین الکترودها بستگی دارد. مشکل بزرگ این لنزها تخلیه‌ی الکتریکی و تجمع بار روی سطح آن‌ها است. هم‌محور بودن لنزها مهمترین نکته‌ای است که باید در ساختمان آن‌ها در نظر گرفته شود. تا زمانی که همه چیز متقارن است، سیستم کمتر دچار مشکل می‌شود [۴۵]. معروف ترین لنزهای الکترواستاتیکی که در چشمه های یونی به کار می روند، سیستم دیودی^۳ (دو لنزی) و سیستم تریودی^۴ (سه لنزی) می باشند که در ادامه به معرفی عملکرد آن ها می پردازیم [۴۳].

۲-۵-۱-۲ سیستم دیودی

این سیستم از دو لنز با ضخامت‌های برابر تشکیل شده است. این لنزها به لنزهای غوطه‌ور هم معروف هستند. زمانی که به لنزها پتانسیل اعمال شود میدانی بین آنها تشکیل می‌شود، بواسطه‌ی همین میدان، این لنزها در دو مد شتابدهنده و کندکننده عمل می‌کنند. مسیر حرکت یون در لنزهای

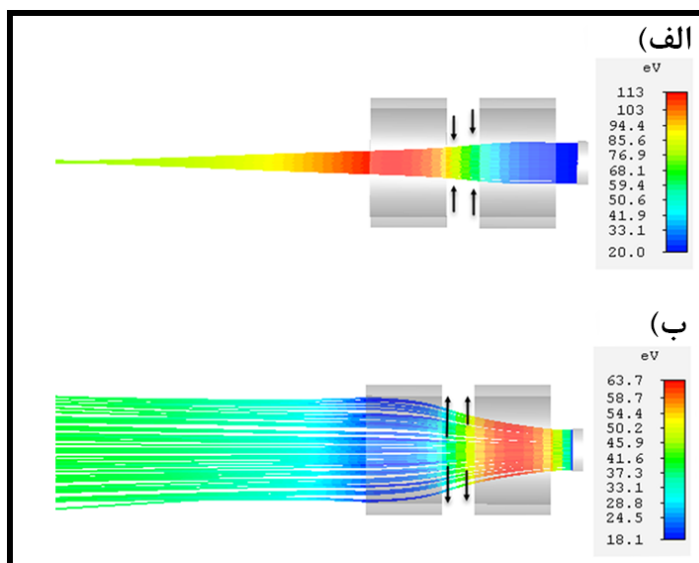
^۱ Glaser Solenoid

^۲ Einzel Linse

^۳ Diode system

^۴ Triode system

شتابدهنده و کند کننده در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲: لنزهای غوطه‌ور در دو مد الف) شتابدهنده و ب) کندکننده

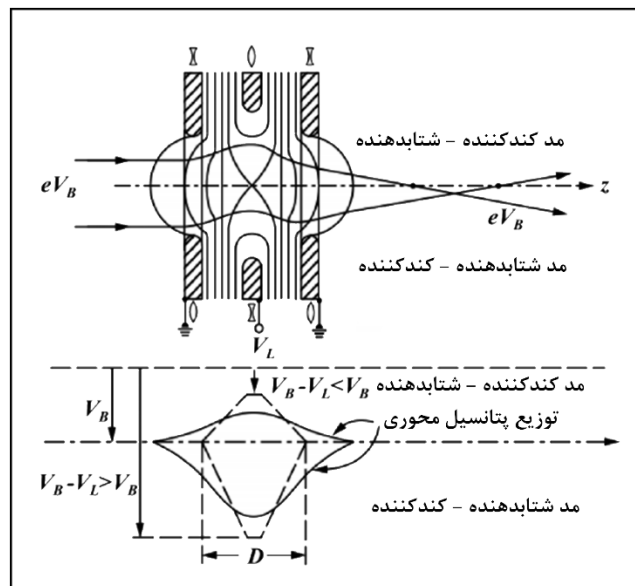
در لنزهای شتابدهنده، همین‌طور که ذرات به لنز نزدیک می‌شوند، میدان اطراف لنز نیرویی به سمت مرکز به آن‌ها وارد می‌کند. در فضای بین لنزها مولفه‌ی موازی سرعت افزایش و مولفه‌ی عمودی آن به ذرات نیرویی به سمت مرکز وارد می‌کند. داخل لنز هم ذرات شتابدار شده بنابراین ذرات با افزایش سرعت موازی از لنزها خارج می‌شوند. در لنزهای کندکننده، به خاطر نسبت پتانسیل بین لنزها، مولفه‌ی موازی سرعت کاهش پیدا می‌کند، مولفه‌ی عمودی نیرویی به سمت خارج از محور به ذرات وارد می‌کند در نتیجه ذرات نزدیک دیواره لنز می‌شوند. بنابراین ذرات، لنز را با سرعت کاهش یافته ترک می‌کنند [۴۳].

۲-۵-۲-۱-۲ سیستم تریودی

در این نوع از لنزها که در شتابدهنده ذرات، سیستم کاشت یون و طیف‌سنج جرمی استفاده می‌شوند، ولتاژ الکتروود میانی (V_2) بالاتر از ولتاژ الکتروودهای اطرافش (V_1 و V_3) تنظیم شده است. زمانی که پتانسیل برای سه الکتروود متفاوت باشد توزیع پتانسیل شکل زین می‌شود، در اینجا هم ولتاژ الکتروود وسطی بیشتر از الکتروودهای اطرافش است. زمانی که پتانسیل دو الکتروود خارجی مقدار یکسانی

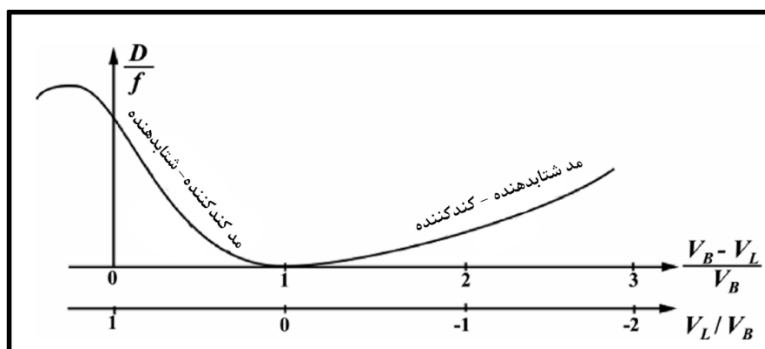
دارد ($V_3 = V_1$) این نوع از لنزهای الکترواستاتیکی، لنزهای اینزل یا تعلیقی نامیده می‌شوند.

برخلاف لنزهای غوطه‌ور، لنزهای تعلیقی همیشه لنزهای متمرکزکننده هستند. شکل ۷-۲ مثالی از لنزهای اینزل متقارن است که از الکتروود سوراخ شده ساخته شده است. زمانی که خطوط هم پتانسیل در نظر گرفته شود، توزیع پتانسیل شبیه سطح یک زین است [۴۵].



شکل ۷-۲: توزیع پتانسیل لنزهای اینزل [۴۲]

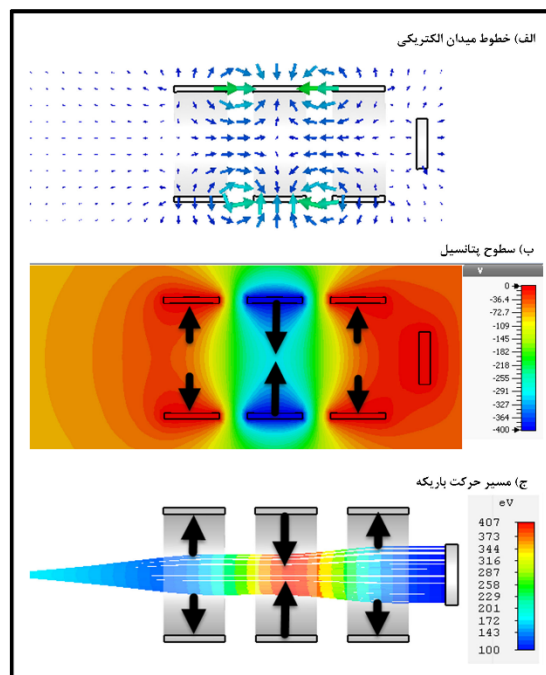
این لنزها در دو مد عمل می‌کنند: مد شتابدهنده-کندکننده و مد کندکننده-شتابدهنده. اگر اختلاف پتانسیل چشمه و لنز میانی کوچکتر از پتانسیل چشمه باشد ($V_B - V_L < V_B$)، لنزها در مد کندکننده-شتابدهنده و اگر بزرگتر باشد ($V_B - V_L > V_B$)، لنزها در مد شتابدهنده-کندکننده عمل می‌کنند. در شکل ۸-۲ قدرت لنز برای هر دو مد با محور توزیع پتانسیل نشان داده شده است [۴۵]. در این شکل eV_B انرژی باریکه است.



شکل ۸-۲: نسبت قدرت لنزهای اینزل به پتانسیل الکتروود میانی [۴۵]

به دو دلیل مد کندکننده-شتابدهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد: اولاً چون علامت پتانسیل الکتروود مرکزی با پتانسیل چشمه برابر است، چشمه‌ی یونی و الکتروود میانی با یک منبع، تغذیه می‌شود. ثانیاً اگر پتانسیل الکتروود مرکزی در حد پتانسیل چشمه باشد، در این مد قدرت لنز زیاد می‌شود که به معنی فاصله‌ی کانونی کوتاه است [۴۵].

در این مد وقتی یون‌ها از الکتروود اول خارج می‌شوند میدان الکتریکی انرژی جنبشی یون‌ها را بیشتر کرده و آن‌ها را به صورت شعاعی به داخل می‌راند. بنابراین انرژی یون‌ها بیشتر شده و همگرا می‌شوند، با ورود یون‌ها به الکتروود دوم، میدان الکتریکی یون‌ها را به صورت شعاعی به سمت داخل هل می‌دهد. عکس این مطلب زمانی که یون‌ها از الکتروود دوم خارج می‌شوند اتفاق می‌افتد. یک نیروی شعاعی به سمت بیرون وارد شده و یون‌ها از لحاظ محوری هم کند می‌شوند. یون‌هایی که وارد الکتروود سوم می‌شوند کم‌انرژی‌تر هستند و یک نیروی شعاعی به سمت بیرون احساس می‌کنند. زمانی که از الکتروود سوم خارج می‌شوند، به صورت شعاعی متراکم و در راستای محوری سرعت می‌گیرند. شکل ۹-۲ میدان الکتریکی، سطوح پتانسیل و باریکه عبوری از لنزهای اینزل برای زمانی که لنزهای طرفین در پتانسیل صفر و لنز میانی در پتانسیل ۴۰۰ ولت باشد را نشان می‌دهد.

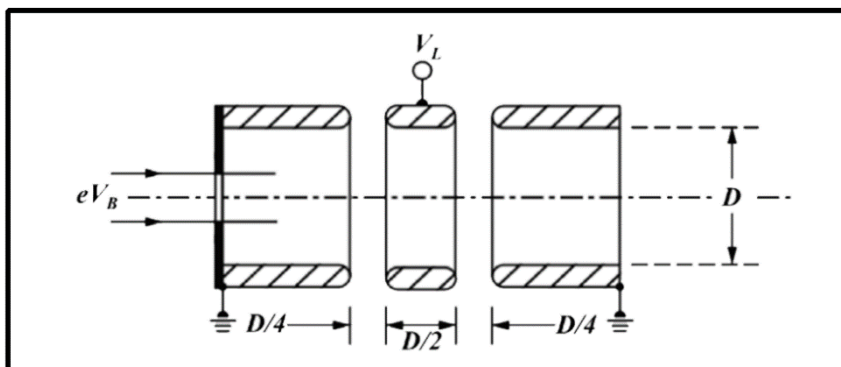


شکل ۲-۹: میدان الکتریکی، پتانسیل و باریکه‌ی عبوری از لنزهای اینزل در پتانسیل صفر و ۴۰۰ ولت

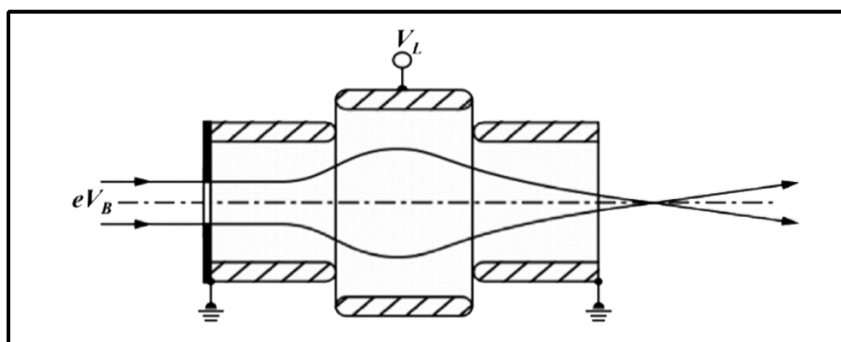
مرتبه‌ی بزرگی نیروی شعاعی به سمت داخل نسبت به نیروی عکس آن به انرژی جنبشی یون‌های ورودی و اختلاف پتانسیل بین الکترودها بستگی دارد. از آنجایی که یون‌ها در ورود به الکتروود میانی سریع‌تر حرکت می‌کنند، نیروی شعاعی به سمت داخل در الکتروود مرکزی بیشتر از نیروی شعاعی به سمت خارج در الکتروود اول و سوم است. اگر اختلاف پتانسیل بین الکتروود اول و دوم نسبتاً کوچکتر از انرژی جنبشی یون‌ها باشد، یون‌ها به صورت محوری خیلی آهسته نمی‌شوند و نیروی شعاعی زیادی هم احساس نمی‌کند، نتیجه اش تغییر شعاعی کم در مسیر یون است. در واقع یک لنز اینزل با ایجاد تعادل بین انرژی جنبشی یون و اختلاف پتانسیل الکتروود مرکزی با الکترودهای اطراف کار می‌کند. در این مد زمانی که نسبت پتانسیل الکتروود میانی به پتانسیل چشمه (V_L/V_B) با مقادیر مثبت افزایش پیدا کند، قدرت لنز، یا D/f لنز به سمت بیشینه می‌رود، یعنی طول کانونی f حداقل می‌شود. با انتخاب آگاهانه‌ی هندسه‌ی لنز، کمینه طول کانونی می‌تواند دقیقاً در $V_L/V_B=1$ ایجاد بشود، یعنی زمانی که پتانسیل چشمه با پتانسیل الکتروود میانی برابر باشد ($V_L = V_B$). اینکه پتانسیل چشمه و لنز یک مقدار باشد برای برخی کاربردها بسیار مفید است [۲۵]. برای مثال در شکل ۲-۱۰ زمانی که $V_L=V_B$ باشد،

فاصله‌ی کانونی $2D$ است. اما زمانی که $V_L = 0.5 V_B$ باشد، فاصله‌ی کانونی حدوداً $10D$ است [۴۵].

در این مد حفره‌ی الکتروود مرکزی می‌تواند بزرگتر از الکتروودهای اطراف ساخته بشود در این صورت ولتاژ مورد نیاز برای دستیابی به نقطه‌ی کانونی مورد نظر کمتر می‌شود. شکل ۱۱-۲ لنزهای اینزل را در این مد نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۲: هندسه‌ی لنزهای اینزل [۴۵]

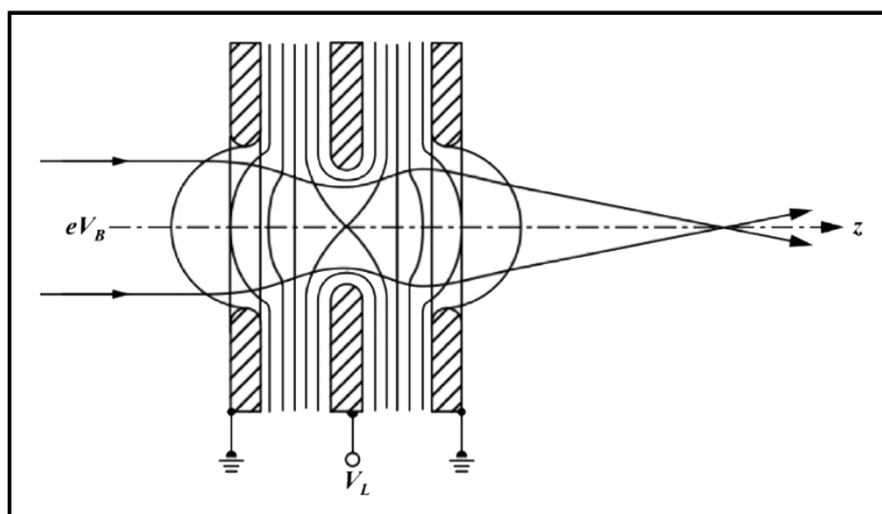


شکل ۱۱-۲: مثالی از لنزهای اینزل در مد کندکننده-شتابدهنده [۴۵]

در مد شتابدهنده-کندکننده ولتاژ بیشتری نسبت به مد دیگر نیاز است، یعنی برای عمل کردن لنزها در این مد نیاز به یک منبع تغذیه جداگانه با پتانسیل بیشتر از منبع تغذیه‌ی چشمه است. این مد زمانی مفید است که طول کانونی خیلی زیادی مورد نیاز نباشد. همین‌طور در این مد بیراهی باریکه نسبت به مد دیگر کمتر است و دلیل آن هم این است که انرژی جداسازی ذرات $(\Delta V/V)$ در این مد کوچکتر است، این ویژگی باعث می‌شود که مسیر باریکه به محور نزدیکتر باشد. با این تفاسیر، در این مد شعاع الکتروود مرکزی می‌تواند کوچکتر از الکتروودهای اطراف ساخته بشود و به این دلیل ولتاژ مورد

نیاز برای دستیابی به نقطه‌ی کانونی کمتر می‌شود [۴۵]. شکل ۲-۱۲ لنزهای اینزل را در این مد نشان می‌دهد.

ذراتی که در حال عبور از این لنزهای اینزل در مد شتابدهنده-کندکننده هستند اول یک نیروی واگرا کننده، سپس یک نیروی متمرکز کننده، سپس دوباره یک نیروی واگرا کننده را متحمل می‌شوند. اثر خالص این نیروها همیشه همگراکننده خواهد بود.



شکل ۲-۱۲: هندسه‌ی مفید برای لنزهای اینزل در مد شتابدهنده-کندکننده [۴۵]

در فصل بعدی فرآیند شبیه‌سازی چشمه در نرم افزار CST بیان و خروجی‌ها نمایش داده خواهد شد.

۳ فصل سوم: شبیه‌سازی چشمه یونی پنینگ

۳-۱ مقدمه

مرحله‌ای که بین طراحی و ساخت یک چشمه‌ی یونی وجود دارد، شبیه‌سازی است. از آنجایی که انجام حل تحلیلی برای مسائل با هندسه‌های مختلف پیچیده و زمان بر می‌باشد، به سراغ شبیه‌سازی عددی می‌روند. انجام شبیه‌سازی عددی، فهم پارامترهای موثر بر مسئله را آسان و اجرای بسیاری از ایده‌ها برای تغییر طراحی را ممکن می‌سازد. در شبیه‌سازی با توجه به چرخه توسعه کوتاه‌تر، تهیه‌ی نمونه اولیه مجازی قبل از آزمایشات فیزیکی و بهینه‌سازی به جای آزمایش می‌تواند محصول قابل توجهی را ارائه دهد. امروزه تقریباً همه‌ی چشمه‌های یونی قبل از اینکه ساخته بشود با شبیه‌سازی مطالعه می‌شود، مثلاً هر قسمتی از سیستم اپتیکی چشمه‌ها ابتدا شبیه‌سازی و بعد ساخته می‌شوند. کدهای شبیه‌سازی کامپیوتری یک ابزار قدرتمند برای بهینه‌سازی سیستم ذرات باردار است، با این حال برنامه باید درست انتخاب شود تا بیشترین بازده را داشته باشد. در این فصل شبیه‌سازی چشمه یونی پنینگ در دستور کار قرار می‌گیرد و اثر اختلاف پتانسیل، میدان مغناطیسی، طول و ضخامت الکترودها در این چشمه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت باریکه‌ی خروجی از چشمه توسط لنزهای الکترواستاتیکی هدایت و بر روی هدف متمرکز می‌شود.

۳-۱-۱ معرفی نرم افزار CST

به طور کلی برنامه‌های ترسیم تابش برنامه‌هایی هستند که می‌توانند باریکه‌ی ذرات باردار را درون سیستم استخراج شبیه‌سازی کنند. نرم افزارهای SIMION و CST نمونه‌ای از برنامه‌های ترسیم تابش هستند [۴۱]. نرم‌افزار سیمیون یک ذره را ترابرد و پروفایل باریکه را نیز در دو بعد نشان می‌دهد، اما نرم‌افزار CST توانایی ترابرد تعداد زیادی ذره را داشته و علاوه بر خروجی‌های مختلف، پروفایل باریکه در سه بعد را نیز نشان می‌دهد. مجموعه این قابلیت‌ها نرم‌افزار CST را انتخاب مناسبی شبیه‌سازی چشمه یونی مورد نظر در این تحقیق کرده است. در ادامه به معرفی این نرم‌افزار پرداخته

می‌شود.

CST برگرفته از Computer Simulation Technology است، یک نرم افزار قدرتمند در زمینه‌ی شبیه‌سازی میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای سه بعدی است. در سال ۱۹۹۸ اولین نسخه‌ی این برنامه معرفی شد که حاصل تلاش و تحقیق چندین ساله‌ی افراد زیادی در زمینه‌ی ساخت نرم افزار آنالیز و طراحی سازه‌های الکترومغناطیسی بود. در واقع این نرم‌افزار حاصل سال‌ها تحقیق و توسعه در بسیاری از حل‌های محاسباتی دقیق و کارآمد برای طراحی‌های الکترومغناطیسی است. این برنامه ترکیبی از ابزارهایی است که برای طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌ها در طیف وسیعی از فرکانس‌ها استفاده می‌شوند. تجزیه و تحلیل اثرات حرارتی و مکانیکی، و همچنین شبیه‌سازی مدار از دیگر ویژگی‌های این نرم‌افزار می‌باشد [۴۶، ۴۷].

CST STUDIO SUITE شامل ماژول‌های زیر است:

CST Microwave Studio (CST MWS)؛ ابزاری ویژه برای شبیه‌سازی سه بعدی سریع و دقیق دستگاه‌های فرکانس بالا است. این ماژول قادر به تجزیه و تحلیل سریع و دقیق از آنتن‌ها، فیلترها، اتصالات، ساختارهای فلزی و چند لایه، اثرات یکپارچگی سیگنال^۱ (SI) و سازگاری الکترومغناطیسی^۲ (EMC) و غیره می‌باشد. از این ماژول بیشتر برای شبیه‌سازی آنتن‌ها و رادارها استفاده می‌شود.

CST EM Studio (CST EMS)؛ یک ابزار آسان برای استفاده در طراحی، تجزیه و تحلیل وسایل الکترومغناطیسی در فرکانس‌های پایین و ثابت مانند موتور، سنسور، راه انداز، خازن، ترانسفورماتور و محفظه‌های محافظ است.

CST Particle Studio (CST PS)؛ برای تحلیل دقیق دینامیک ذرات باردار در میدان‌های مغناطیسی و نمایش مسیر حرکت ذرات به صورت سه بعدی است. با این ماژول می‌توان تفنگ الکترونی،

^۱ Signal integrity

^۲ Electromagnetic Compatibility

تیوپ پرتو کاتدی، کاواک‌های شتاب‌دهنده، مگنترون‌ها و میدان‌های پویا را شبیه‌سازی کرد.

CST Cable Studio (CST CS) ؛ برای شبیه‌سازی یکپارچگی سیگنال و تجزیه و تحلیل

سازگاری و تداخل الکترومغناطیسی^۱ در کابل استفاده می‌شود.

CST PCB Studio (CST PCBS) ؛ برای شبیه‌سازی یکپارچگی سیگنال و سازگاری و تداخل

الکترومغناطیسی (EMI/EMC) در صفحات مدار چاپی مورد استفاده است.

CST Mphysics Studio (CST MPS) ؛ برای تحلیل تنش‌های حرارتی و مکانیکی استفاده

می‌شود. با این قسمت می‌توان به بررسی میدان‌های گرمایی در یک کوره پرداخت.

CST Design Studio™ (CST DS) ؛ یک ابزار همه کاره است که با استفاده از آن می‌توان

شماتیکی برای شبیه‌سازی سیستم‌های الکترومغناطیسی فراهم کرد.

ماژول CST Particle Studio

این ماژول مسیرهای باریکه را طبق معادلات ریچاردسون-داشمن^۲ و چایلد-لانگمیر^۳ برای تابش

الکترون‌ها محاسبه کرده و می‌تواند مسیرهای باریکه‌ی الکترون را از بین میدان الکترواستاتیکی با

محاسبه‌ی اثرات حالت بار^۴ شبیه‌سازی کند و انتشار ذرات در فضا را انجام دهد. این ماژول مبتنی بر

الگوریتم‌هایی که در بسته شبیه‌سازی MAFIA-4 استفاده می‌شود، می‌باشد. ماژول PIC همچنین

می‌تواند از محاسبات GPU استفاده کند که باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد زمانی اجرای برنامه

می‌شود. برای شبیه‌سازی چشمه‌ی یونی پنینگ یا PIG از این محیط نرم افزار CST استفاده می‌شود

[۴۸، ۴۶].

^۱ Electromagnetic interference

^۲ Richardson-Dushman

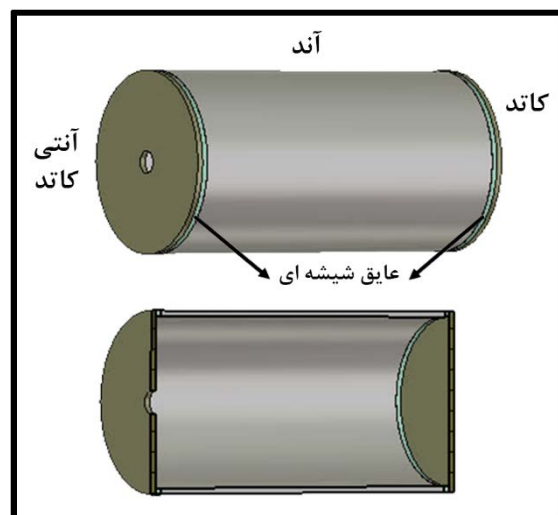
^۳ Child-Langmuir

^۴ Charge state

۲-۳ فرآیند شبیه سازی چشمه

۱-۲-۳ اتاقک یونش

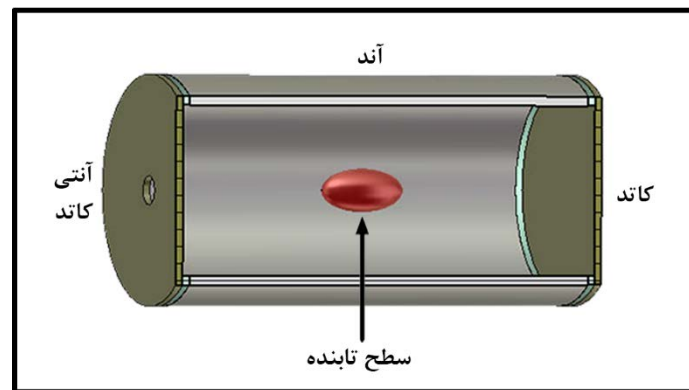
برای آغاز شبیه سازی چشمه لازم است ساختار چشمه ی پنینگ را در محیط ردیابی ذره این نرم افزار ایجاد کنیم. از آنجا که ابعاد آند مهمترین عامل برای تعیین اندازه ی چشمه است، ابتدا ابعاد آند را مشخص می کنیم. برای چشمه ی یونی پنینگ ممکن است طول آند حدود $1/25$ تا ۲ برابر بزرگتر از قطر داخلی آن باشد. نتایج آزمایش تجربی نشان می دهد که با در نظر گرفتن این نسبت (طول آند به قطر داخلی آن) یونش در این چشمه بهتر و بیشتر انجام می شود [۴۹]. برای این منظور ابتدا استوانه ی نوعی به قطر داخلی ۳۰ و طول ۶۰ میلی متر به عنوان آند انتخاب می شود. دو صفحه به قطر ۳۰ میلی متر به عنوان کاتد و آنتی کاتد ابتدا و انتهای آن قرار می گیرند، همین طور یک حلقه ی شیشه ای به عنوان عایق بین آند و هر کدام از کاتدها نصب می شوند. ضخامت هر کدام از این قطعات ۱ میلی متر است. شکل ۱-۳ ساختار ابتدایی چشمه ی پنینگ است.



شکل ۱-۳: ساختار اتاقک یونش چشمه ی پنینگ

لازم به ذکر است در محیط ردیابی ذرات نرم افزار CST امکان ایجاد پلازما وجود ندارد برای

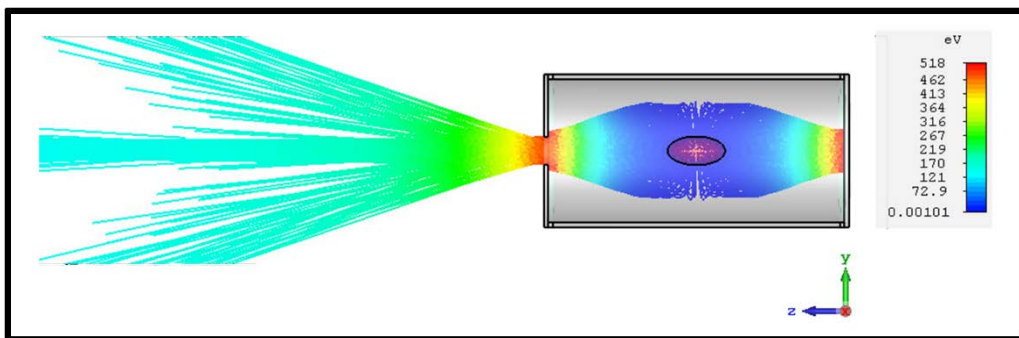
ایجاد یون‌ها از سطح تابنده^۱ استفاده می‌شود. از آنجایی که در صورت ایجاد یونش و شکل‌گیری پلاسما درون آند، پلاسما تقریباً تقارن استوانه‌ای داشته و مانند یک بیضی است، سطح تابنده بیضی شکل و با قطر بزرگ و کوچک به ترتیب ۱۲ و ۶ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل ۲-۳ که برشی مقطعی از این چشمه است به خوبی مکان قرارگیری سطح تابنده را مشخص می‌کند.



شکل ۲-۳: سطح تابنده ذره‌ی باردار که به عنوان پلاسمای درون چشمه شبیه‌سازی شده است

مرحله‌ی بعدی اعمال پتانسیل به آند و کاتد برای شکل‌گیری میدان الکتریکی جهت ایجاد یونش در پلاسما و هدایت ذرات باردار به سمت آنتی کاتد جهت خروج از روزنه می‌باشد. برای شروع تخلیه الکتریکی و ایجاد پلاسما درون آند نیاز به اختلاف پتانسیل از مرتبه‌ی ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ ولت می‌باشد. با توجه به این که در این شبیه‌سازی از سطح تابنده به جای پلاسما استفاده می‌شود، هدف از ایجاد میدان الکتریکی بین آند و کاتد صرفاً هدایت یون‌های درون آند، به سمت آنتی کاتد می‌باشد. پتانسیل آند و کاتدها به ترتیب ۱۵+ و ۵۰۰- ولت انتخاب شده است به نحوی که باعث می‌شود یون‌ها به سمت آنتی کاتد حرکت کنند. لازم به ذکر است انرژی یون‌های ساطع شده از سطح تابنده مقدار نوعی ۱۰ الکترون ولت انتخاب شده است. شکل ۳-۳ مسیر حرکت یون‌ها از سطح تابنده را نشان می‌دهد. رنگ‌بندی ذرات در این شکل بر اساس انرژی است. در ادامه سیستم استخراج باریکه از چشمه یونی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

^۱ Solid emitter

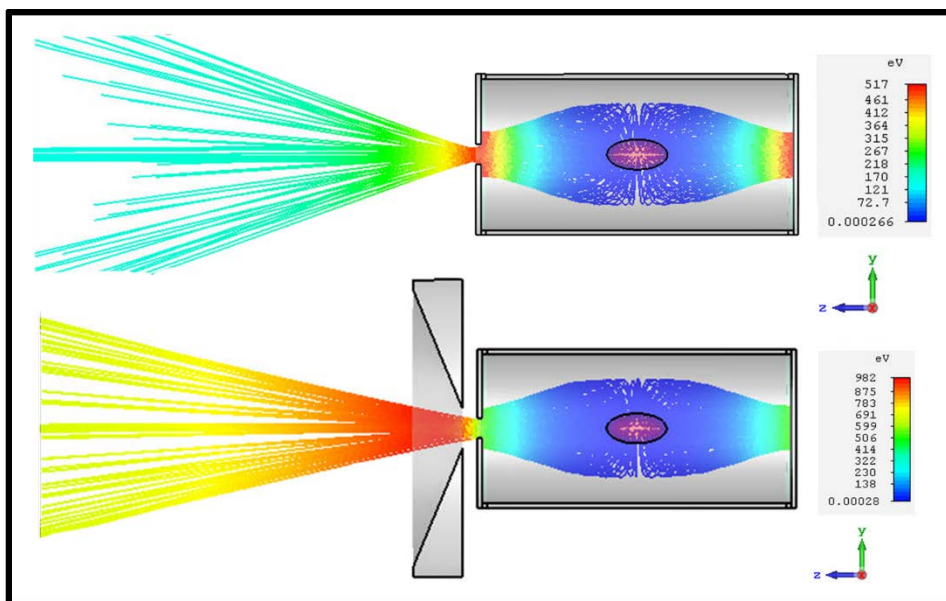


شکل ۳-۳: مسیر حرکت ذرات باردار در چشمه با اعمال پتانسیل ۱۵+ ولت به آند و ۵۰۰- ولت به کاتدها

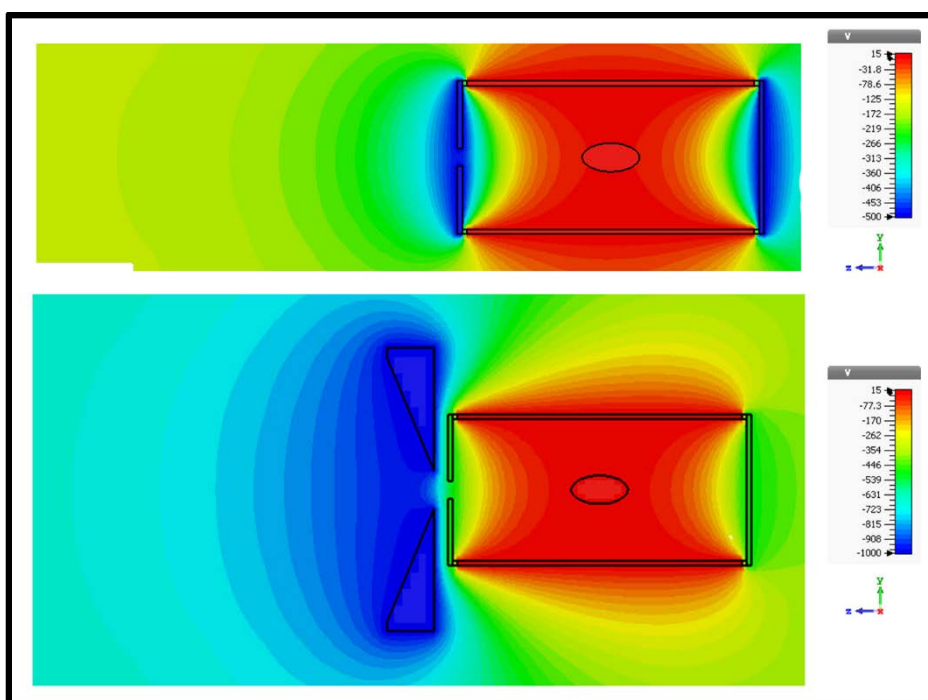
۲-۲-۳ سیستم استخراج

بعد از شکل‌گیری یون مهمترین بخش یک چشمه‌ی یونی سیستم استخراج باریکه می‌باشد. طراحی سیستم استخراج به طور کلی برای بهینه‌سازی مشخصات اپتیکی و جریان باریکه‌ی یونی است. سیستم استخراج چشمه در شکل ۳-۳ کامل نیست و برای جلوگیری از واگرایی شدید باریکه و همین‌طور رساندن یون‌ها به انرژی مورد نظر از یک الکتروود دیگر به نام الکتروود استخراج استفاده می‌شود.

الکتروود استخراج معمولاً در پتانسیل چند کیلوولت نسبت به آنتی‌کاتد قرار دارد، بنابراین یون‌ها را به سمت خود می‌کشد، هر چه الکتروود استخراج در پتانسیل بیشتری باشد، انرژی یون‌های خروجی از آن بیشتر می‌شود. اثر این الکتروود هم در ادامه بررسی می‌شود. شکل ۴-۳ ساختار چشمه را با و بدون این الکتروود نشان می‌دهد. گستره‌ی انرژی باریکه در کنار هر شکل مشخص شده است. شکل ۵-۳ سطوح هم‌پتانسیل ایجاد شده بواسطه‌ی اعمال پتانسیل ۱۰۰۰- ولت به الکتروود استخراج را نشان می‌دهد. خاطرنشان می‌شود، ممکن است سیستم استخراج الکتروودهای دیگری نیز داشته باشد که بسته به کاربرد چشمه می‌تواند شامل الکتروودی که در پتانسیل صفر قرار دارد یا الکتروودی که بواسطه‌ی ساختارش باریکه را متمرکز هم می‌کند، باشد.



شکل ۴-۳: مسیر حرکت باریکه در سیستم استخراج چشمه با و بدون الکتروود استخراج کننده



شکل ۵-۳: سطوح هم‌پتانسیل چشمه با و بدون الکتروود استخراج کننده

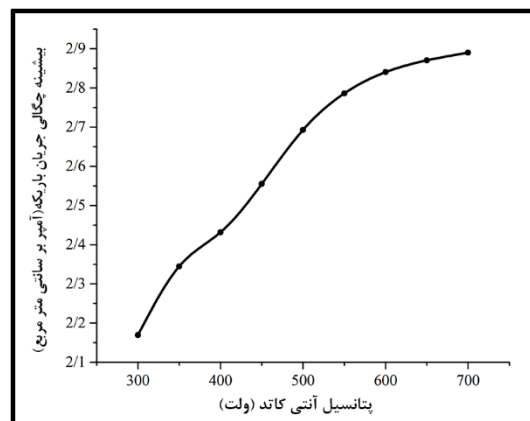
۳-۲-۳ عوامل موثر بر پروفایل باریکه

عوامل مختلفی بر روی پروفایل باریکه تاثیر گذار هستند که در این بخش به آنها پرداخته

خواهد شد. این عوامل باعث تغییر چگالی جریان خروجی از چشمه، شدت نشر^۱، قطر باریکه و فاصله‌ی کانونی باریکه می‌شود.

۱-۳-۲-۳ پتانسیل آند و آنتی کاتد

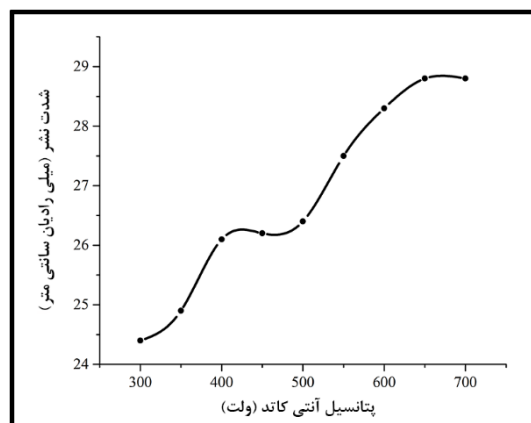
یکی از عواملی که بر باریکه خروجی از چشمه یونی اثر می‌گذارد، پتانسیل الکتروود پلاسما (آنتی کاتد) می‌باشد. لازم به ذکر است که پتانسیل آند هم در شکل باریکه موثر است اما بهترین پتانسیل برای آند ۱۵ ولت انتخاب شده، که با در نظر گرفتن این موضوع اثر پتانسیل آنتی کاتد بررسی شده است. شکل ۳-۶ بیشینه چگالی جریان باریکه‌ی خروجی بر حسب پتانسیل آنتی کاتد را نشان می‌دهد. پتانسیل این الکتروود با بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه تقریباً رابطه‌ی مستقیم دارد.



شکل ۳-۶: بیشینه چگالی جریان باریکه خروجی بر حسب پتانسیل کاتد. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

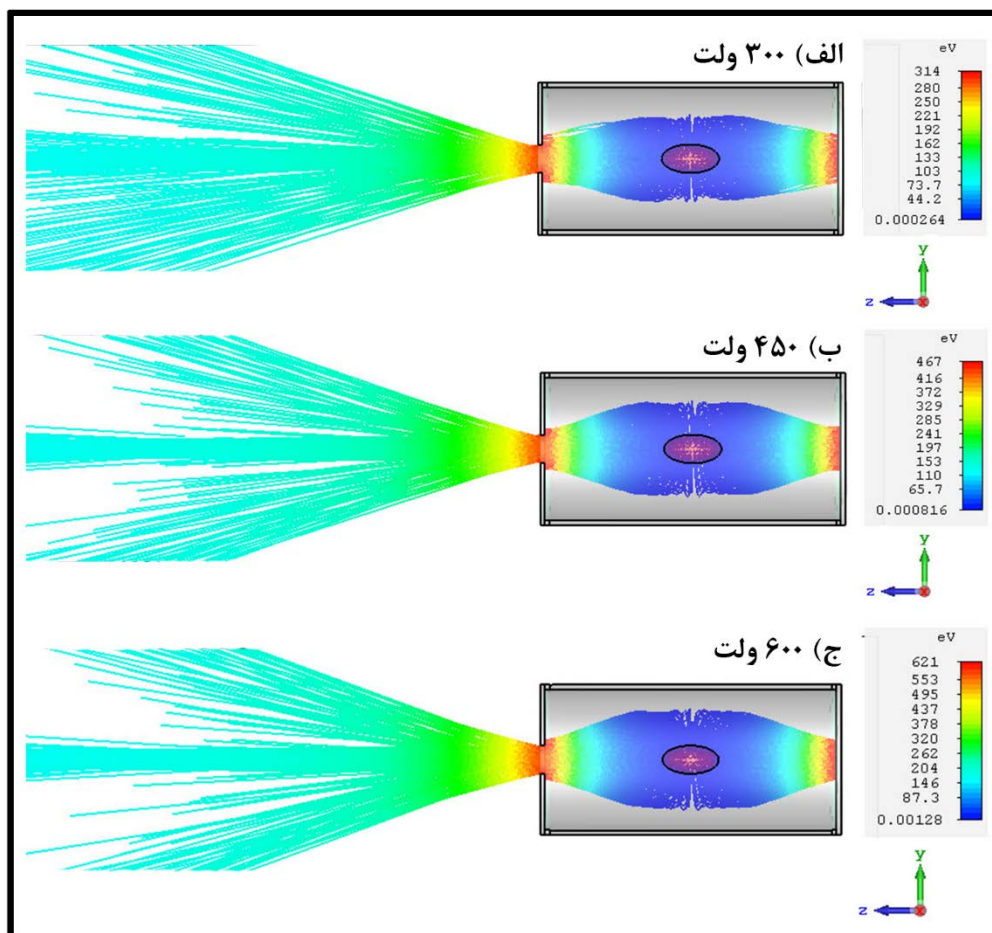
شکل ۳-۷ شدت نشر باریکه‌ی خروجی از آنتی کاتد را در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متری از آن نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش پتانسیل آنتی کاتد شدت نشر باریکه افزایش پیدا می‌کند اما از ۵۰۰ ولت به بعد شیب نمودار بیشتر می‌شود، بنابراین بهترین پتانسیل برای این الکتروود حدود ۵۰۰ ولت می‌باشد.

^۱ Emittance



شکل ۷-۳: واگرایی باریکه‌ی خروجی بر حسب پتانسیل آنتی کاتد. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

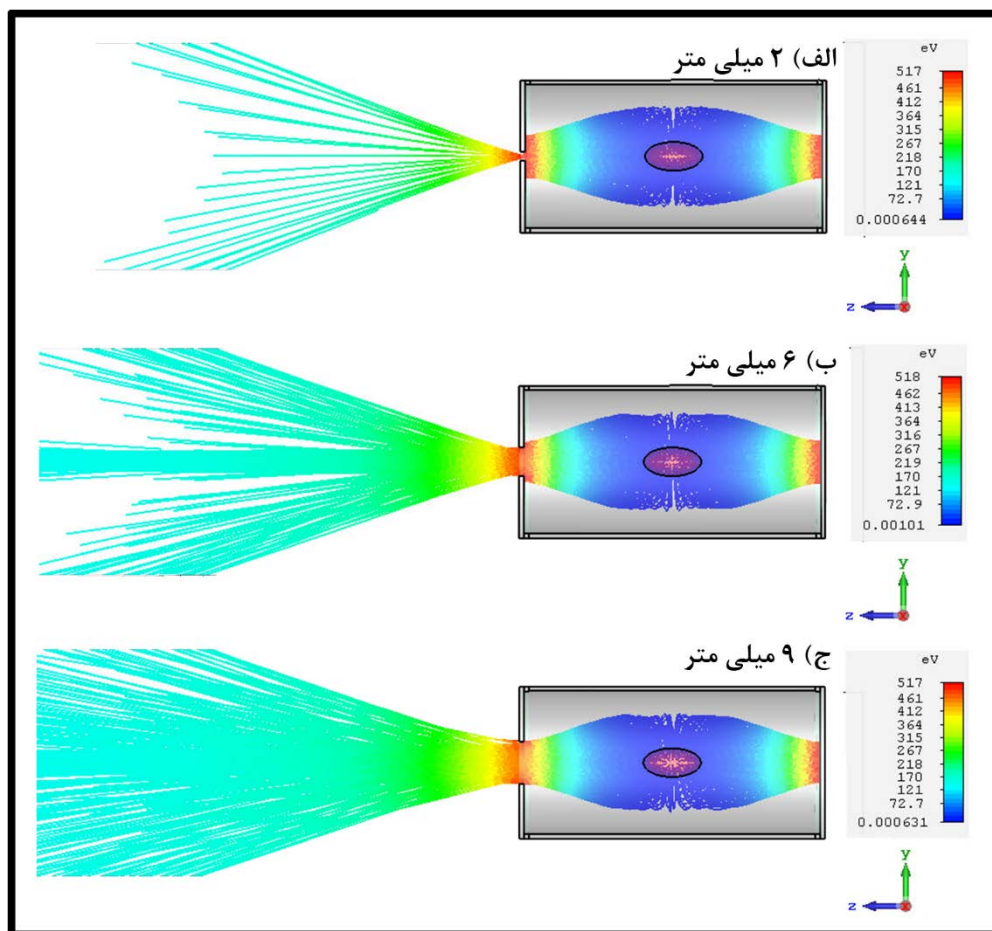
عامل دیگری که مانع از افزایش پتانسیل آنتی کاتد می‌شود، برخورد یون‌ها با این الکتروود است که موجب آسیب دیدن آن می‌شود. برخورد یون‌ها با هر کدام از اجزای چشمه از جمله آنتی کاتد باعث ذخیره‌ی بار الکتریکی روی آن‌ها می‌شود. به عنوان مثال جریانی که به علت برخورد یون‌ها در این الکتروود ایجاد می‌شود و باری که روی آن انباشته می‌شود (یا از طریق این الکتروود تخلیه می‌شود) با افزایش پتانسیل بیشتر می‌شود. شکل ۸-۳ پروفایل باریکه را برای چند پتانسیل مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: باریکه‌ی خروجی از چشمه به ازای اعمال چند پتانسیل مختلف به آنتی کاتد

۳-۲-۳-۲ شعاع روزنه‌ی خروجی

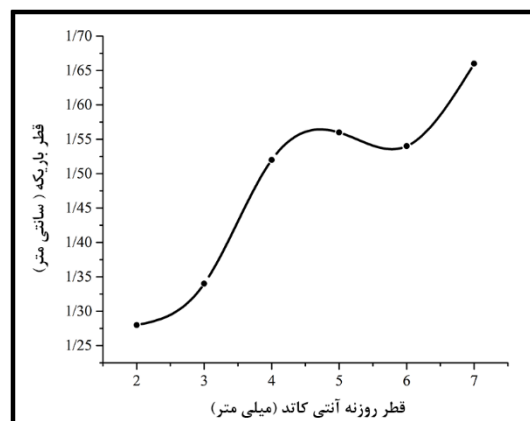
شعاع روزنه‌ی آنتی کاتد، میزان باریکه‌ی خروجی و همین‌طور قطر باریکه را تعیین می‌کند. قطر این روزنه اگر خیلی کوچک باشد مانع خروج یونها و همین‌طور باعث واگرایی شدید باریکه شده و برعکس با افزایش بیش از حد قطر روزنه، گاز و یا پلاسما از آن خارج شده و عملکرد چشمه یونی مختل می‌شود. با در نظر گرفتن پتانسیل ۵۰۰- ولت برای آنتی کاتد اثر تغییر قطر این روزنه بررسی می‌شود. شکل ۳-۹ پروفایل باریکه‌ی خروجی از چشمه را به ازای قطرهای مختلف این روزنه نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹: باریکه‌ی خروجی از سیستم بر حسب قطرهای روزنه‌ی آنتی کاتد

شکل ۳-۱۰ قطر باریکه‌ی خروجی را در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر از آنتی کاتد نشان می‌دهد. مطابق با مطالب ذکر شده در بالا و همین‌طور بررسی شکل ۳-۹ انتخاب قطر ۴ تا ۶ میلی‌متر برای روزنه‌ی خروجی مناسب است، هرچند انتخاب قطر روزنه بستگی به کاربرد و ابعاد چشمه نیز دارد.

با توجه به این مطالب برای ادامه‌ی کار قطر ۶ میلی‌متر برای روزنه‌ی آنتی کاتد انتخاب می‌شود. همان‌طور که در فصل گذشته بیان شد در چشمه‌ی یونی پنینگ از آهنربای دائمی برای محصورسازی یون‌ها درون چشمه استفاده می‌شود. اثر میدان مغناطیسی ناشی از چیدمان‌های مختلف آهنربا در ادامه تشریح می‌شود.



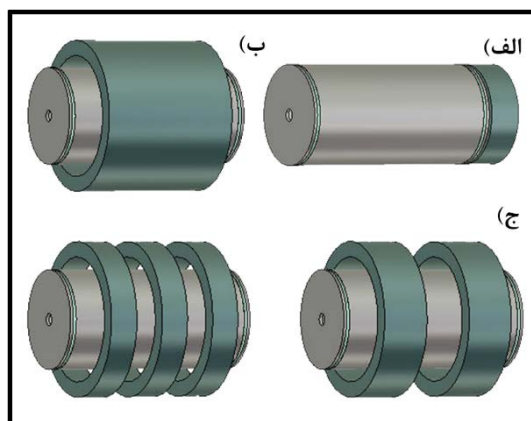
شکل ۳-۱۰: قطر باریکه‌ی خروجی بر حسب قطر روزنه‌ی آنتی کاتد در ۲۰ میلی‌متری از آن. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۳-۳-۲-۳ اثر میدان مغناطیسی بر روی چشمه یونی

همانطور که در فصل اول بیان شد؛ برای تشکیل پلاسما الکترون‌ها با گازهای موجود در چشمه برخورد کرده و باعث ایجاد یونش و شکل‌گیری یون‌ها می‌شود. استفاده از میدان مغناطیسی باعث افزایش مسیر حرکت الکترون‌ها و در نهایت افزایش بازده یونش در چشمه می‌شود. قبل از استفاده از آهنربا، فقط میدان الکتریکی باعث حرکت یون‌ها می‌شود. اما زمانی که آهنربا در چشمه مورد استفاده قرار گیرد، اثر میدان مغناطیسی هم وارد می‌شود. عوامل مختلفی باعث تغییر اثر میدان مغناطیسی بر باریکه‌ی خروجی می‌شوند که در ادامه به آنها اشاره شده است.

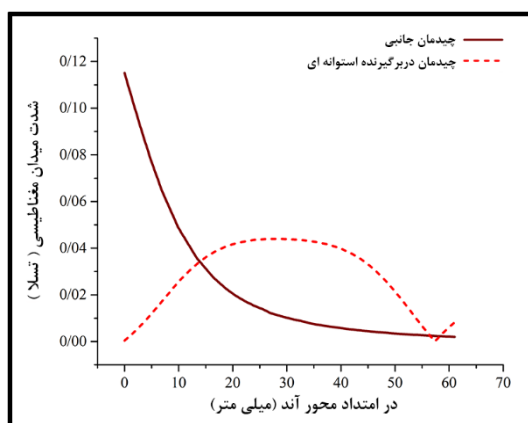
۱-۳-۳-۲-۳ چیدمان آهنرباها

چیدمان آهنرباها در چشمه‌های یونی را می‌توان به دو دسته‌ی ساختارهای جانبی و دربرگیرنده تقسیم کرد. در ساختارهای جانبی آهنرباها در کنار چشمه (پشت چشمه) قرار دارند و در ساختارهای دربرگیرنده آهنرباها اطراف چشمه (دور چشمه) قرار می‌گیرند. شکل ۳-۱۱ سه چیدمان رایج آهنربای دائمی را نشان می‌دهد: الف) چیدمان جانبی (استوانه‌ای توپر)، ب) دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای و ج) دربرگیرنده‌ی حلقه‌ای (دو و سه حلقه‌ای).



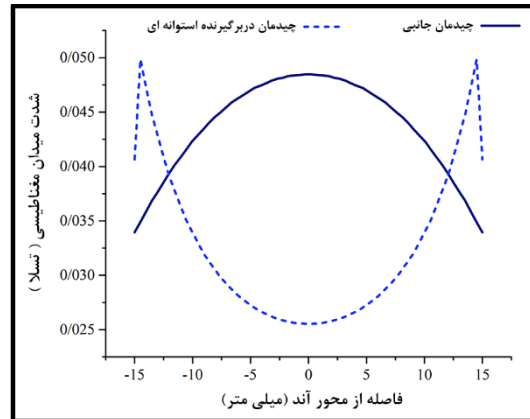
شکل ۳-۱۱: سه چیدمان مختلف آهنربای دائمی اطراف چشمه الف) جانبی، ب) دربرگیرنده استوانه‌ای، ج) دربرگیرنده دو و سه حلقه‌ای

در چیدمان جانبی، شدت میدان مغناطیسی با افزایش فاصله از سطح آهنربا به شدت کاهش می‌یابد، همین امر باعث می‌شود که یونش در بخشی از حجم چشمه صورت گیرد. این چیدمان زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که ابعاد آند محدودیتی روی طراحی چشمه اعمال کند. زمانی که باریکه‌ای با چگالی جریان زیاد مورد نیاز باشد باید بازده یونش بیشتر شود. یکی از راه‌های افزایش بازده این است که یونش در تمام حجم آند صورت گیرد. در چیدمان دربرگیرنده میدان در تمام حجم آند توزیع شده که این امر منجر به افزایش چگالی جریان خروجی از چشمه می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها شدت میدان مغناطیسی هر کدام از آهنرباها نیم تسلا انتخاب شده است. شکل ۳-۱۲ توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محور چشمه را برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای نشان می‌دهد.



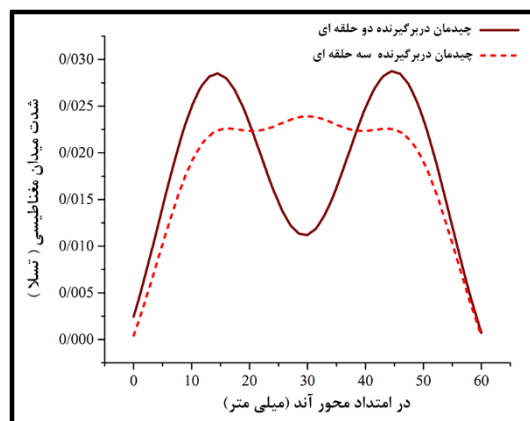
شکل ۳-۱۲: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محور آند برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای

توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



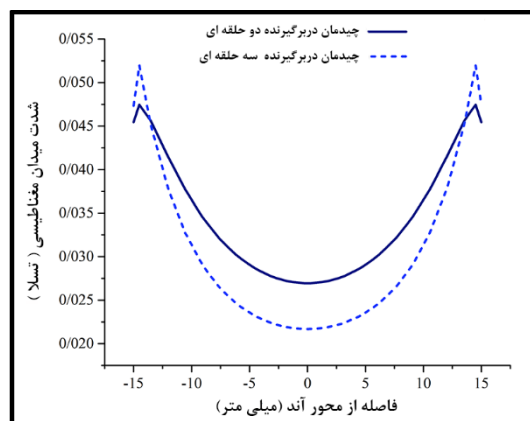
شکل ۳-۱۳: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای

توزیع میدان مغناطیسی محوری در ساختارهای دربرگیرنده را می‌توان با تغییر ساختاری آهنرباها از حالت استوانه‌ای به حلقه‌ای بهبود داد. استفاده از چیدمان حلقه‌ای باعث می‌شود که توزیع میدان مانند آینه‌ی مغناطیسی عمل کرده و الکترون‌هایی که از مکانی با شدت میدان کمتر به مکانی با شدت میدان بیشتر می‌روند، مولفه‌ی محوری سرعت آن‌ها صفر شده و منعکس می‌شوند، این رفت و آمد باعث نگهداری الکترون‌ها درون چشمه و افزایش مسیر حرکت آن‌ها شده، به این ترتیب موجب افزایش بازده یونش می‌شود. شکل ۳-۱۴ توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محور آند را برای ساختارهای دربرگیرنده حلقه‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴: شدت میدان مغناطیسی روی محور آند برای دو چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای دو و سه حلقه‌ای

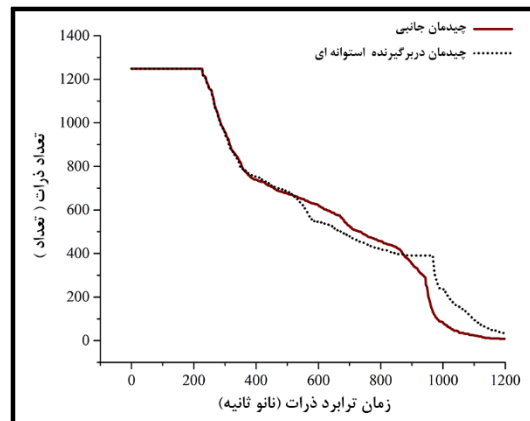
توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو ساختار دربرگیرنده‌ی حلقه‌ای مشابه یکدیگر است. شکل ۳-۱۵ توزیع میدان مغناطیسی شعاعی را برای این دو ساختار نشان می‌دهد. از آنجایی که طول آهنرباها در چیدمان سه حلقه‌ای کمتر از دو حلقه‌ای است، میدان مغناطیسی شعاعی در سیستم سه حلقه‌ای هم کمتر می‌باشد.



شکل ۳-۱۵: توزیع میدان مغناطیسی در امتداد شعاعی برای دو چیدمان دربرگیرنده دو و سه حلقه‌ای

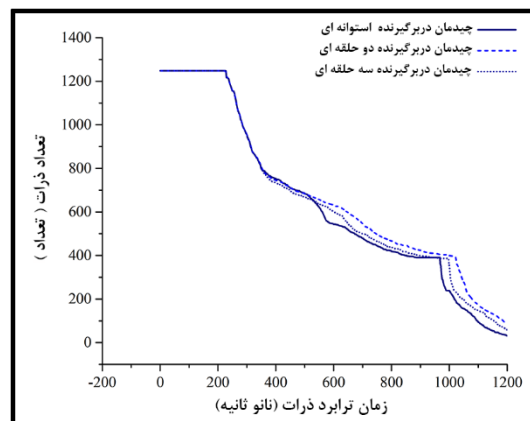
یکی دیگر از پارامترهای مهم چشمه گیراندازی الکترون‌ها درون چشمه است. اساس تخلیه پنینگ در گیراندازی الکترون داخل چشمه است، هر چه الکترون‌ها بیشتر داخل چشمه بمانند بازده یونش بیشتر می‌شود. در این بخش گیراندازی یون‌ها و الکترون‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳-۱۶ تعداد یون‌های گیراندازی شده داخل چشمه را با گذشت زمان در دو ساختار جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای

نشان می‌دهد. طبق این شکل ساختار دربرگیرنده با گذشت زمان یون‌های بیشتری را داخل چشمه گیراندازی می‌کند.



شکل ۳-۱۶: تعداد یون‌های درون چشمه برای دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده استوانه‌ای

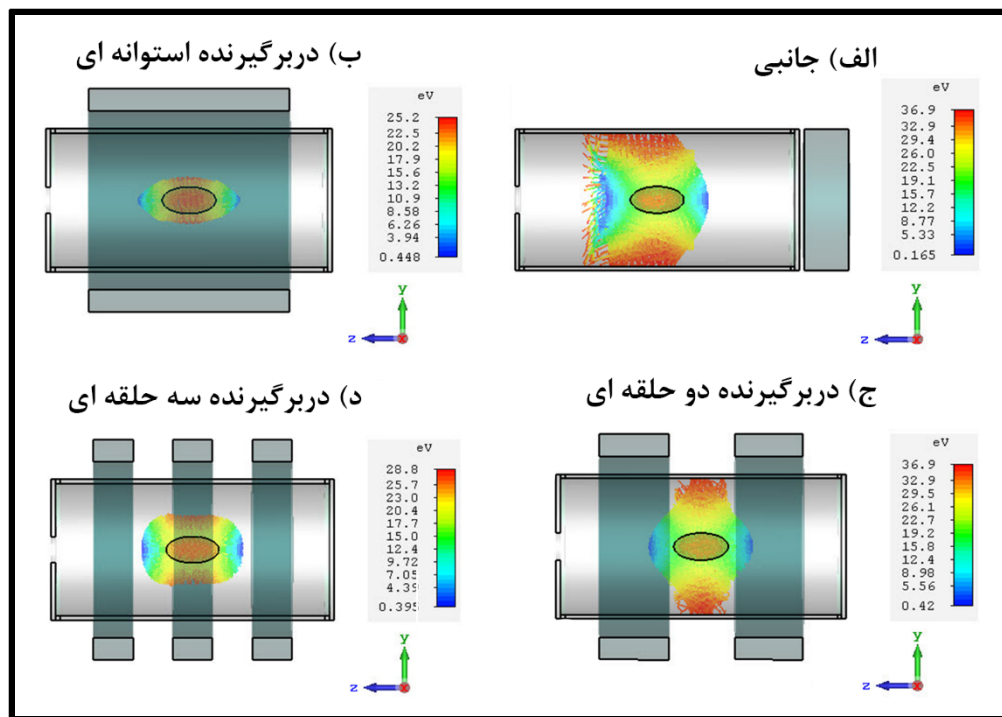
ایجاد آینه‌ی مغناطیسی، گیراندازی ذرات (الکترون‌ها و یون‌ها) درون چشمه را بیشتر می‌کند، بنابراین این پارامتر نیز با استفاده از چیدمان حلقه‌ای بیشتر می‌شود. شکل ۳-۱۷ گیراندازی یون‌ها را با گذشت زمان برای ساختارهای دربرگیرنده نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷: تعداد یون‌های درون چشمه برای دو چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای دو و سه حلقه‌ای

اما مسئله‌ی اصلی محصورسازی و تراپرد الکترون درون چشمه است. با توجه به اینکه جرم الکترون بسیار کمتر از جرم یون است و میدان مغناطیسی نیم تسلا (که اعمال آن در چشمه‌ها متداول است) تراپرد الکترون‌ها را به خوبی نشان نمی‌دهد، صرفاً برای نمایش اثر چیدمان آهنرباها بر چشمه، میدان

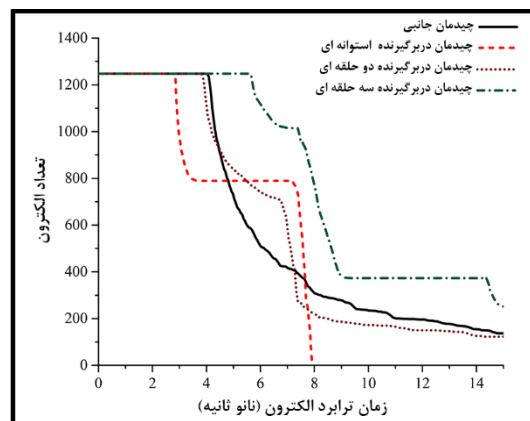
مغناطیسی آهنرباها به یک‌صدم تسلا کاهش پیدا کرده است. شکل ۳-۱۸ محیط حرکت الکترون‌ها را درون چشمه نشان می‌دهد. طبق این شکل و با توجه به این مطلب که برخورد الکترون‌ها با هرکدام از اجزای چشمه (اتاقک یونش) باعث آسیب به آن قطعات و همین‌طور به منبع تغذیه می‌شود، دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده‌ی دو حلقه‌ای به علت برخورد الکترون‌ها با آند مناسب نیستند. چیدمان‌های دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای و سه حلقه‌ای توزیع مناسبی از الکترون‌ها را ایجاد می‌کنند. بین این دو چیدمان میزان محصورسازی الکترون‌ها در چیدمان دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای بیشتر است بنابراین شعاع چرخش الکترون کمتر و بازده یونش نیز کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه چیدمان دربرگیرنده‌ی سه حلقه‌ای از این جهت برای محصورسازی الکترون‌ها مناسب‌تر است.



شکل ۳-۱۸: توزیع الکترون در چیدمان‌های مختلف آهنرباهای دائمی

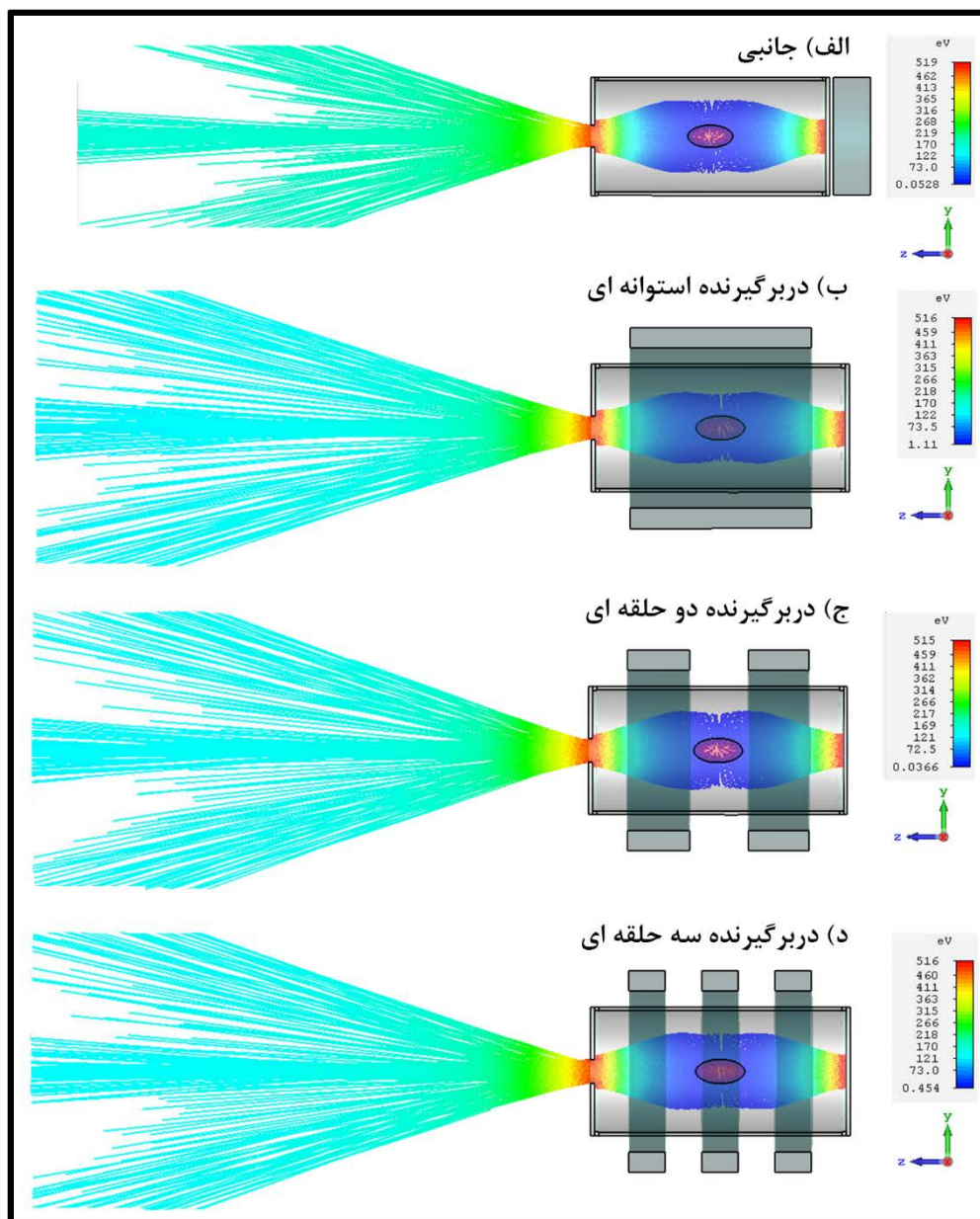
مطلب فوق از طریق شکل ۳-۱۹ نیز قابل تفسیر است. شکل ۳-۱۹ تراورد تعداد یکسانی الکترون را در چیدمان‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل گیراندازی الکترون در چیدمان دربرگیرنده‌ی استوانه‌ای کمتر از چیدمان‌های دیگر است. با توجه به مطالب بالا چیدمان دربرگیرنده‌ی سه حلقه‌ای

مناسب‌ترین چیدمان برای ایجاد محصورسازی در چشمه است و از این مرحله به بعد شبیه‌سازی‌ها با این چیدمان انجام می‌شود. لازم به ذکر است که علت کاهش الکترون‌ها با گذشت زمان برخورد آنها با سطح تابنده و حذف آنها می‌باشد.



شکل ۳-۱۹: تعداد الکترون‌های موجود در چشمه با گذشت زمان برای چیدمان‌های مختلف آهنربا

با بررسی چگالی جریان خروجی از چشمه برای چیدمان‌های مختلف نیز بیشینه مقدار متعلق به چیدمان دربرگیرنده سه حلقه‌ای است. بدیهی است که تعداد یون‌هایی که به آنتی کاتد برخورد می‌کنند هم کمتر شود. شکل ۳-۲۰ رفتار باریکه‌ی یونی خروجی از چشمه در چهار چیدمان نامبرده نشان می‌دهد.

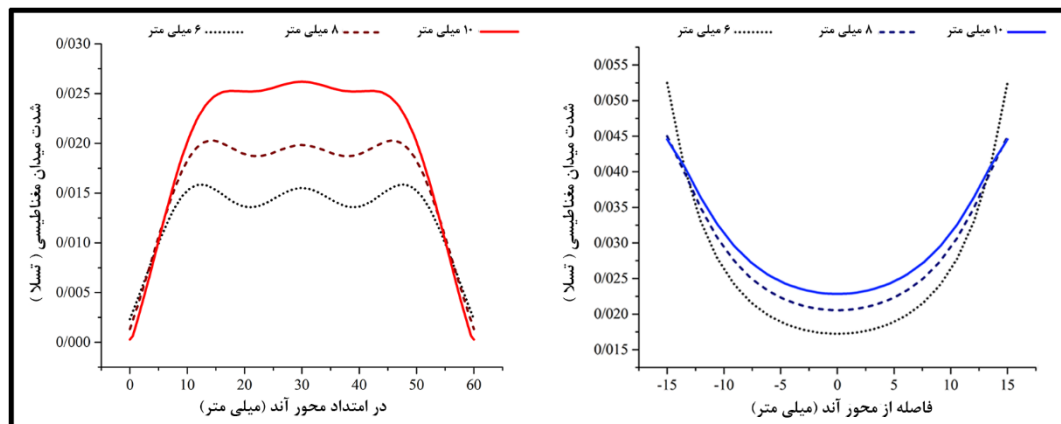


شکل ۳-۲۰: باریکه‌ی خروجی از چشمه برای چیدمان‌های مختلف آهنربای دائمی

۲-۳-۳-۲-۳ طول آهنرباها

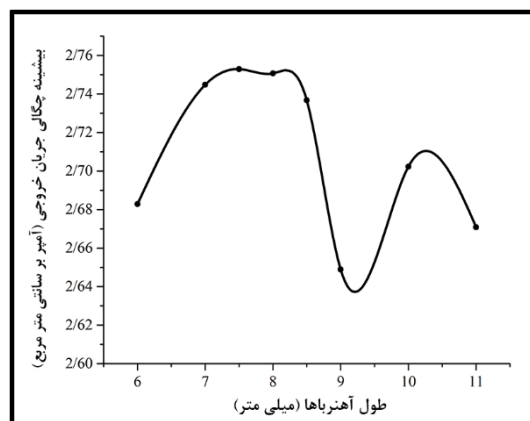
برای بررسی اثر تغییر طول آهنرباها بر محصورسازی یون‌ها و تعیین بهینه طول برای آهنرباها شدت میدان مغناطیسی آهنرباها ثابت و نیم تسلا انتخاب شده است. انتخاب این شدت میدان مغناطیسی برای آهنرباها متداول است. شکل ۳-۲۱ توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محوری و شعاعی را به ازای طول‌های مختلف نشان می‌دهد. این شکل حکایت از افزایش شدت میدان مغناطیسی در

امتداد محوری با افزایش طول آهنرباها دارد. خاطرنشان می‌شود افزایش شدت میدان مغناطیسی همیشه برای چشمه‌ی پنینگ مناسب نیست، به نحویکه پارامترهای دیگری شامل بیشینه چگالی جریان خروجی، زمان ترابرد یون‌ها و جریان ایجاد شده در آنتی‌کاتد نیز در خروجی چشمه یونی حائز اهمیت می‌باشند که در ادامه این عوامل مورد بررسی قرار گرفته است.



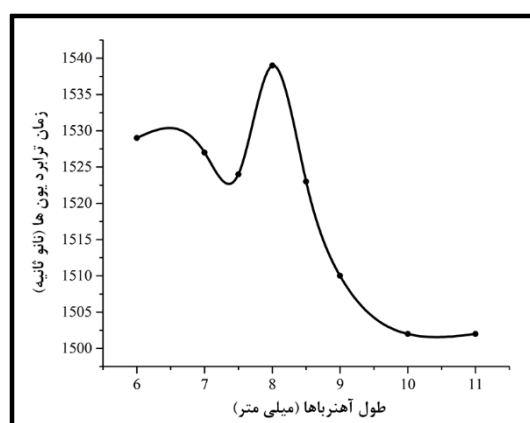
شکل ۳-۲۱: شدت میدان مغناطیسی محوری و شعاعی برای سه طول مختلف آهنربای دائمی

شکل ۳-۲۲: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب طول‌های مختلف آهنرباها را نشان می‌دهد. طبق این شکل چگالی جریان خروجی با افزایش طول آهنربا رفتار یکنواختی از خود نشان نمی‌دهد و بیشترین چگالی جریان خروجی به ازای طول‌های ۷ تا ۸ میلی‌متری آهنربا می‌باشد. علت کاهش چگالی جریان برای طول‌های بیش از ۸ میلی‌متر نیز به اثر آینه‌ی مغناطیسی درون اتاقک یونش برمی‌گردد که مانع از خروج یون‌ها می‌شود.



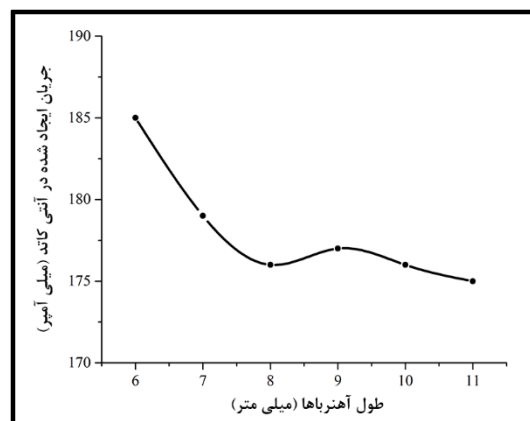
شکل ۳-۲۲: بیشینه چگالی جریان باریکه‌ی خروجی از چشمه بر حسب طول آهنرباها. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

گیراندازی یون‌ها عامل مهمی در چشمه‌ی یونی پنینگ می‌باشد. شکل ۳-۲۳ زمان ترابرد تعداد یکسانی از یون‌ها را بر حسب طول‌های مختلف آهنرباها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل نیز بهترین طول برای آهنرباها همان ۸ میلی‌متر می‌باشد، در این طول زمان ترابرد یون‌ها بیشتر است بنابراین گیراندازی آنها بهتر صورت می‌گیرد.

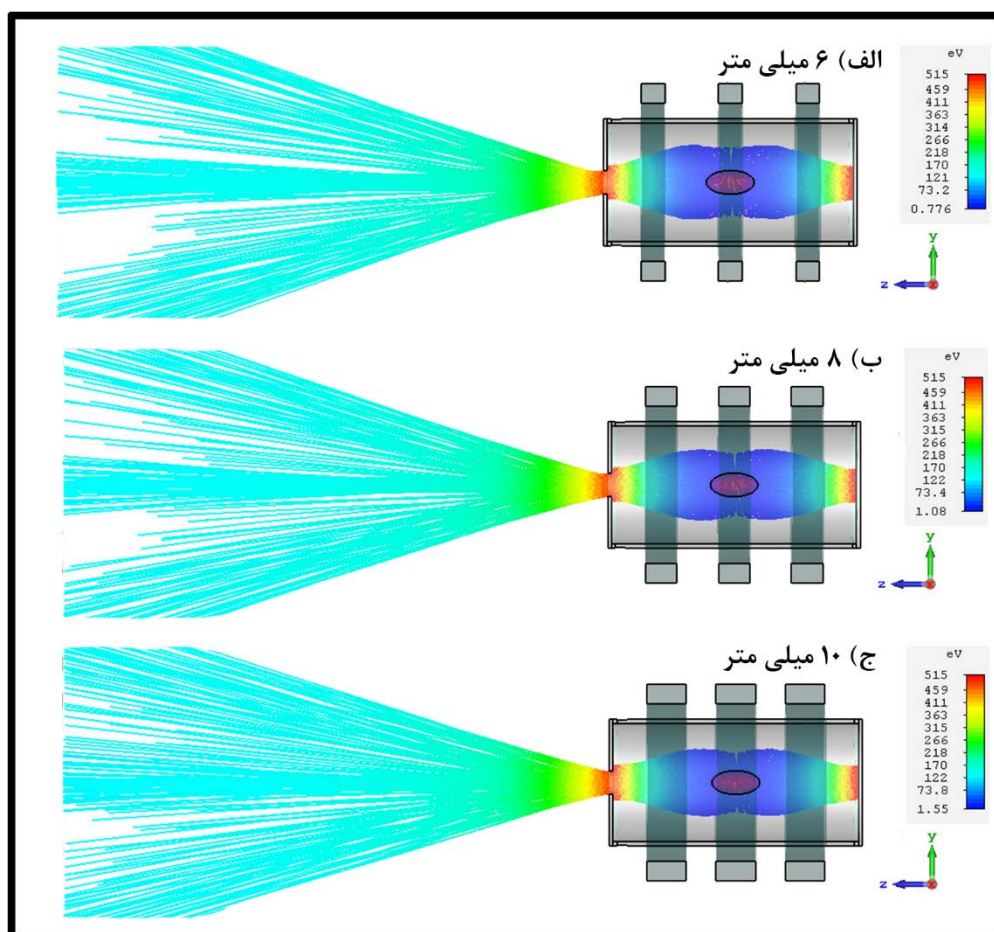


شکل ۳-۲۳: زمان ترابرد یون‌ها بر حسب طول آهنرباها. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

شکل ۳-۲۴ جریان ایجاد شده در آنتی‌کاتد بواسطه‌ی برخورد یون‌ها بر حسب افزایش طول آهنرباها را نشان می‌دهد. طبق این شکل جریان ایجاد شده در آنتی‌کاتد برای آهنرباها با طول ۸ میلی‌متر کمتر است هر چند مقادیر تفاوت چندانی با هم ندارد. شکل ۳-۲۵ پروفایل باریکه‌ی خروجی از چشمه را برای چند طول مختلف آهنرباها نشان می‌دهد.



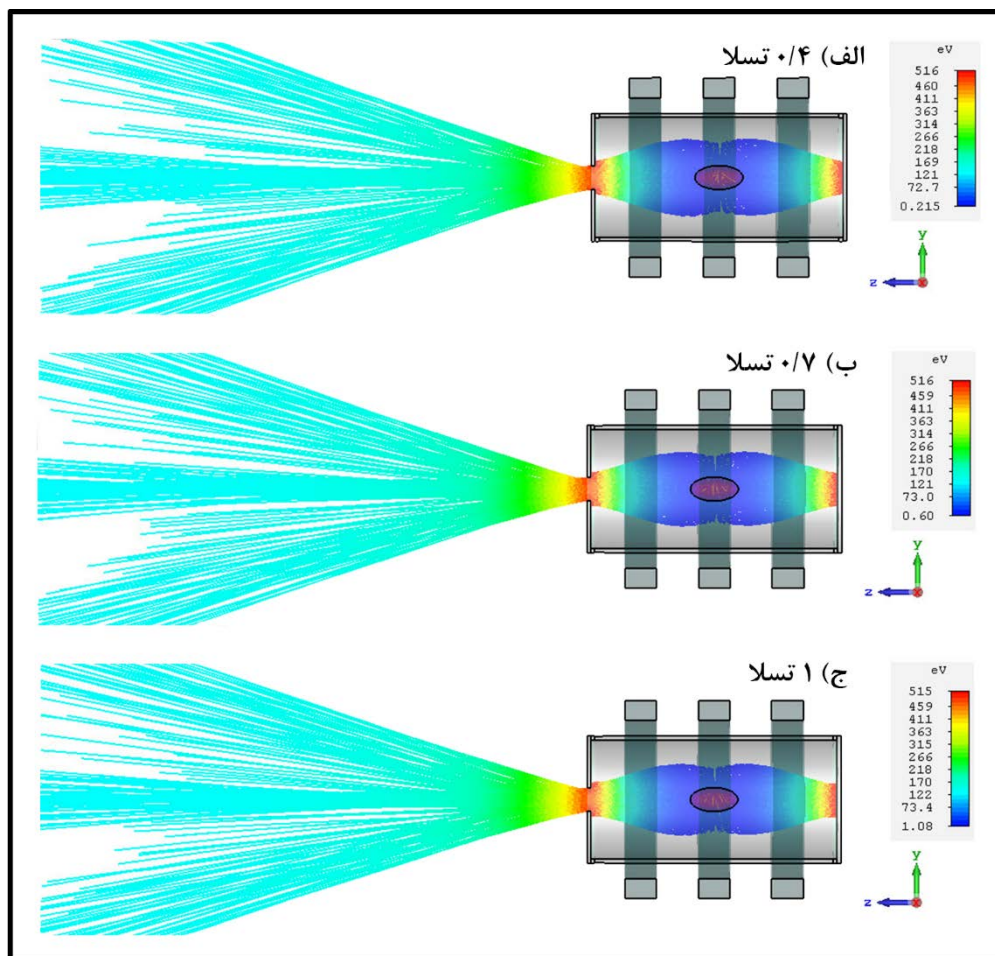
شکل ۳-۲۴: جریان ایجاد شده در آنتی کاتد بر حسب طول آهنرباها. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.



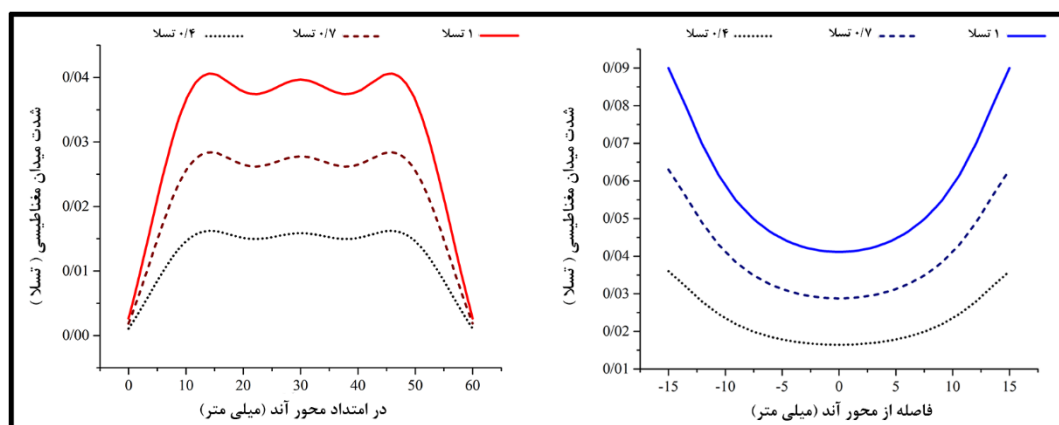
شکل ۳-۲۵: باریک‌های خروجی از چشمه برای چند طول مختلف آهنرباها

۳-۳-۳-۲-۳ شدت میدان مغناطیسی آهنربا

با در نظر گرفتن طول ۸ میلی متری برای آهنرباها، بهینه شدت میدان آنها بررسی می شود. شدت میدان مغناطیسی را می توان مهمترین عامل در محصورسازی پلاسما در چشمه ی پنینگ بیان کرد. شکل ۳-۲۶ باریکه ی خروجی از چشمه را به ازای چند شدت مختلف نشان می دهد. رنگ کانتورها در شکل بر حسب انرژی است. در چشمه ی پلاسما هر چه شدت میدان مغناطیسی بیشتر باشد، محصورسازی ذرات بیشتر است. طبق این شکل هر چه شدت میدان آهنرباها بیشتر می شود یون های درون چشمه کمتر باز می شوند. به عبارت دیگر با افزایش شدت آهنرباها شعاع چرخش یون ها درون چشمه کمتر می شود. شکل ۳-۲۷ توزیع میدان مغناطیسی محوری و شعاعی را به ازای چند شدت مختلف نشان می دهد.

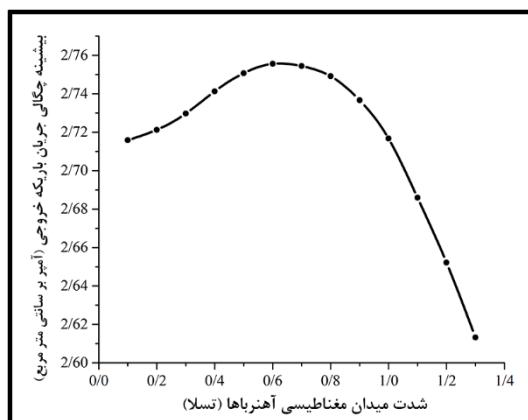


شکل ۳-۲۶: باریک‌های خروجی از چشمه در شدت‌های مختلف آهنرباها



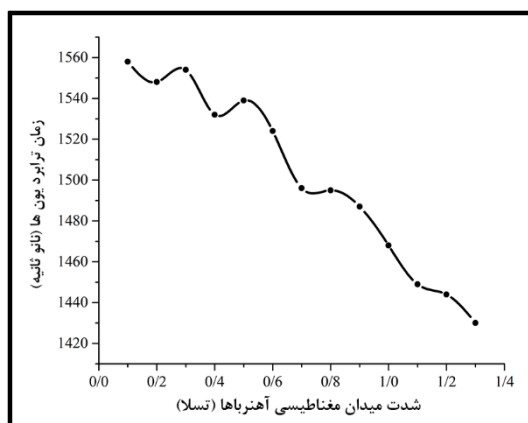
با تغییر شدت آهنرباها و بررسی پارامترهای معین بهترین شدت میدان مغناطیسی بررسی می‌شود. شکل ۳-۲۸ بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه را نشان می‌دهد. طبق این شکل مناسب‌ترین

شدت اعمالی به آهنرباها حدود ۰/۷ تسلا می باشد.



شکل ۲۸-۳: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب شدت میدان آهنرباها. خطوط بین نقاط از درون یابی به روش Spline بدست آمده اند.

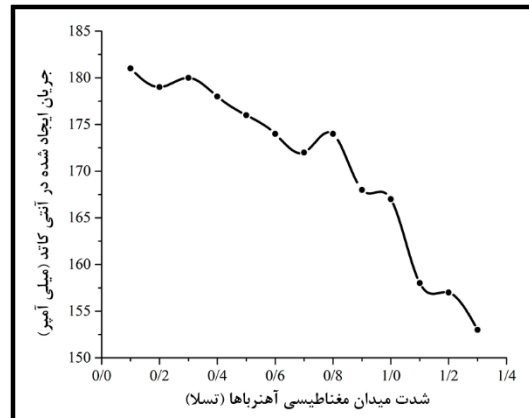
زمان ترابرد یون ها در چشمه با افزایش شدت میدان کاهش پیدا می کند، بنابراین تعداد برخورد های یون ها با آنتی کاتد هم کاهش پیدا می کند. شکل ۲۹-۳ زمان ترابرد تعداد مشخصی یون ها را با تغییر شدت آهنرباها نشان می دهد. هر چه زمان ترابرد آنها کاهش پیدا بکند سریع تر از چشمه خارج شده و گیراندازی آنها در چشمه کاهش می یابد.



شکل ۲۹-۳: زمان ترابرد تعداد یکسان یون بر حسب شدت میدان آهنرباها. خطوط بین نقاط از درون یابی به روش Spline بدست آمده اند.

جریان ایجاد شده در آنتی کاتد با افزایش شدت آهنربا کاهش می یابد. شکل ۳۰-۳ جریان ایجاد شده در آنتی کاتد را بر حسب تغییر شدت آهنرباها نشان می دهد. از آنجایی که کمینه شدت میدان

مغناطیسی مورد نیاز روی محور چشمه برای ایجاد یونش ۳۰۰ گاوس است، بنابراین بهترین شدت آهنرباها ۰/۷ تسلا می‌باشد. با توجه به این نکته، محاسبات بعدی با آهنرباهایی با این شدت انجام می‌شود.



شکل ۳-۳: جریان ایجاد شده در آنتی کاند بر حسب شدت میدان آهنرباها. خطوط بین نقاط از درون یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۴-۲-۳ سیستم استخراج

رایج‌ترین سیستم‌های استخراج در چشمه های یونی، سیستم‌های دو الکترودی (دیودی) و سه الکترودی (تریودی) هستند. سیستم استخراج دیودی شامل الکترودهای پلاسما (آنتی کاند) و استخراج (شتابدهنده) می‌باشد. در سیستم استخراج تریودی یک الکتروود کندکننده هم به سیستم اضافه می‌شود. الکتروود کندکننده در پتانسیل کمتری نسبت به الکتروود شتابدهنده قرار دارد. میدانی که بین این دو الکتروود شکل می‌گیرد باعث کاهش سرعت و کاهش شدت نشر^۱ ذرات می‌شود به همین دلیل این سیستم را شتابدهنده - کندکننده نیز می‌نامند.

۱-۴-۲-۳ سیستم دو الکترودی

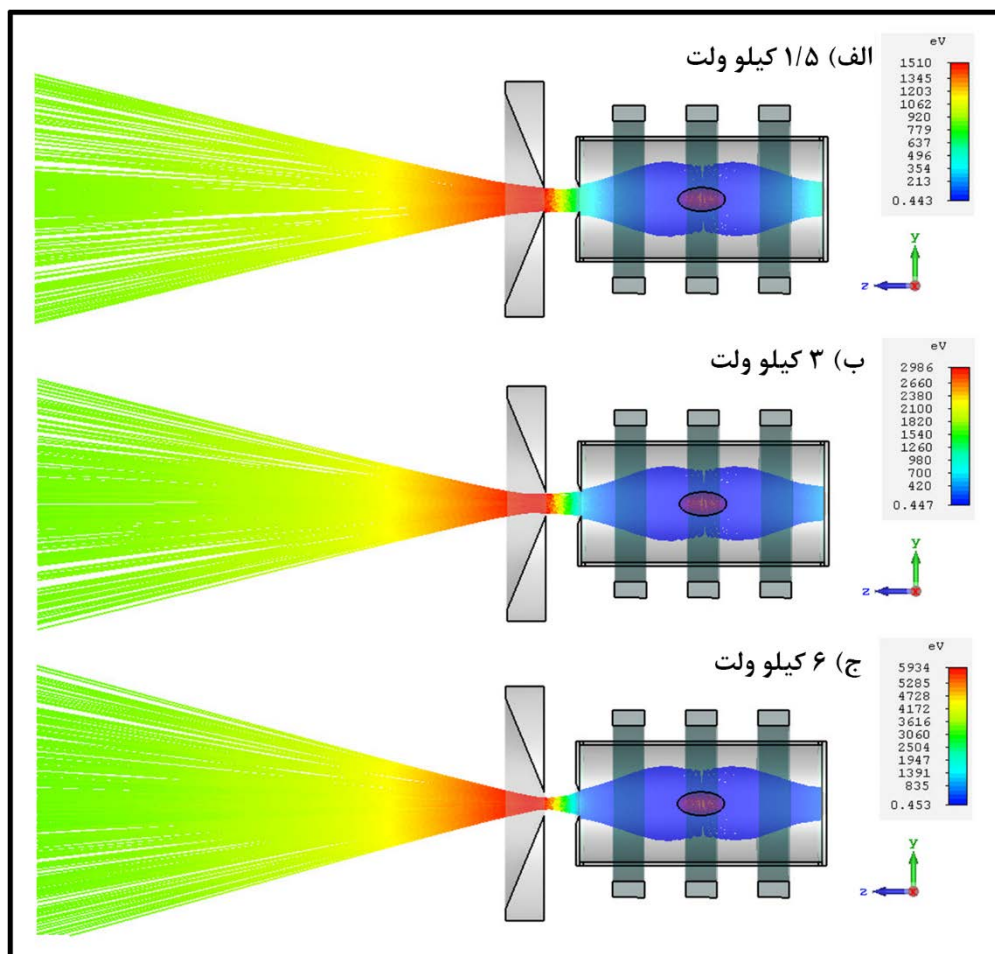
به منظور استخراج باریکه، الکترودی بعد از آنتی کاند قرار می‌دهند. در این راستا بررسی عوامل

^۱ Emittance

موثر برای رسیدن به شرایط بهینه باریکه‌ی خروجی (به ازای الکتروود اضافه شده به سیستم) برای ما اهمیت دارد. این عوامل عبارتند از: پتانسیل الکتروود استخراج، زاویه‌ی الکتروود استخراج، فاصله‌ی الکتروود استخراج از آنتی‌کاتد و در نهایت طول الکتروود که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۲-۴-۱- پتانسیل الکتروود استخراج

برای بررسی اثر تغییر پتانسیل الکتروود استخراج بر باریکه‌ی خروجی، پارامترهای دیگر مثل زاویه‌ی این الکتروود و فاصله‌ی آن از آنتی‌کاتد را ثابت نگه‌داشته و مقادیر نوعی آنها به ترتیب ۶۷/۵ درجه و ۸ میلی‌متر انتخاب شده است. شکل ۳-۳۱ پروفایل باریکه‌ی خروجی از سیستم استخراج را به ازای چند پتانسیل مختلف برای الکتروود استخراج نشان می‌دهد. طبق این شکل هر چه پتانسیل این الکتروود افزایش پیدا کند، انرژی باریکه‌ی خروجی بیشتر و قطر آن در دهانه‌ی ورودی الکتروود کاهش می‌یابد.



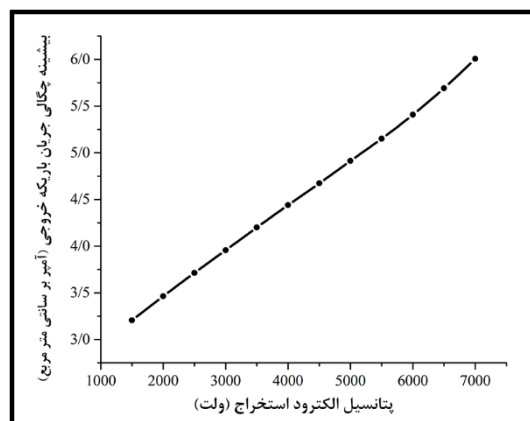
شکل ۳-۳۱: باریکه خروجی از سیستم استخراج در پتانسیل‌های الف) ۱/۵، ب) ۳ و ج) ۶ کیلوولتی

با افزایش پتانسیل الکتروود استخراج بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۳-۳۲: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه را بر حسب پتانسیل الکتروود استخراج نشان

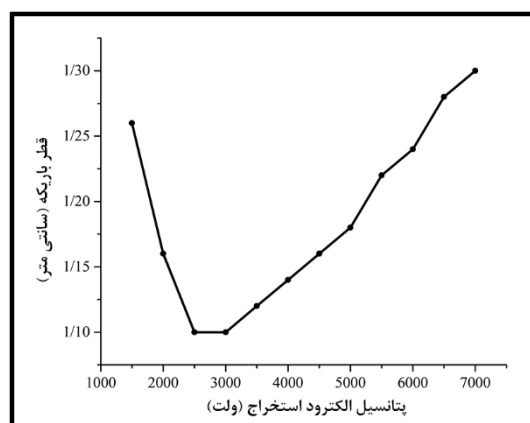
می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای تغییر پتانسیل استخراج از ۱۵۰۰- ولت تا ۷۰۰۰- ولت

بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه به طور مستقیم افزایش پیدا کرده است.



شکل ۳-۳۲: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب پتانسیل الکتروود استخراج. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

قطر باریکه یکی از فاکتورهای مهم باریکه خروجی از چشمه است. هر چه قطر باریکه بیشتر بشود، پراکندگی یون‌ها بیشتر شده و این موجب کاهش انرژی باریکه در برخورد با هدف می‌شود. شکل ۳-۳۳ قطر باریکه را بر حسب پتانسیل الکتروود شتاب‌دهنده در فاصله‌ی ده میلی‌متری بعد از آن نشان می‌دهد.

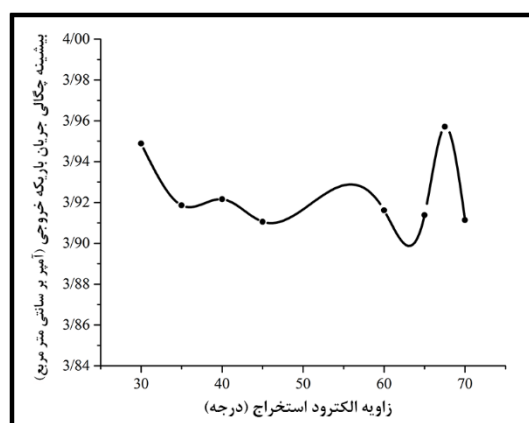


شکل ۳-۳۳: قطر باریکه‌ی خروجی از الکتروود استخراج بر حسب پتانسیل در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری این الکتروود. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

با این هندسه مشخص و طبق این شکل بهترین پتانسیل برای این الکتروود ۳ کیلو ولت می‌باشد. بنابراین بررسی‌های بعدی بر روی این الکتروود با این پتانسیل انجام می‌شود.

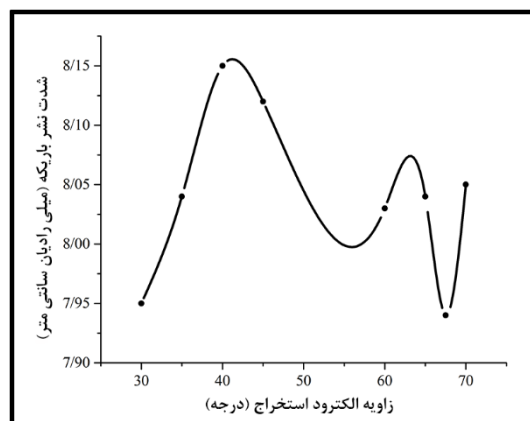
۲-۳-۲-۱-۴ زاویه‌ی الکتروود استخراج

پس از انتخاب ولتاژ استخراج ۳ کیلوولتی برای الکتروود استخراج، به بررسی اثر زاویه‌ی این الکتروود روی باریکه‌ی خروجی می‌پردازیم. با تغییر زاویه الکتروود، مقدار چگالی جریان و شکل باریکه‌ی خروجی تغییر می‌کند. شکل ۳-۳۴ بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه را به ازای زاویه‌های مختلف الکتروود نشان می‌دهد. طبق این شکل زاویه‌ی ۶۷/۵ درجه، که به زاویه پیرس^۱ نیز معروف است، بهترین زاویه برای این الکتروود می‌باشد. شکل ۳-۳۵ نیز شدت نشر باریکه به ازای زاویه‌های مختلف الکتروود شتابدهنده را نشان می‌دهد. طبق این شکل شدت نشر باریکه زمانی که زاویه‌ی الکتروود ۶۷/۵ درجه است، کمترین مقدار را دارد.



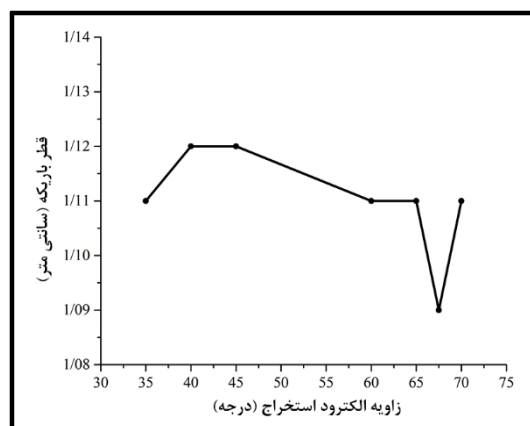
شکل ۳-۳۴: چگالی جریان خروجی بر حسب زاویه‌ی الکتروود استخراج. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

¹ Pierce angle



شکل ۳-۳۵: شدت نشر باریکه خروجی بر حسب زاویه‌ی الکتروود استخراج. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

پارامتر بعدی که مورد بررسی قرار گرفته قطر باریکه است. شکل ۳-۳۶ قطر باریکه خروجی از این الکتروود را به ازای زاویه‌های مختلف در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری از آن نشان می‌دهد. طبق این شکل زمانی که لبه‌ی الکتروود شتاب‌دهنده زاویه‌ی ۶۷/۵ درجه دارد باریکه قطر کمتری خواهد داشت. بنابراین مناسب‌ترین زاویه برای الکتروود شتاب‌دهنده ۶۷/۵ درجه است. با توجه به مطالب ذکر شده در بالا از این به بعد محاسبات با این زاویه انجام می‌شود.

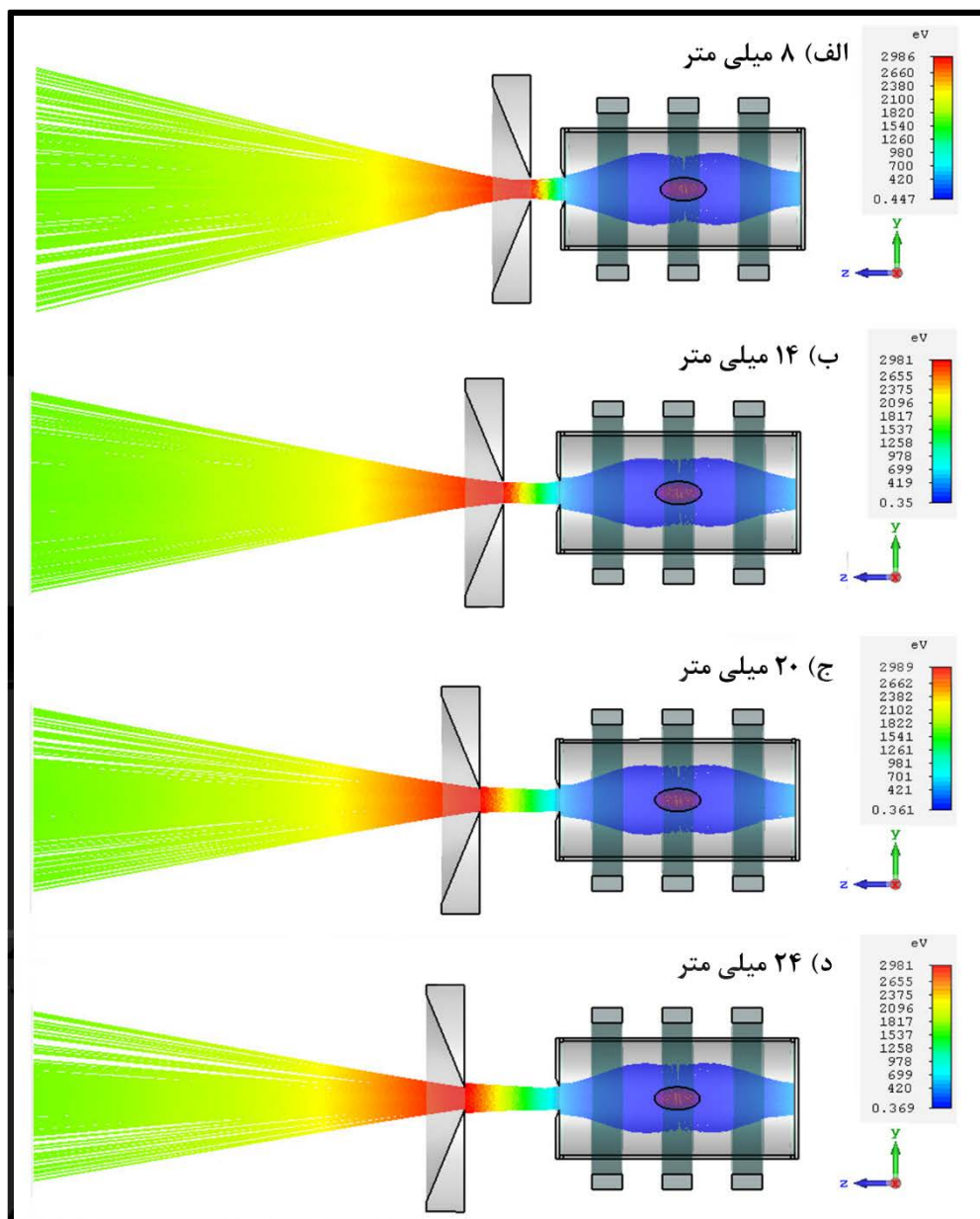


شکل ۳-۳۶: قطر باریکه‌ی خروجی بر حسب زاویه‌ی الکتروود استخراج. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

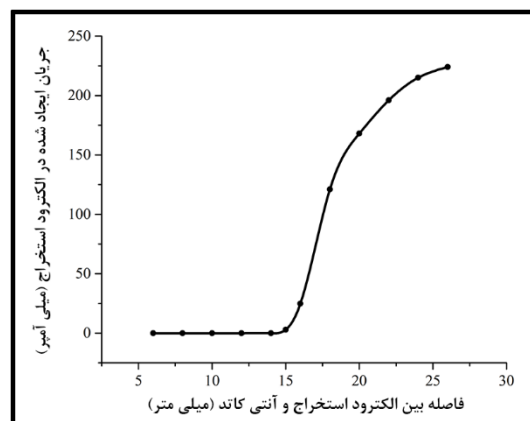
۳-۱-۴-۲-۳ فاصله‌ی الکتروود استخراج از آنتی کاتد

با در نظر گرفتن پتانسیل ۳ کیلوولتی و زاویه‌ی ۶۷/۵ درجه برای الکتروود استخراج، در گام بعد

فاصله‌ی بهینه بین این الکتروود و آنتی کاتد مورد بررسی قرار می‌گیرد. پروفایل باریکه خروجی به ازای فاصله‌های مختلف این الکتروود از آنتی کاتد در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است. گستره‌ی انرژی باریکه در کنار هر قسمت از این شکل نشان داده شده است. طبق این شکل افزایش فاصله ممکن است منجر به برخورد باریکه خروجی به الکتروود استخراج شود. این اثر در شکل ۳-۳۸ مورد بررسی قرار گرفته است، همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود افزایش فاصله بین این دو الکتروود از ۱۴ میلی‌متر به بعد موجب برخورد باریکه به این الکتروود و در نهایت از دست رفتن بخشی از باریکه می‌شود.

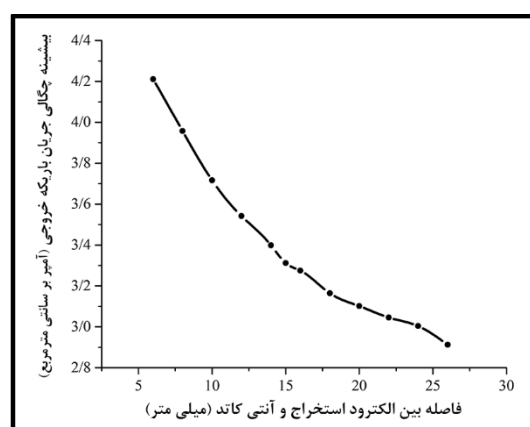


شکل ۳-۳۷: باریکه‌ی خروجی بر حسب چند فاصله‌ی مختلف الکتروود استخراج از آنتی کاتد



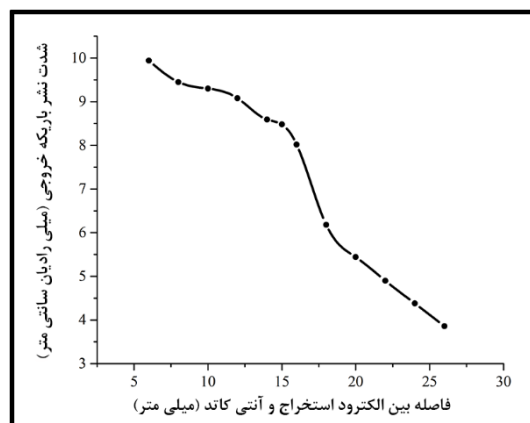
شکل ۳-۳۸: جریان ایجاد شده در الکترود استخراج بر حسب فاصله‌اش از آنتی کاتد. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

با افزایش فاصله‌ی الکترود شتاب‌دهنده از آنتی کاتد بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه کاهش پیدا می‌کند. شکل ۳-۳۹: بیشینه چگالی جریان برای باریکه‌ی خروجی از چشمه را بر حسب فاصله‌های مختلف الکترود استخراج از آنتی کاتد نشان می‌دهد.

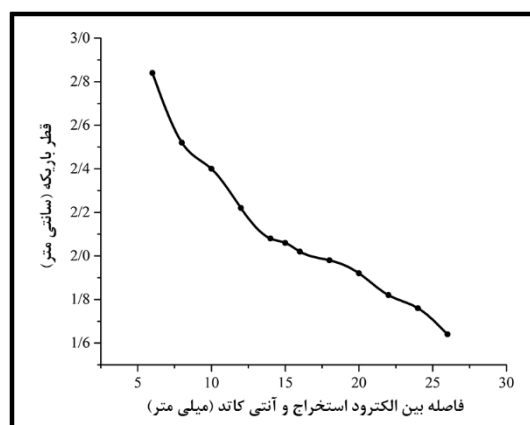


شکل ۳-۳۹: بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه بر حسب فاصله‌ی الکترود استخراج از آنتی کاتد. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

شدت نشر و قطر باریکه، دو پارامتر مهم در بررسی باریکه‌ی خروجی از سیستم استخراج، نیز با افزایش فاصله الکترود استخراج از آنتی کاتد نسبت عکس دارند. شکل ۳-۴۰ و شکل ۳-۴۱ به ترتیب شدت نشر و قطر باریکه را بر حسب فاصله نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: شدت نشر باریکه‌ی خروجی بر حسب فاصله‌ی الکترود استخراج از آنتی کاتد. خطوط بین نقاط از درون-یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.



شکل ۳-۴۱: قطر باریکه‌ی خروجی بر حسب فاصله‌ی الکترود استخراج از آنتی کاتد در فاصله‌ی ۴ سانتی متری از الکترود استخراج. خطوط بین نقاط از درون-یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

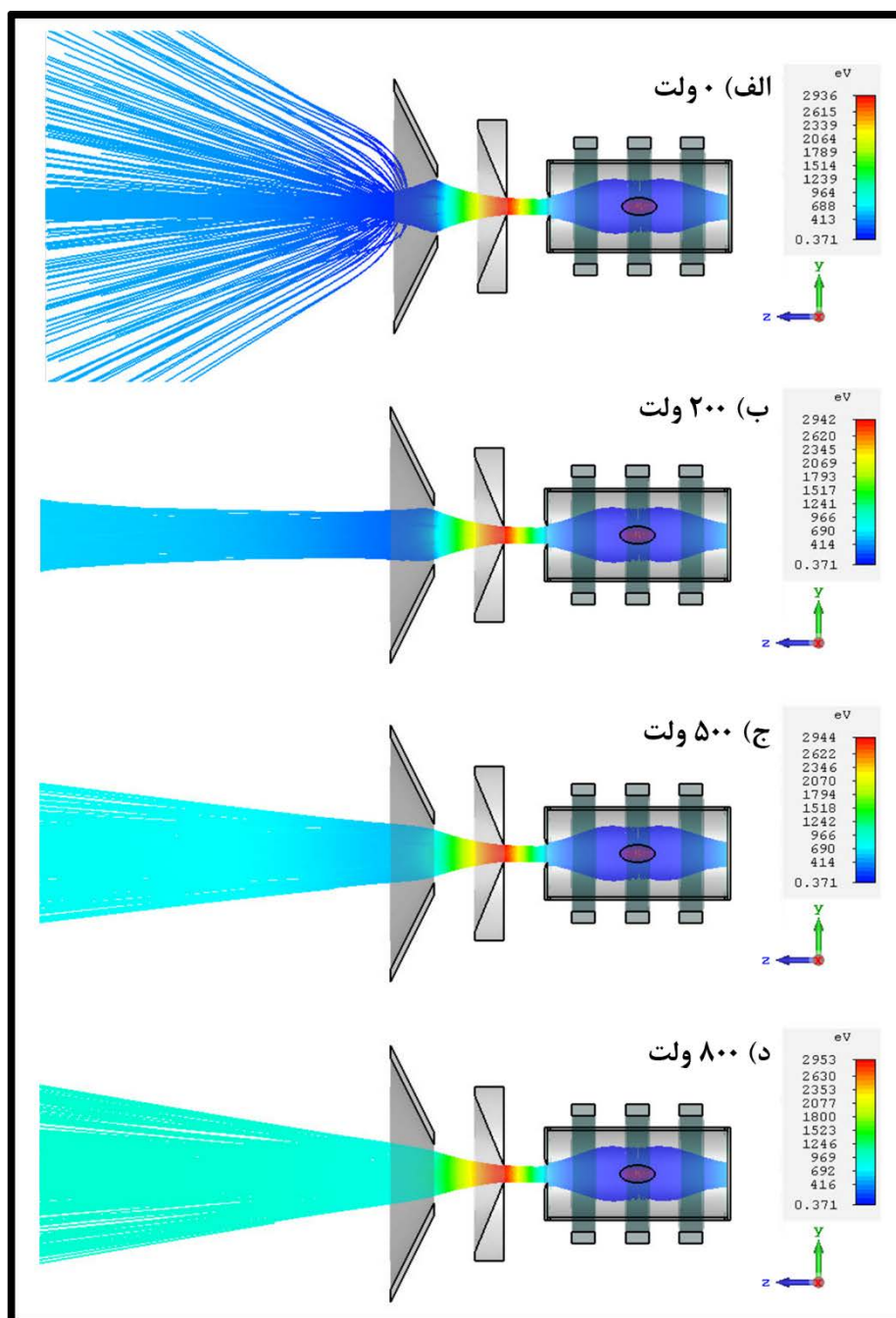
علت کاهش قطر و شدت نشر باریکه از ۱۴ میلی متر به بعد به برخورد باریکه به الکترود استخراج و کاهش باریکه‌ی خروجی برمی گردد. از آنجایی که از فاصله‌ی ۱۴ میلی متری به بعد یون‌های خروجی با این الکترود برخورد دارند و این برخوردها با افزایش فاصله بیشتر می شود و اینکه شدت نشر و قطر باریکه با افزایش فاصله‌ی الکترود استخراج از آنتی کاتد کاهش پیدا می کنند (از ۵ تا ۱۴ میلی متر)، فاصله‌ی بهینه بین این الکترود و آنتی کاتد همان ۱۴ میلی متر انتخاب شده است.

۳-۲-۴-۲ سیستم سه الکترودی

سیستم استخراج تریودی با داشتن الکترود کندکننده انرژی باریکه را کاهش داده اما مانع واگرایی باریکه می‌شود و باریکه را برای ورود به سیستم انتقال آماده می‌کند. تغییر ساختار این الکترود نیز بر باریکه خروجی از سیستم استخراج موثر است که در ادامه این موارد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

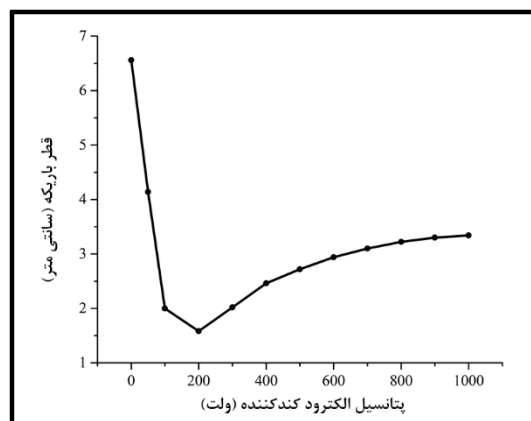
۳-۲-۴-۲-۱ پتانسیل الکترود کندکننده

پتانسیل این الکترود را می‌توان مهمترین عامل موثر از جانب این الکترود بر باریکه‌ی خروجی نامید. با توجه به اینکه پتانسیل الکترود استخراج منفی ۳ کیلو ولت است، پتانسیل‌ای که برای الکترود کندکننده انتخاب می‌شود باید منفی و از لحاظ مقداری کمتر از پتانسیل الکترود شتابدهنده باشد. برای بررسی اثر تغییر پتانسیل این الکترود بر باریکه‌ی خروجی دیگر عوامل موثر مثل طول و زاویه‌ی این الکترود را ثابت و به ترتیب ۱۵ میلی‌متر و ۶۷/۵ درجه انتخاب می‌شود. انتخاب این مقادیر برای این الکترود متداول است. شکل ۳-۴۲ پروفایل باریکه‌ی خروجی از این الکترود را در پتانسیل‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل بهترین پتانسیل برای این الکترود ۲۰۰- ولت است زیرا در این پتانسیل باریکه به صورت موازی درآمد است. علت تغییر قطر و واگرایی باریکه‌ی خروجی از این الکترود تغییر مولفه‌ی عرضی (شعاعی) میدان الکتریکی شکل گرفته درون این الکترود است.



شکل ۳-۴۲: باریکه‌ی خروجی بر حسب پتانسیل‌های مختلف الکتروود کندکننده

شکل ۳-۴۳ قطر باریکه به ازای تغییر پتانسیل این الکتروود در فاصله‌ی ۳۰ میلی‌متری از آن را نشان می‌دهد. طبق این شکل کمترین قطر باریکه زمانی است که پتانسیل الکتروود کندکننده ۲۰۰- ولت است.

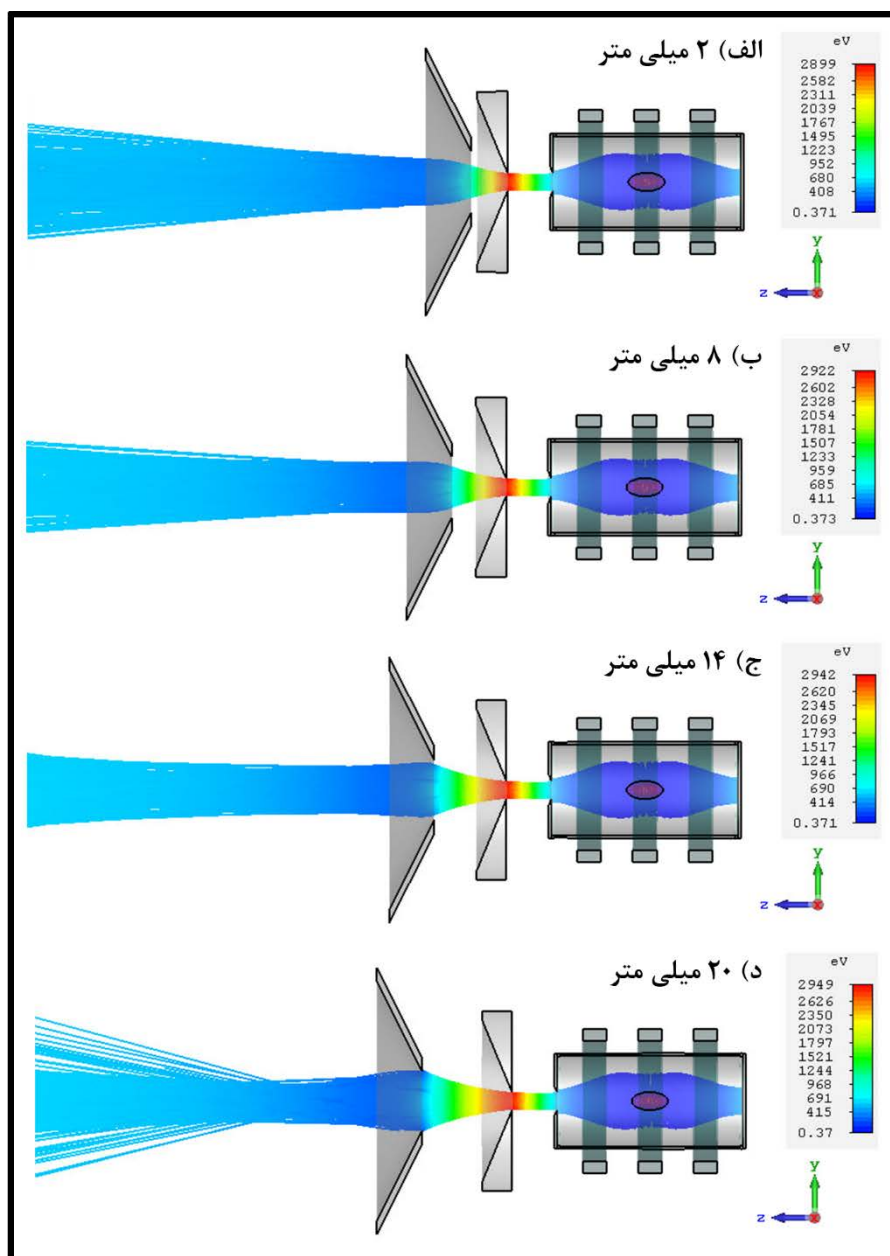


شکل ۳-۴۳: قطر باریکه خروجی بر حسب پتانسیل الکترود کندکننده در فاصله‌ی ۳۰ میلیمتری از آن. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

با توجه به تصاویر بالا مناسب‌ترین پتانسیل برای این الکترود ۲۰۰- ولت است بنابراین شبیه‌سازی‌های بعدی با این مقدار انجام می‌شود.

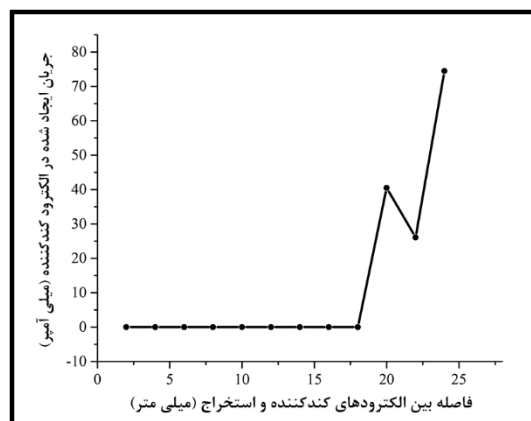
۳-۲-۴-۲ فاصله‌ی الکترود کندکننده از الکترود استخراج

برای بررسی اثر فاصله‌ی الکترود کندکننده از الکترود استخراج، پتانسیل، طول، قطر دهانه‌ی و زاویه‌ی این الکترود ثابت و به ترتیب ۲۰۰- ولت، ۱۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۶۷/۵ درجه انتخاب می‌شود. شکل ۳-۴۴ باریکه‌ی خروجی را به ازای فاصله‌های مختلف این الکترود از الکترود شتاب‌دهنده نشان می‌دهد. با تغییر فاصله‌ی بین الکترود کندکننده و استخراج مولفه‌ی عرضی میدان تغییر کرده و باعث تغییر قطر باریکه‌ی ورودی به الکترود کندکننده و نیز واگرایی آن در طول مسیر می‌شود. مولفه‌ی طولی میدان الکتریکی با تغییر فاصله‌ی بین الکترود کندکننده و استخراج تغییری نمی‌کند بنابراین انرژی باریکه‌ی خروجی از الکترود کندکننده تقریباً یکسان است. رنگ‌بندی باریکه در شکل زیر بر حسب انرژی است و گستره‌ی انرژی آن کنار هر قسمت از این شکل نشان داده شده است. طبق این شکل بهینه فاصله‌ی بین این دو الکترود ۱۴ میلی‌متر است زیرا در این فاصله واگرایی باریکه کمترین مقدار است.



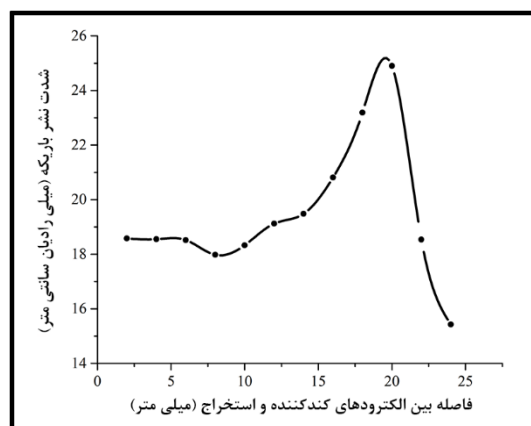
شکل ۳-۴: باریکه خروجی در فاصله‌های مختلف الکتروندکندکننده از الکتروند استخراج

زمانی که فاصله‌ی این الکتروند از الکتروند استخراج زیاد بشود یون‌ها با این الکتروند برخورد می‌کنند. شکل ۳-۴ جریان ایجاد شده در این الکتروند بواسطه‌ی برخورد یون‌ها را بر حسب فاصله از الکتروند استخراج نشان می‌دهد. طبق این شکل از فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متری به بعد یون‌ها با این الکتروند برخورد کرده و باعث ایجاد جریان در آن می‌شوند. بنابراین انتخاب فاصله‌ی بیش از ۲۰ میلی‌متر مناسب نیست.



شکل ۳-۴۵: جریان ایجاد شده ناشی از برخورد یون‌ها به الکترود کندکننده بر حسب فاصله از الکترود استخراج. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

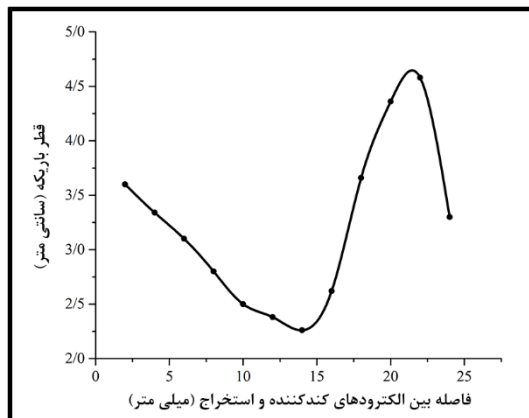
شدت نشر و قطر باریکه خروجی از این الکترود همواره دو پارامتر مهم در بهینه سازی این سیستم استخراج هستند. شکل ۳-۴۶ شدت نشر باریکه را بر حسب فاصله الکترود کندکننده از الکترود استخراج نشان می‌دهد. طبق این شکل با افزایش فاصله، شدت نشر باریکه نیز بیشتر می‌شود. علت کاهش شدت نشر از ۲۰ میلی‌متر به بعد برخورد یون‌ها با این الکترود و کاهش باریکه‌ی خروجی از آن است.



شکل ۳-۴۶: شدت نشر باریکه خروجی از الکترود کندکننده بر حسب فاصله این الکترود از الکترود استخراج. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

با بررسی قطر باریکه‌ی خروجی مناسب‌ترین فاصله بین دو الکترود کندکننده و استخراج بدست می‌آید. شکل ۳-۴۷ قطر باریکه‌ی خروجی را در فاصله‌ی ۷۵ میلی‌متری از الکترود کندکننده بر حسب

فاصله‌ی بین این دو الکتروود نشان می‌دهد. طبق این شکل مناسب‌ترین فاصله بین دو الکتروود استخراج و کندکننده ۱۴ میلی‌متر است.



شکل ۳-۴۷: قطر باریکه خروجی از الکتروود کندکننده بر حسب فاصله از الکتروود استخراج. خطوط بین نقاط از درون-یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۳-۲-۴-۲-۳ قطر دهانه‌ی الکتروود کندکننده

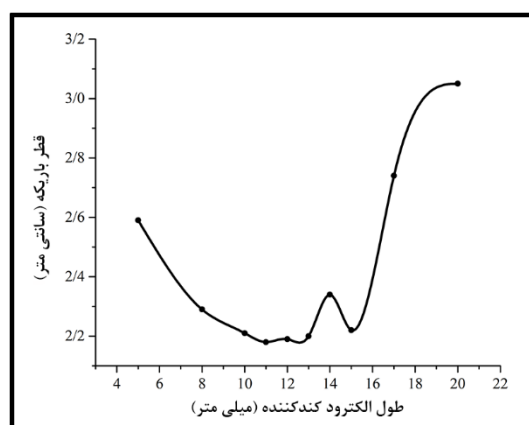
قطر دهانه‌ی این الکتروود با توجه به قطر دهانه‌ی الکتروود استخراج انتخاب می‌شود. قطر دهانه‌ی این الکتروود باید بزرگتر از قطر دهانه‌ی الکتروود استخراج باشد. انتخاب مقادیر کوچک برای این الکتروود باعث برخورد باریکه با این الکتروود می‌شود. از آنجا که با تغییر قطر دهانه، زاویه و طول این الکتروود نیز تغییر می‌کند، طبق هندسه‌ی موجود قطر ۲۰ میلی‌متری برای این الکتروود انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی‌ها از ابتدا با این مقدار انجام شده و از این به بعد نیز با همین مقدار ادامه می‌یابد.

۴-۲-۴-۲-۳ زاویه‌ی الکتروود کندکننده

با در نظر گرفتن پتانسیل ۲۰۰- ولت و فاصله‌ی ۱۴ میلی‌متری از الکتروود استخراج و قطر ۲۰ میلی‌متری دهانه‌ی این الکتروود، مناسب‌ترین زاویه برای این الکتروود نیز همان ۶۷/۵ درجه است و شبیه‌سازی‌های بعدی نیز با این مقدار انجام می‌شود. در ضمن انتخاب این زاویه برای این الکتروود متداول بوده و شبیه‌سازی‌ها از ابتدا نیز با این مقدار انجام شده است.

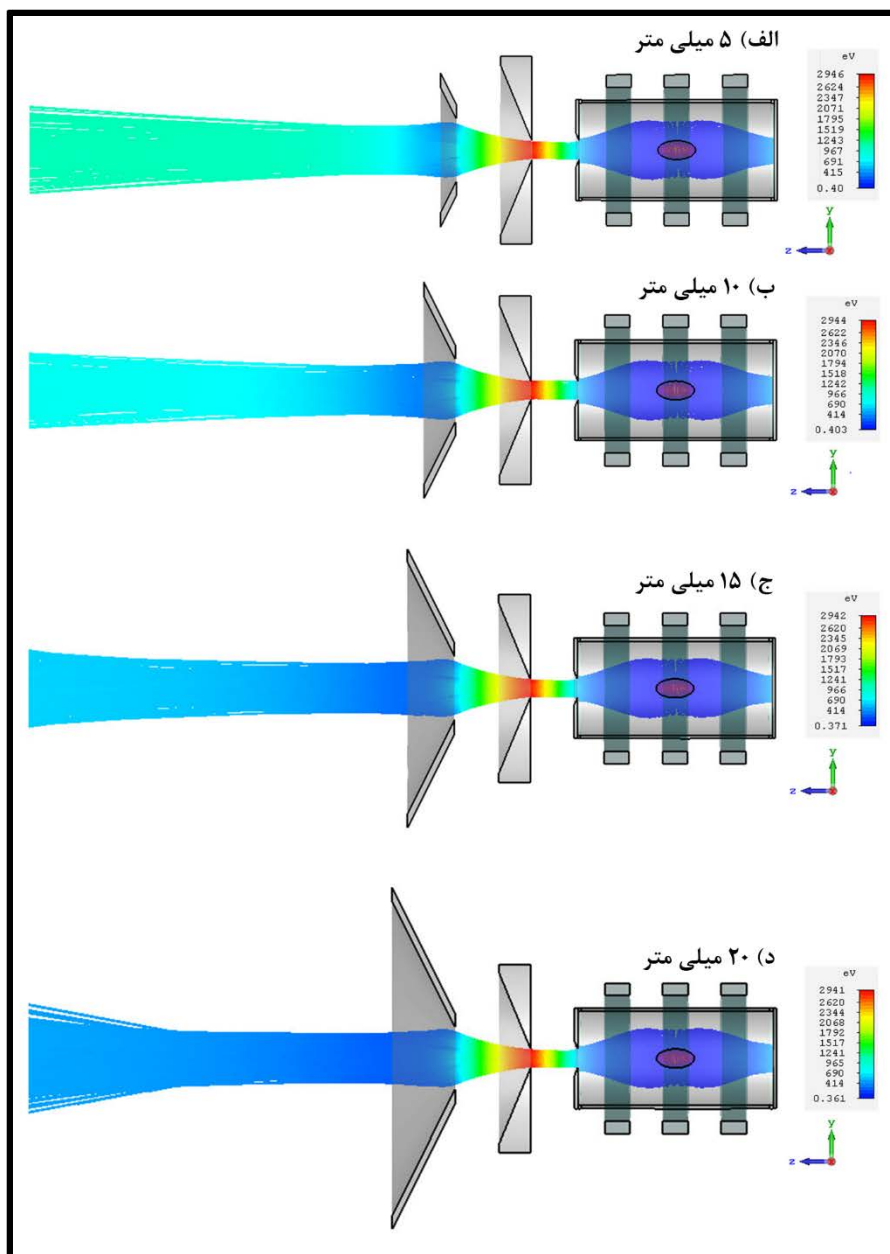
۵-۲-۴-۲-۳ طول الکتروند کندکننده

در حالی که پتانسیل الکتروند کندکننده ۲۰۰- ولت، زاویه‌ی آن ۶۷/۵ درجه و فاصله‌ی آن از الکتروند استخراج ۱۴ میلی‌متر می‌باشد، اثر تغییر طول این الکتروند بر باریکه‌ی خروجی بررسی می‌شود. شکل ۴۸-۳ قطر باریکه‌ی خروجی از این الکتروند را در فاصله‌ی ۹ سانتی‌متری از آن نشان می‌دهد. طبق این شکل طول‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۵ میلی‌متر، از آن جهت که باریکه قطر کمتری دارد، برای این الکتروند مناسب است.



شکل ۴۸-۳: قطر باریکه‌ی خروجی از الکتروند کندکننده در فاصله‌ی ۹ سانتی‌متری از آن. خطوط بین نقاط از درون-یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

شکل ۴۹-۳ پروفایل باریکه‌ی خروجی از الکتروند کندکننده را به ازای چند طول مختلف این الکتروند نشان می‌دهد. هرچه طول این الکتروند کمتر باشد، مولفه‌ی طولی میدان کمتر روی باریکه‌ی خروجی از آن اثر می‌کند بنابراین انرژی باریکه کمتر کاهش پیدا می‌کند. گستره‌ی انرژی باریکه که در کنار هر قسمت از این شکل نشان داده شده است به خوبی گویای این مطلب است. با افزایش طول این الکتروند مولفه‌ی عرضی میدان بیشتر بر باریکه اثر می‌کند بنابراین باریکه را بیشتر به سمت محور جمع می‌کند. در نتیجه طول این الکتروند را می‌توان طبق پارامترهای موردنیاز باریکه‌ی خروجی از آن تعیین کرد. برای شبیه‌سازی‌های بعدی مقدار ۱۵ میلی‌متر برای طول این الکتروند انتخاب می‌شود.



شکل ۳-۴۹: باریکه‌ی خروجی از الکتروود کندکننده به ازای چند طول مختلف این الکتروود

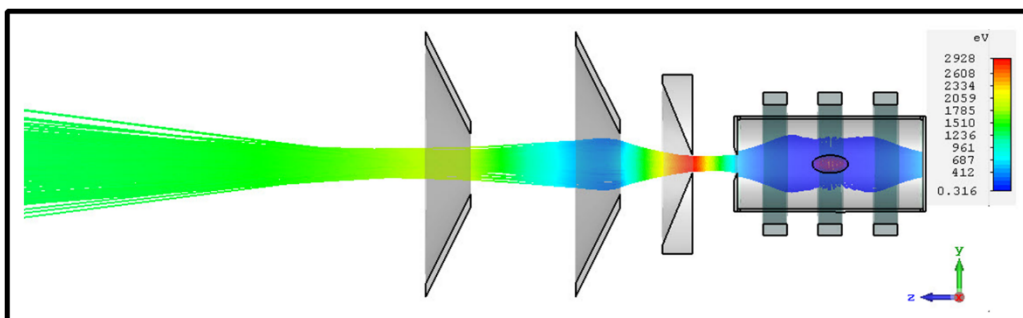
۳-۲-۵ سیستم انتقال باریکه

باریکه پس از همگرا شدن توسط الکتروود کندکننده، می‌تواند در سیستم انتقال شتاب گیرد که این شتابدهی اغلب توسط یک یا چند لنز انجام می‌شود. در این راستا به معرفی انواع سیستم‌های انتقال باریکه می‌پردازیم. سیستم انتقال باریکه شامل ابزاری برای انتقال یا متمرکز سازی باریکه بعد از استخراج

می‌باشد و به دو دسته‌ی عمده‌ی الکترواستاتیکی و مغناطیسی تقسیم می‌شوند. سیستم الکترواستاتیکی شامل دو دسته‌ی لنزهای دوتایی (دیودی) و سه‌تایی (تریودی) تقسیم می‌شود که عملیات متمرکزسازی و شتابدهی را توأمان انجام می‌دهند. دسته‌ی مغناطیسی شامل سلونوئیدها صرفاً برای متمرکزسازی باریکه استفاده می‌شود. در ادامه فقط سیستم الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

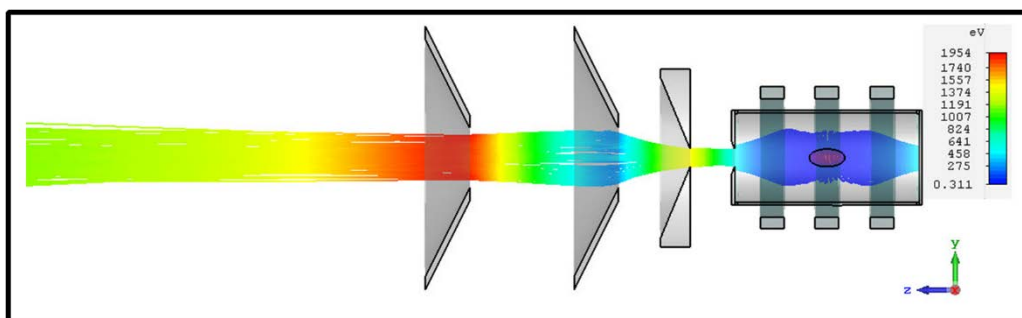
۳-۲-۵-۱ الکتروود شتابدهنده

این الکتروود از لحاظ هندسی کاملاً شبیه الکتروود کندکننده است و تفاوت آنها در پتانسیل می‌باشد. شکل ۳-۵۰ باریکه شتابدار شده توسط الکتروود شتابدهنده در پتانسیل منفی ۲ کیلوولت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵۰: باریکه‌ی خروجی از چشمه با حضور الکتروود شتابدهنده

مولفه‌ی عرضی میدان درون این الکتروود باریکه را قدری متمرکز می‌کند که این باعث می‌شود باریکه کانونی شده و هرچه جلوتر می‌رود واگرا بشود، این بازشدگی برای سیستم انتقال مناسب نیست. برای جلوگیری از این واگرایی کافی است پتانسیل الکتروود استخراج را کم کنیم. همان‌طور که در بخش‌های بالا گفته شد کاهش پتانسیل الکتروود استخراج باریکه را بعد از عبور از الکتروود کندکننده واگرا می‌کند و این واگرایی را الکتروود شتابدهنده جبران کرده و باریکه را موازی می‌کند. شکل ۳-۵۱ باریکه‌ی خروجی را برای حالتی که پتانسیل الکتروود استخراج به نصف مقدار کاهش پیدا کرده نشان می‌دهد. گستره‌ی انرژی باریکه که در کنار هر شکل نشان داده شده به خوبی گویای این مطلب است.



شکل ۳-۵۱: باریکه‌ی خروجی از چشمه با حضور الکتروستاتابدهنده و تغییر پتانسیل الکتروستاتابدهنده

برای ورود باریکه به لنزهای الکترواستاتیکی بهتر است به صورت موازی باشد تا با کمترین برخورد وارد لنزها شده و بر روی هدف متمرکز بشود. در مواردی که باریکه بلافاصله بعد از خروج از الکتروستاتابدهنده استفاده می‌شود، موارد استفاده تعیین کننده پتانسیل الکتروستاتابدهنده و بالطبع الکتروستاتابدهنده است. به طور کلی هندسه الکتروستاتابدهنده باعث می‌شود که در آن باریکه با افزایش پتانسیل متمرکز بشود و برعکس.

۳-۲-۵-۲ الکترواستاتیکی

لنزهای الکترواستاتیکی از الکترودهایی که معمولاً به شکل استوانه‌های توخالی (سیلندر) هستند، تشکیل شده‌اند. اغلب سیستم دیودی را لنزهای غوطه‌ور و سیستم تریودی را لنزهای اینزل یا تعلیقی می‌نامند.

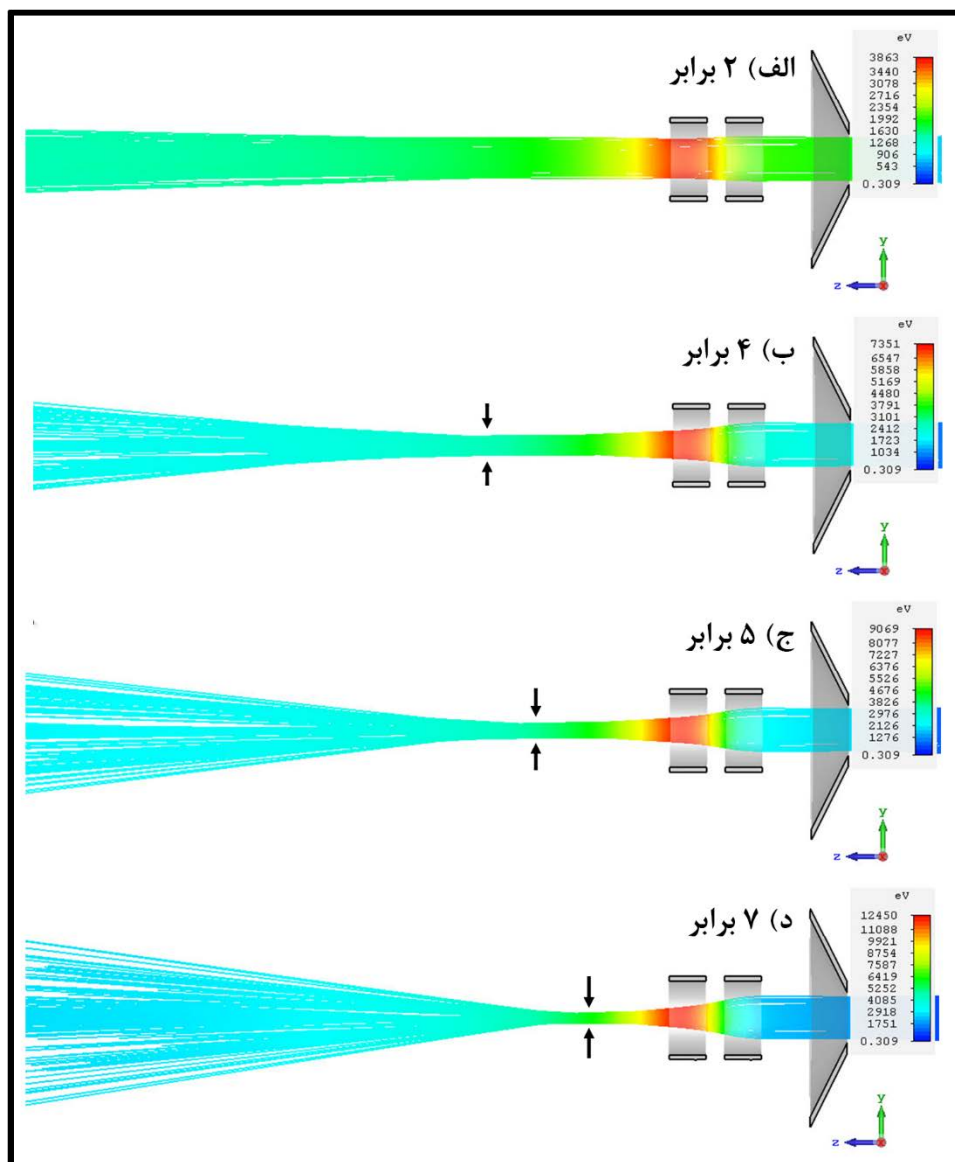
۳-۲-۵-۱ لنزهای دوتایی (غوطه‌ور)

لنزهای غوطه‌ور بسته به پتانسیل اعمالی در دو مد شتابدهنده و کندکننده کار می‌کنند. زمانی که پتانسیل لنز دوم بیشتر باشد سیستم در مد شتابدهنده و زمانی که کمتر باشد در مد کندکننده عمل می‌کند. به منظور بررسی عملکرد این سیستم دو استوانه‌ی نوعی توخالی به قطر ۳۰، ضخامت ۲ و طول ۱۵ میلی‌متر که از یکدیگر ۷/۵ میلی‌متر فاصله دارند در مسیر باریکه قرار گرفته‌اند. قطر لنزها با توجه به قطر باریکه انتخاب شده است. معمولاً طول و فاصله‌ی بین لنزها، همان‌طور که در فصل گذشته بیان

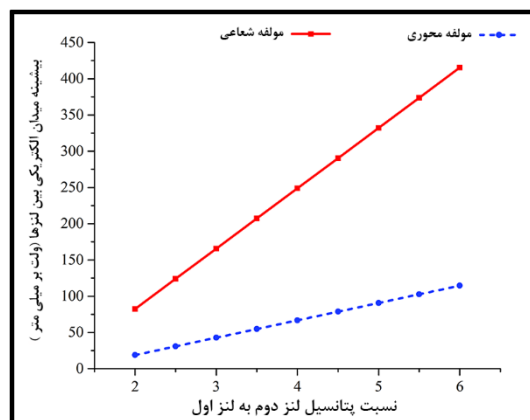
شد، به ترتیب یک دوم و یک چهارم قطر انتخاب می‌شود.

۱-۱-۲-۵-۲-۳ پتانسیل لنز دوم

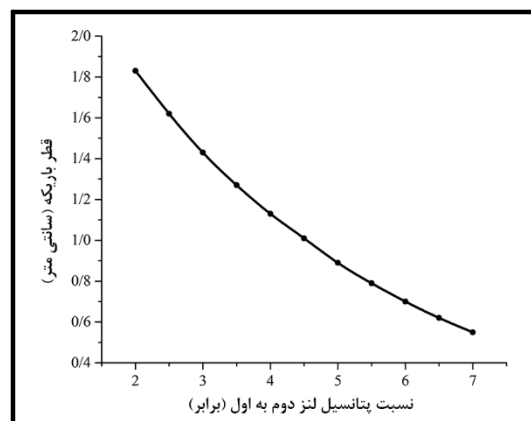
برای بررسی اثر تغییر پتانسیل لنز دوم بر باریکه، دیگر عوامل موثر بر باریکه مثل طول لنزها و فاصله‌ی بین آنها ثابت و به ترتیب ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. در واقع نسبت پتانسیل بین لنزها اهمیت دارد نه مقدار پتانسیل آنها. میدان الکتریکی شکل گرفته بین لنزها دو مولفه‌ی طولی و عرضی (شعاعی) دارد، افزایش مولفه‌ی طولی میدان باعث شتاب گرفتن باریکه می‌شود. هرچه مولفه‌ی عرضی میدان بیشتر بشود فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی از لنزها کاهش پیدا می‌کند. شکل ۵۲-۳ باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در مد شتاب‌دهنده را بر حسب پتانسیل لنز دوم نشان می‌دهد. طبق این شکل هر چه پتانسیل لنز دوم بیشتر بشود فاصله‌ی کانونی باریکه کوچکتر و باریکه در نقطه‌ی کانونی متمرکزتر می‌شود. گستره‌ی انرژی باریکه در کنار هر قسمت از شکل ۵۲-۳ نشان می‌دهد که انرژی باریکه در نقطه‌ی کانونی بیشتر می‌شود. شکل ۵۳-۳ بیشینه میدان الکتریکی بین لنزها را در راستای محوری و شعاعی بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به اول نشان می‌دهد. هر چه باریکه در نقطه‌ی کانونی متمرکزتر شود، چگالی باریکه در آن نقطه بیشتر می‌شود و بدیهی است که قطر باریکه هم کاهش پیدا کند. شکل ۵۴-۳ قطر باریکه را بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول را در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری از لنزها نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵۲: باریکه خروجی از لنزهای غوطه‌ور برای چند پتانسیل مختلف لنز دوم

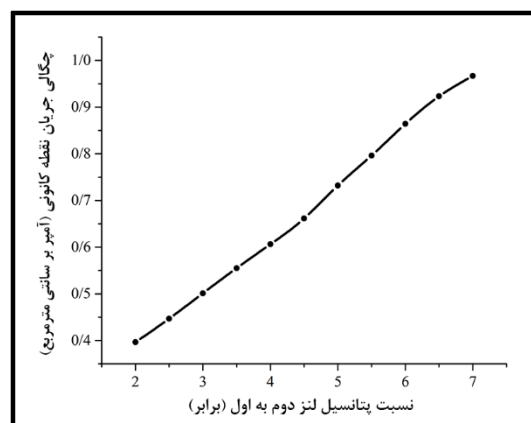


شکل ۳-۵۳: پیشینه میدان الکتریکی بین لنزها بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به اول



شکل ۳-۵۴: قطر باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

شکل ۳-۵۵ چگالی جریان نقطه‌ی کانونی بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول را نشان می‌دهد. طبق این شکل چگالی جریان نقطه‌ی کانونی با پتانسیل لنز دوم نسبت مستقیم دارد.

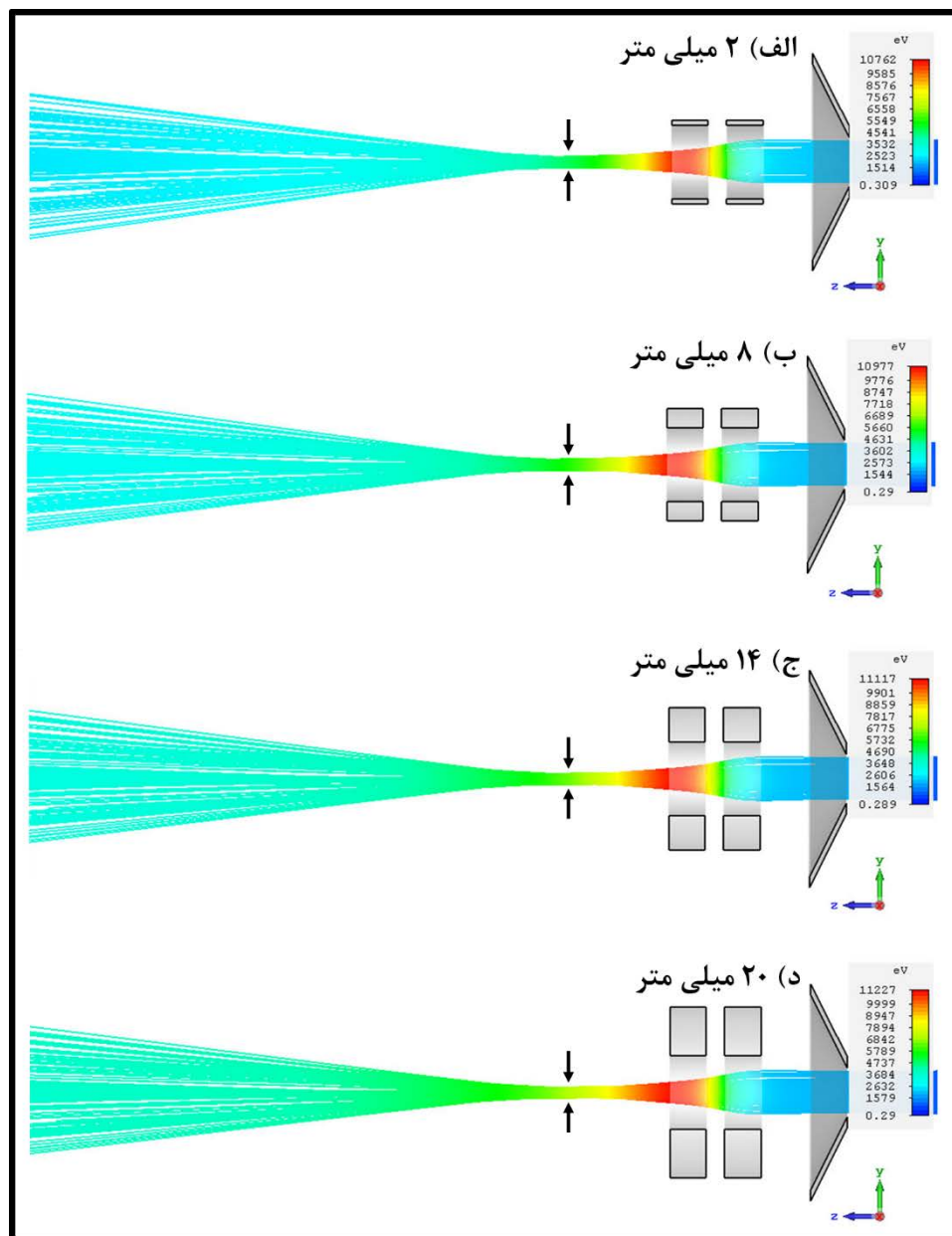


شکل ۳-۵۵: چگالی جریان نقطه‌ی کانونی بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنز اول. خطوط بین نقاط جهت هدایت چشم رسم شده است.

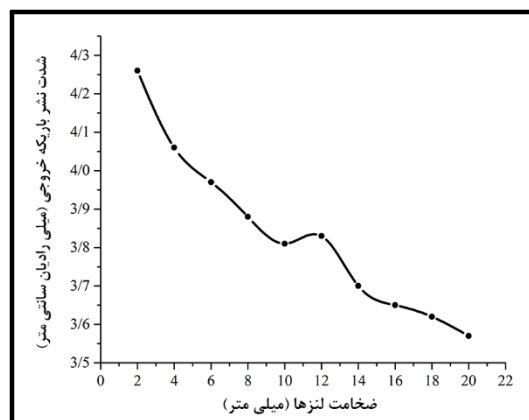
۲-۳-۲-۵-۱ ضخامت لنزها

برای مشاهده‌ی بهتر اثر تغییر ضخامت لنزها بر باریکه، پتانسیل لنز دوم طوری انتخاب شده که فاصله‌ی کانونی باریکه کمتر باشد و دیگر مقادیر موثر بر باریکه مثل طول و فاصله‌ی بین لنزها ثابت و به ترتیب ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. با افزایش ضخامت لنزها مولفه‌ی طولی و عرضی میدان بیشتر می‌شود. افزایش مولفه‌ی طولی میدان باعث افزایش انرژی باریکه‌ی خروجی از لنزها می‌شود.

شکل ۳-۵۶: باریکه‌ی خروجی از لنزها را به ازای چند ضخامت مختلف نشان می‌دهد. گستره‌ی انرژی باریکه که کنار هر قسمت از این شکل قرار دارد به خوبی گویای این مطلب است. از آنجا که با افزایش ضخامت مولفه‌ی عرضی نیز به همان نسبت مولفه‌ی طولی افزایش پیدا می‌کند، فاصله‌ی کانونی باریکه تغییری نمی‌کند. با افزایش ضخامت لنزها شدت‌نشر باریکه کمتر می‌شود. شکل ۳-۵۷: شدت‌نشر باریکه‌ی خروجی از لنزها را نشان می‌دهد.



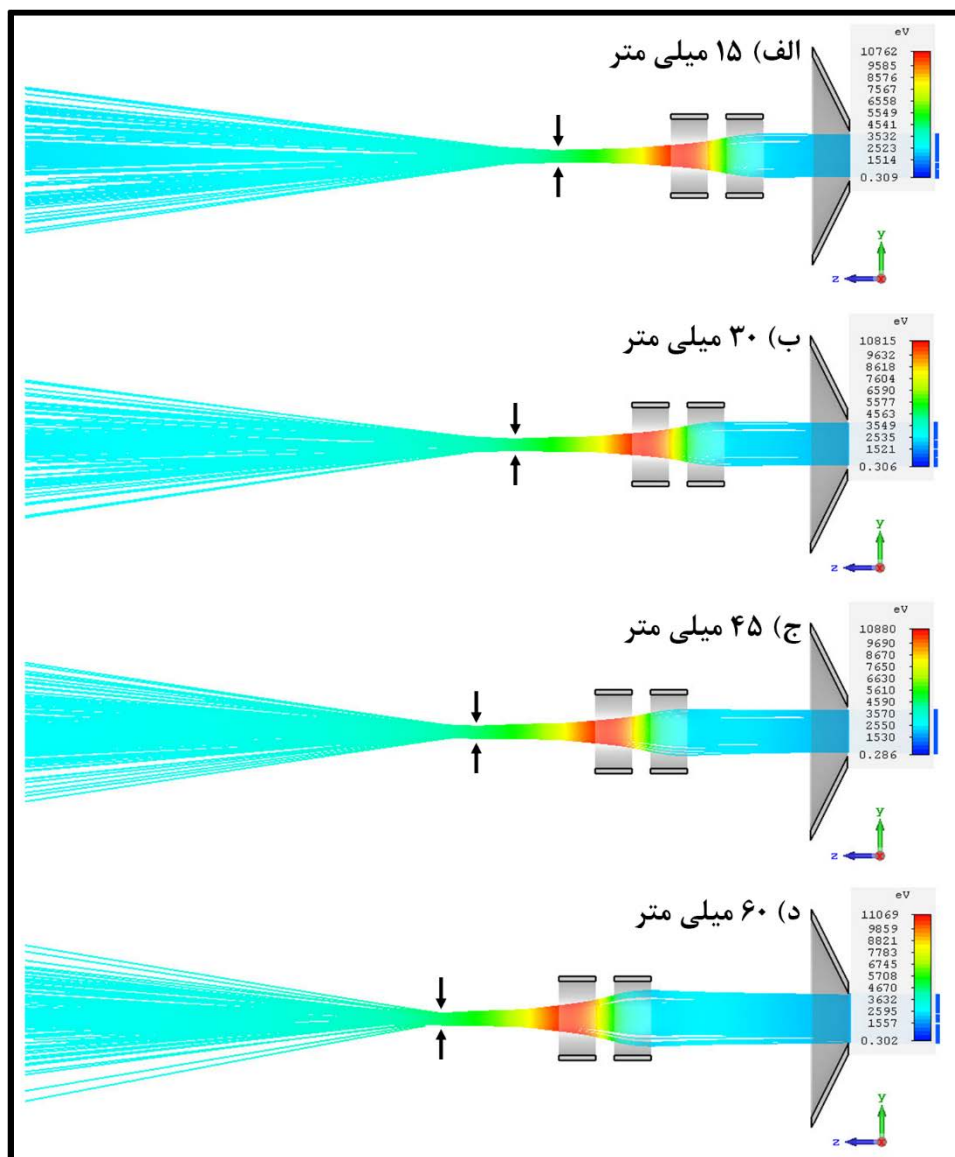
شکل ۳-۵۶: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در ضخامت‌های مختلف



شکل ۳-۵۷: شدت پرتو باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب ضخامت لنزها. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۳-۲-۵-۱-۳ فاصله‌ی بین لنزها و الکتروود شتاب‌دهنده

برای مشاهده‌ی بهتر اثر این فاصله بر باریکه خروجی، پتانسیل و ضخامت لنز دوم طوری انتخاب شده که نقطه‌ی کانونی باریکه نزدیک لنزها قرار گیرد. عوامل موثر دیگر مثل طول و فاصله‌ی بین لنزها ثابت و به ترتیب ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. با افزایش فاصله‌ی بین لنزها و الکتروود شتاب‌دهنده تغییری در مولفه‌ی طولی و عرضی میدان درون لنزهای غوطه‌ور ایجاد نمی‌شود، بنابراین تغییری در فاصله‌ی کانونی باریکه ایجاد نمی‌شود، البته زمانی که فاصله‌ی کانونی باریکه بعد از خروج از لنز دوم محاسبه بشود. با افزایش بیش از حد این فاصله، چون مولفه‌ی عرضی میدان شکل گرفته بین الکتروود شتاب‌دهنده و لنزهای غوطه‌ور کاهش پیدا می‌کند باریکه قبل از ورود به لنزها واگرا می‌شود. قطر و انرژی باریکه در نقطه‌ی کانونی تقریباً ثابت است. شکل ۳-۵۸ باریکه‌ی خروجی از لنزها را در چند فاصله‌ی مختلف از الکتروود شتاب‌دهنده نشان می‌دهد.

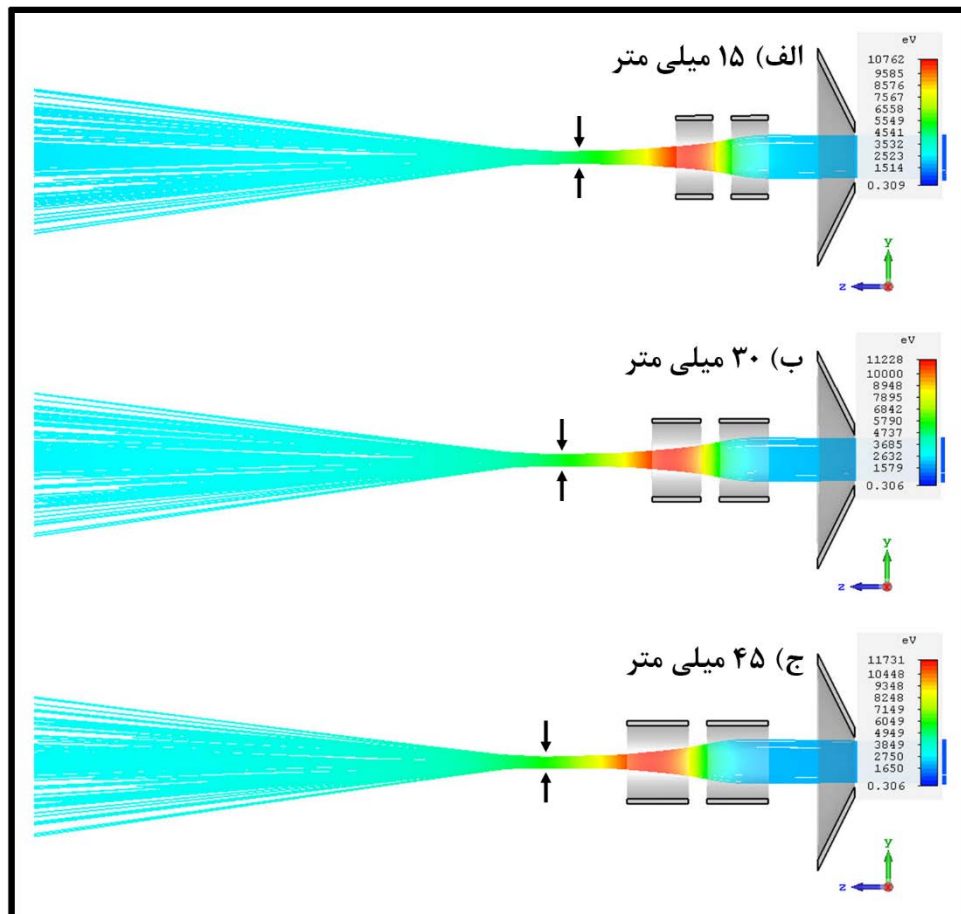


شکل ۳-۵۸: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در فاصله‌های مختلف از الکتروود شتاب‌دهنده

۳-۲-۵-۱-۴ طول لنزها

برای مشاهده‌ی بهتر اثر تغییر طول لنزها بر باریکه‌ی خروجی، فاصله‌ی لنزها از الکتروود شتاب‌دهنده کمترین مقدار و همین‌طور پتانسیل و ضخامت لنزها طوری انتخاب شده که نقطه‌ی کانونی باریکه نزدیک لنزها باشد. فاصله‌ی بین لنزها نیز $7/5$ میلی‌متر است. با افزایش طول لنزها مولفه‌ی طولی و عرضی میدان افزایش پیدا می‌کنند. افزایش مولفه‌ی طولی باعث افزایش انرژی باریکه‌ی خروجی از لنزها می‌شود. چون مولفه‌ی عرضی میدان بین لنزها نیز به همان نسبت مولفه‌ی طولی افزایش پیدا می‌کند،

فاصله‌ی کانونی باریکه تغییر محسوسی نمی‌کند. شکل ۳-۵۹ باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور را در چند طول مختلف نشان می‌دهد.



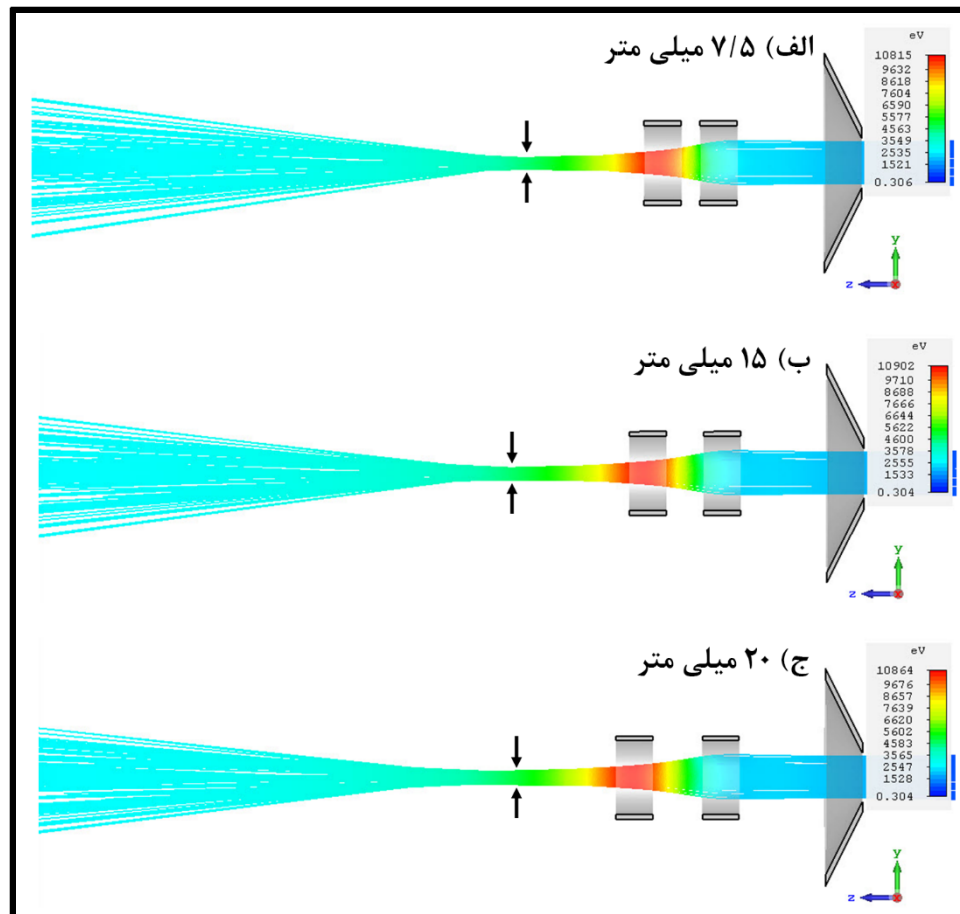
شکل ۳-۵۹: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در طول‌های مختلف آن

برای شبیه‌سازی‌های بعدی طول این لنزها طبق مطالب گفته شده در فصل قبل یک چهارم قطر انتخاب می‌شود و محاسبات از ابتدا نیز با این مقدار انجام شده است.

۵-۱-۲-۵-۲-۳ فاصله‌ی بین لنزها

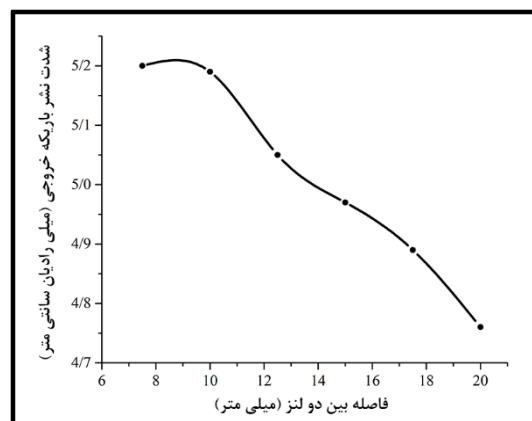
در این مرحله برای بررسی و مشاهده‌ی بهتر اثر فاصله‌ی بین لنزها بر باریکه‌ی خروجی، سه پارامتر پتانسیل، ضخامت و فاصله‌ی لنزها از الکتروود شتاب‌دهنده طوری انتخاب شده که نقطه‌ی کانونی باریکه نزدیک لنزها باشد. طول لنزها نیز ۱۵ میلی‌متر است. افزایش فاصله‌ی بین لنزها موجب کاهش

مولفه‌ی طولی و عرضی میدان بین لنزها می‌شود. از آنجا که کاهش هر دو مولفه بر هم منطبق است، انرژی و فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی از لنزها تغییر محسوسی نمی‌کند. شکل ۳-۶۰ باریکه‌ی خروجی از لنزها را در فاصله‌های مختلف بین آن‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶۰: باریکه‌ی خروجی از لنزهای غوطه‌ور در چند فاصله‌ی مختلف بین آنها

افزایش فاصله‌ی بین لنزها موجب کاهش شدت نشر باریکه می‌شود. شکل ۳-۶۱ شدت نشر باریکه را بر حسب فاصله‌ی بین لنزها نشان می‌دهد. طبق این شکل هر چه فاصله‌ی میان لنزها را بیشتر بکنیم واگرایی باریکه کمتر می‌شود.



شکل ۳-۶۱: شدت نشر باریک خروجی از لنزهای غوطه‌ور بر حسب فاصله‌ی بین آنها. خطوط بین نقاط از درونیابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

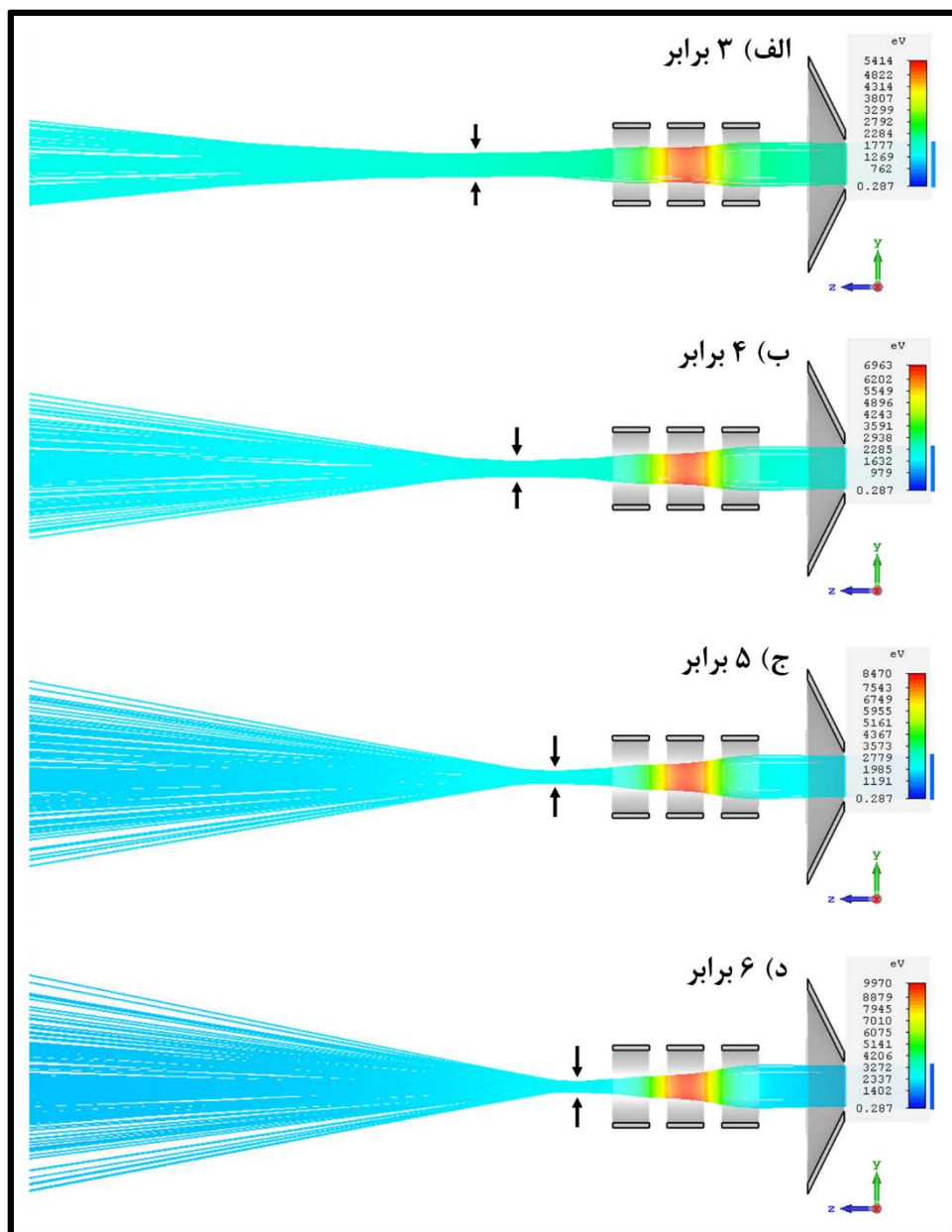
مناسب‌ترین فاصله‌ی بین لنزها طبق قطر لنزها تعیین می‌شود از آنجا که قطر این لنزها ۳۰ میلی‌متر انتخاب شده بهترین فاصله‌ی بین آنها هم ۷/۵ میلی‌متر است که بیشینه چگالی جریان نقطه‌ی کانونی در این فاصله اتفاق می‌افتد. شبیه‌سازی‌ها از ابتدا با این مقدار انجام شده است.

۲-۲-۵-۲-۳ لنزهای سه تایی (تعلیقی)

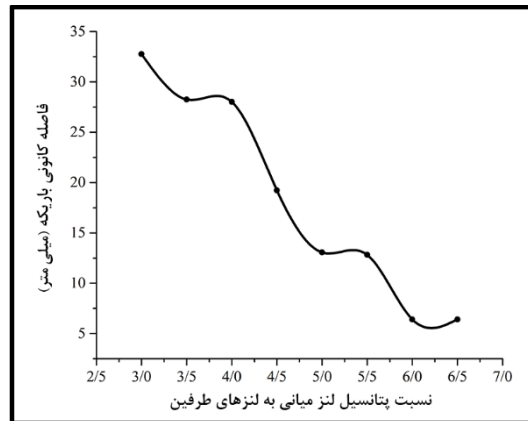
برای متمرکز کردن باریک بروی هدف بیشتر از لنزهای سه تایی (لنزهای اینزل) استفاده می‌شود. مشخصات این سیستم شبیه لنزهای غوطه‌ور است با این تفاوت که پتانسیل لنزهای اول و سوم یکسان است. مشابه قسمت قبل قطر لنزها با توجه به قطر باریک انتخاب می‌شود و بهینه طول و فاصله‌ی بین لنزها به ترتیب یک‌دوم و یک‌چهارم قطر است. به همین دلیل این سیستم متشکل از سه لنز مشابه به قطر ۳۰، طول ۱۵ و ضخامت ۲ میلی‌متر است که فاصله‌ی بین لنزها هم ۷/۵ میلی‌متر می‌باشد. مهمترین پارامتر در بررسی باریک خروجی از لنزها فاصله‌ی کانونی است. در این بخش عوامل مختلف موثر بر فاصله‌ی کانونی از جمله پتانسیل لنز میانی (لنز اینزل) و ضخامت لنزها بررسی می‌شود. در نهایت مدهای مختلف عملکرد این لنزها نیز بیان و با هم مقایسه می‌شوند. نتایج بررسی فاصله‌ی لنزها از الکتروود شتاب‌دهنده، فاصله‌ی بین لنزها و طول لنزها مشابه نتایج سیستم دو لنزی خواهد بود بنابراین در این بخش از بیان آنها خودداری می‌شود.

۳-۲-۵-۲-۱ پتانسیل لنز میانی

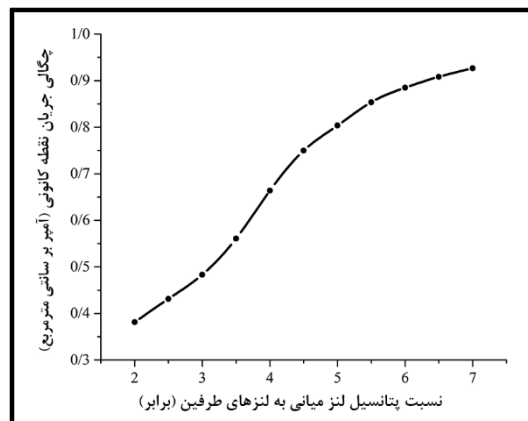
برای بررسی اثر تغییر پتانسیل لنز میانی بر باریکه، ضخامت لنزها ثابت و برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد. عوامل موثر دیگر مثل طول و فاصله‌ی بین لنزها نیز ثابت و به ترتیب ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر (همان مقادیر مورد استفاده برای لنزهای غوطه‌ور) است. برای مشاهده‌ی بهتر اثر تغییر پتانسیل بر باریکه فاصله‌ی لنزها از الکتروود شتاب‌دهنده طوری انتخاب شده است که نقطه‌ی کانونی نزدیک لنزها باشد. پتانسیل لنزهای اطراف در این سیستم همان پتانسیل الکتروود شتاب‌دهنده است و مشابه لنزهای غوطه‌ور نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای اطراف دارای اهمیت است نه مقدار آن‌ها. افزایش پتانسیل لنز میانی باعث افزایش مولفه‌ی طولی و عرضی میدان الکتریکی بین لنزها می‌شود بنابراین فاصله‌ی کانونی باریکه کاهش و انرژی آن افزایش پیدا می‌کند. شکل ۳-۶۲ باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی را در چند نسبت مختلف پتانسیل لنز میانی به لنزهای طرفین نشان می‌دهد. طبق این شکل هر چه پتانسیل لنز میانی بیشتر بشود فاصله‌ی کانونی کوچکتر می‌شود. گستره‌ی انرژی باریکه که در کنار هر قسمت از این شکل نشان داده شده است به این مطلب اشاره دارد که با افزایش پتانسیل لنز میانی، انرژی باریکه‌ی خروجی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش پتانسیل لنز میانی و کمتر شدن فاصله‌ی کانونی، شدت‌نشر باریکه بیشتر می‌شود. شکل ۳-۶۳ و شکل ۳-۶۴ به ترتیب فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی و بیشینه‌ی چگالی جریان برای باریکه در نقطه‌ی کانونی را بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای طرفین نشان می‌دهند.



شکل ۳-۶: باریک‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی به ازای چند پتانسیل مختلف لنز میانی



شکل ۳-۶۳: فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای طرفین. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.



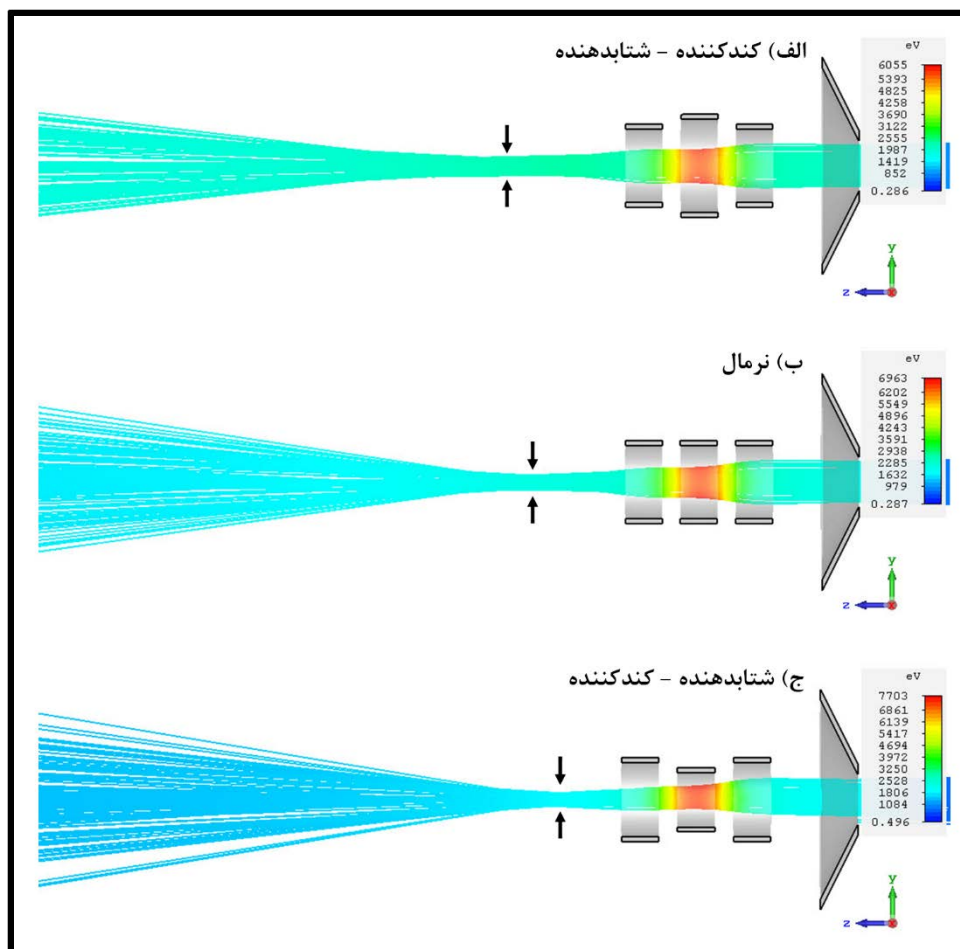
شکل ۳-۶۴: چگالی جریان نقطه‌ی کانونی بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای طرفین. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۲-۲-۲-۵-۲-۳ ضخامت لنزها

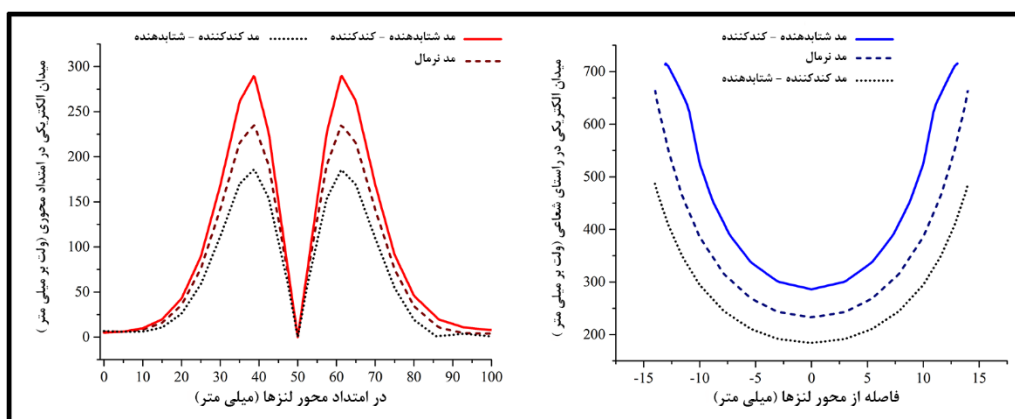
برای بررسی اثر تغییر ضخامت لنزها بر باریکه خروجی از لنزهای تعلیقی، عوامل موثر دیگر مثل طول و فاصله‌ی بین لنزها ثابت و به ترتیب برابر ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر انتخاب شد. با افزایش ضخامت لنزها مولفه‌ی طولی و عرضی میدان بین لنزها افزایش پیدا می‌کند و چون این افزایش در هر دو مولفه تقریباً یکسان است تغییر محسوسی در فاصله‌ی کانونی باریکه ایجاد نمی‌شود. شبیه‌سازی‌ها نیز همین مطلب را نشان می‌دهد.

۳-۲-۲-۵-۲-۳ مدهای مختلف لنزهای تعلیقی

در مد شتابدهنده - کندکننده با ثابت نگه داشتن پتانسیل، کاهش قطر لنز میانی فاصله‌ی کانونی باریکه را کاهش می‌دهد. مد کندکننده - شتابدهنده قطر لنز میانی بزرگتر از دیگر لنزها انتخاب می‌شود و عملکرد این مد عکس مد شتابدهنده - کندکننده است. به همین دلیل در لنزهای تعلیقی با کاهش قطر لنز میانی، نسبت به حالتی که قطر لنزها یکسان باشد، پتانسیل مورد نیاز برای دستیابی به نقطه‌ی کانونی مورد نظر با اعمال پتانسیل کمتری ممکن می‌شود. شکل ۳-۶۵ باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی و نقطه‌ی کانونی را در این دو مد به همراه حالتی که قطر لنزها یکسان باشد نشان می‌دهد. با کاهش قطر لنز میانی مولفه‌ی عرضی و طولی میدان الکتریکی بین لنزها بیشتر شده بنابراین فاصله‌ی کانونی باریکه‌ی خروجی کاهش و انرژی آن افزایش پیدا می‌کند. شکل ۳-۶۶ میدان الکتریکی درون لنزهای تعلیقی را در راستای شعاعی و محوری برای هر سه مد عملکرد لنزها نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶۵: باریکه‌ی خروجی از لنزهای تعلیقی در مدهای مختلف

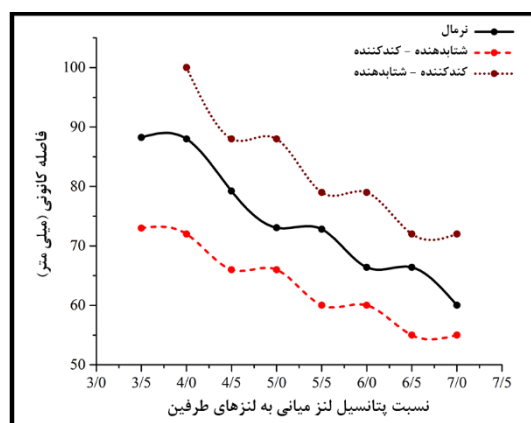


شکل ۳-۶۶: میدان الکتریکی درون لنزهای تعلیقی در راستای محوری و شعاعی برای سه مد عملکرد

شکل ۳-۶۷ فاصله‌ی کانونی باریکه خروجی از لنزهای تعلیقی را بر حسب نسبت پتانسیل لنز

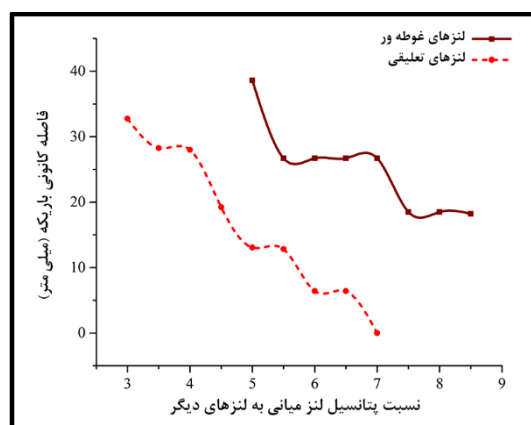
میانی به لنزهای اطراف برای هر سه مد عملکرد نشان می‌دهد. طبق این شکل دستیابی به فاصله‌ی

کانونی مورد نظر با استفاده از مد شتابدهنده - کندکننده با اعمال پتانسیل کمتری ممکن می‌شود.



شکل ۳-۶۷: فاصله کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای اطراف برای سه مد مختلف. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

در کل بازده لنزهای تعلیقی برای کانونی کردن باریکه در مقایسه با لنزهای غوطه‌ور بیشتر است. بنابراین استفاده از لنزهای تعلیقی باعث می‌شود با اعمال پتانسیل کمتری باریکه در نقطه‌ی مورد نظر کانونی شود. شکل ۳-۶۸ فاصله کانونی باریکه خروجی از لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی را بر حسب نسبت پتانسیل لنز دوم به لنزهای دیگر نشان می‌دهد. شیب نمودار مربوط به لنزهای تعلیقی بیشتر از لنزهای غوطه‌ور است.



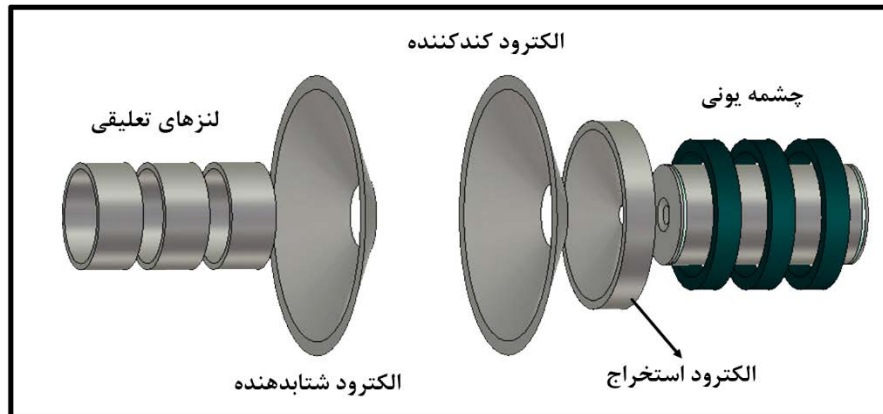
شکل ۳-۶۸: فاصله کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای دیگر برای لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی. خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش Spline بدست آمده‌اند.

۴ فصل چهارم جمع‌بندی و پیشنهاد

در فصل سوم تغییر پارامترهای مختلف بر روی باریکه‌ی خروجی از چشمه به طور جداگانه بررسی شد. بیشینه شدت میدان مغناطیسی، بیشینه چگالی جریان برای باریکه خروجی، نقطه‌ی کانونی و چگالی جریان آن از جمله مواردی هستند که به ازای تغییر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند، در این فصل نیز از بین پارامترهای مختلف موثرترین انتخاب می‌شود.

آزمایش‌های مختلف بر روی این چشمه نشان داده که بهترین نسبت بین قطر و طول آند $1/2$ تا 2 می‌باشد. طبق همین اساس طول و قطر آند به ترتیب 6 و 3 سانتی‌متر انتخاب شده است. دو صفحه به عنوان کاتد و آنتی کاتد ابتدا و انتهای این چشمه قرار گرفته است. در آنتی کاتد روزنه‌ای جهت خروج ذرات ایجاد شده است. در بررسی عوامل موثر بر پروفایل باریکه‌ی خروجی ابتدا به بررسی پتانسیل آند و کاتد پرداخته شده است. با این هندسه بهترین پتانسیل جهت اعمال به آند و کاتدها به ترتیب 500 - و 15 + ولت بدست آمده است. در بررسی قطر روزنه‌ی خروج باریکه در آنتی کاتد طبق ابعاد و پتانسیل ذکر شده در بالا بهترین مقدار 6 میلی‌متر تعیین شده است. جهت ایجاد بهینه محصورسازی ذرات درون چشمه ساختارهای مختلف آهنربای دائمی بررسی و ساختار دربرگیرنده‌ی حلقه‌ای (سه حلقه‌ای) به عنوان ساختار بهینه انتخاب شده است. با در نظر گرفتن مقادیر بالا برای چشمه بهینه طول، شدت و ضخامت حلقه‌ها به ترتیب 8 میلی‌متر، 0.7 تسلا و 4 میلی‌متر بدست آمده است. در بخش سیستم استخراج هر دو سیستم دیودی و تریودی شبیه‌سازی و بهینه مقادیر پتانسیل و زاویه‌ی الکتروود استخراج به ترتیب 3 - کیلو ولت و $67/5$ درجه بدست آمد. با در نظر گرفتن این مقادیر بهینه فاصله‌ی این الکتروود از آنتی کاتد 14 میلی‌متر بدست آمد. از بررسی الکتروود کندکننده مقادیر بهینه پتانسیل 200 - ولت و فاصله‌ی این الکتروود از الکتروود استخراج 14 میلی‌متر تعیین شده است. در سیستم انتقال باریکه الکتروودهای مختلفی می‌تواند استفاده بشود. برای اینکه باریکه دوباره به انرژی خروجی از الکتروود استخراج برسد الکتروودی جهت شتابدادن به باریکه بعد از الکتروود کندکننده قرار می‌گیرد پتانسیل این الکتروود همان پتانسیل الکتروود استخراج انتخاب شده است. این سیستم می‌تواند شامل لنزهای الکترواستاتیکی برای کانونی کردن باریکه باشد. لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی شبیه سازی و اثر تغییر عوامل

مختلف بر روی آن بررسی شده است. برای کانونی کردن باریکه لنزهای تعلیقی موثرتر از لنزهای غوطه‌ور هستند. در لنزهای غوطه‌ور با کاهش قطر لنز میانی می‌توان پتانسیل اعمالی به این لنز را برای دستیابی به نقطه‌ی کانونی مورد نظر کاهش داد. شکل زیر نمای از چشمه‌ی یونی به همراه سیستم انتقال باریکه می‌باشد.



شکل ۴-۱: نمایی از ساختار نهایی چشمه

اشکال زیر مشخصات بخش‌های مختلف چشمه‌ی یونی به همراه مقادیر خروجی بدست آمده را نشان می‌دهند.

اتاقک یونش	آند	هندسه استوانه تو خالی	مشخصات (میلی متر)	پتانسیل (ولت)
			طول ۶۰	۱۵
			قطر ۱۵	
			ضخامت ۱	
	کاتد	قرص دایره ای	قطر خارجی ۱۶	-۵۰۰
			ضخامت ۱	
	آنتی کاتد	قرص دایره ای	قطر خارجی ۱۶	-۵۰۰
			ضخامت ۱	
			قطر روزنه ۶	
	شدت میدان مغناطیسی			
	آهنربای دائمی	دربرگیرنده سه حلقه ای	قطر داخلی ۴۰	۰/۷
			ضخامت ۱۰	
			طول ۸	

شکل ۴-۲: مشخصات هندسی اتاقک یونش

سیستم استخراج	الکتروود استخراج	مشخصات (میلی متر)	پتانسیل (ولت)
			-۳۰۰۰
	الکتروود کندکننده	مشخصات (میلی متر)	-۲۰۰

شکل ۴-۳: مشخصات هندسی سیستم استخراج

سیستم انتقال		الکتروود شتابدهنده	مشخصات (میلی متر)	پتانسیل (ولت)
سیستم انتقال		الکتروود شتابدهنده	قطر دهانه ۲۰	۲۰۰۰-
			زاویه ۶۷/۵	
			طول ۱۵	
		لنزهای تعلیقی	قطر ۳۰	۲۰۰۰۰/۸۰۰۰۰/۲۰۰۰۰
		لنزهای تعلیقی	ضخامت ۱	
			طول ۱۵	
			فاصله بین لنزها ۷/۵	

شکل ۴-۴: مشخصات هندسی سیستم انتقال

سیستم استخراج		اتاقک یونش	
سیستم استخراج	الکتروود استخراج	خروجی (در ۱۰ میلی متری)	
		انرژی (الکترون ولت)	
		قطر (سانتی متر)	
	الکتروود استخراج	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)	
		انرژی (الکترون ولت)	
		قطر (سانتی متر)	
سیستم انتقال	الکتروود شتابدهنده	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)	
		انرژی (الکترون ولت)	
		قطر (سانتی متر)	
	الکتروود شتابدهنده	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)	
		انرژی (الکترون ولت)	
		قطر (سانتی متر)	
سیستم انتقال	لنزهای تعلیقی	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)	
		انرژی (الکترون ولت)	
		قطر (سانتی متر)	

شکل ۵-۴: پارامترهای خروجی از چشمه در هر بخش

۴-۱ پیشنهاد

این پایان نامه فاز شبیه سازی یک چشمه ی یونی پنینگ است. برای ساخت یک چشمه پنینگ در مرتبه ی اول پیشنهاد می شود که با نرم افزار دیگری مثل COMSOL همین چشمه با تاکید بر روی محیط پلاسمای آن شبیه سازی و نتایج با نتایج بدست آمده در اینجا مقایسه بشود. در مرحله ی بعد مطالعات بر روی کاربردهای چشمه و باریکه ی خروجی از آن انجام و در نهایت با در نظر گرفتن یک کاربرد مشخص کار ساخت چشمه آغاز شود.

۵ پیوست الف) تقسیم‌بندی کلی چشمه‌ها

الف) چشمه‌ی یون مثبت: که یون‌های مثبت تولید می‌کنند و متداول‌تر هستند. که شامل چشمه‌های زیر می‌باشد.

- ۱) چشمه‌ی جرقه‌ای در یک میدان مغناطیسی یکنواخت^۱.
- ۲) چشمه‌ی پنینگ با کاتد گرم^۲.
- ۳) چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون^۳.
- ۴) چشمه‌ی یونی فریمن با کاتد گرم^۴.
- ۵) چشمه‌ی یونی با باریکه پهن^۵.
- ۶) چشمه‌ی یونی پی‌آی‌جی با کاتد سرد^۶.
- ۷) چشمه‌ی یونی رادیو فرکانسی^۷.

ب) چشمه‌ی یون منفی: که یون‌های منفی تولید می‌کنند.

- ۱) چشمه‌های یون هیدروژن منفی^۸
 - a. چشمه‌های یون منفی دوپلاسماترون^۹
 - b. چشمه‌های یون منفی پنینگ^{۱۰}
 - c. چشمه‌های حجمی مغناطیسی فیلتر شده نوک‌تیز^{۱۱}
 - i. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی با چند نوک تیز کاشنده سزیم^{۱۲}
 - ii. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی بزرگ^{۱۳}

^۱ Arc source in a uniform magnetic field

^۲ Hot-cathode penning source

^۳ Duoplasmatron ion source

^۴ Hot-cathode freeman ion source

^۵ Broad beam ion source

^۶ Cold-cathode PIG ion source

^۷ Radio-frequency ion source

^۸ Volume H⁺ ion sources

^۹ Duoplasmatron negative ion sources

^{۱۰} Penning negative ion sources

^{۱۱} Multicusp Volume Sources Magnetically Filtered

^{۱۲} Multicusp H⁺ Source Cesium Seeded

^{۱۳} Giant H⁺ Ion Sources

- d. دیگر چشمه‌های یون منفی تولید حجمی^۱
- (۲) چشمه‌های یون هیدروژن منفی پلاسمای سطحی^۲
- a. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی مگنترون^۳
- b. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی پلاسمای سطحی پنینگ^۴
- c. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی پلاسمای سطحی با آهنربای نوک‌تیز شده^۵
- d. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی دوپلاسماترون با تخلیه‌ی توخالی^۶
- (۳) چشمه‌های یون منفی انتقال بار^۷
- a. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی انتقال بار^۸
- i. چشمه‌ی یون منفی رادیو فرکانسی^۹
- ii. چشمه‌ی یون هیدروژن منفی انتقال بار قدرتمند^{۱۰}
- b. چشمه‌ی یون هلیوم منفی^{۱۱}
- c. دیگر چشمه‌های یون منفی سنگین انتقال بار^{۱۲}
- (۴) چشمه‌های یون منفی پاشنده سزیم^{۱۳}
- a. چشمه‌ی پاشنده سزیم میدلتون^{۱۴} (UNIS)
- b. چشمه‌ی یون منفی پاشنده پلاسما^{۱۵}
- i. چشمه‌ی یون پنینگ رادیویی با استخراج پاشنده^{۱۶}
- ii. چشمه یونی منفی پلاسمای پاشنده خود استخراج^{۱۷}
- c. چشمه‌ی یون منفی سزیم پاشنده با شدت زیاد کلی^{۱۸}

^۱ Other Volume production negative ion sources

^۲ Surface-Plasma H⁻ ion sources

^۳ Magnetron H⁻ ion source

^۴ Penning surface-plasma H⁻ ion sources

^۵ Magnetic cusped surface-plasma H⁻ sources

^۶ Hollow discharge Duoplasmatron H⁻ sources

^۷ Charge-transfer negative ion sources

^۸ Charge-transfer H⁻ ion sources

^۹ Radio frequency negative ion sources

^{۱۰} Powerful charge-transfer H⁻ ion sources

^{۱۱} He⁻ ion source

^{۱۲} Other charge-transfer heavy negative ion source

^{۱۳} Cesium sputter negative ion sources

^{۱۴} Middleton cesium sputter source

^{۱۵} Cesium plasma sputter negative ion sources

^{۱۶} Radio Extraction Sputtering Penning Negative Ion Source

^{۱۷} Self-Extraction Plasma-Sputtering Negative ion sources

^{۱۸} Universal high intensity cesium sputter negative ion sources

(۵) چشمه‌ی یون منفی یونش سطحی^۱

(۶) چشمه‌ی تجزیه‌کننده بوسیله‌ی برخورد یون مثبت^۲

(ج) چشمه‌ی یون بزرگ: این چشمه‌ها معمولاً ساختار پیچیده‌تر و حجم بزرگتری دارند. موارد

زیر نمونه‌هایی از این چشمه‌ها هستند.

(۱) چشمه‌های یونی دوپی‌ای جی‌اترون^۳

(۲) چشمه‌های یونی پری‌پلاسماترون^۴

(۳) چشمه‌های یونی مولتی‌فیلامان^۵

(۴) چشمه‌های یونی آهنربای چندقطبی^۶

(۵) چشمه‌ی یونی کلاستر یا خوشه‌ای^۷

(۶) چشمه‌ی یونی بسیار تپنده یا بسیار نوسانی^۸

(د) چشمه‌های یون چندباری: که یون‌های چند بار مثبت یا چند بار منفی تولید می‌کنند و به

شرح زیر هستند:

(۱) چشمه‌های یونی باریکه الکترون چند باری^۹

a. چشمه‌ی یونی باریکه‌ی الکترون^{۱۰}

b. تله‌ی یونی باریکه الکترون^{۱۱}

(۲) چشمه‌های یونی چندباری متداول یا مرسوم^{۱۲}

a. چشمه‌ی یونی پنینگ چند باری^{۱۳}

^۱ Surface negative ionization ion sources

^۲ Dissociative source by positive ion impact

^۳ Duopigatron ion sources

^۴ Periplasmatron ion sources

^۵ Multifilament ion sources

^۶ Magnetic multipole ion sources

^۷ Cluster ion sources

^۸ Intense pulsed ion sources

^۹ Multiply charged electron beam ion sources

^{۱۰} Electron Beam Ion Source

^{۱۱} Electron Beam Ion Trap

^{۱۲} Conventional Multiply charged ion sources

^{۱۳} Penning multicharged ion source

- b. چشمه‌ی یونی دوپلاسماترون چندباری^۱
- c. بقیه‌ی چشمه‌ی یونی چندباری تخلیه پلاسمای^۲
- i. چشمه‌ی یونی رادیو فرکانسی^۳
- ii. چشمه‌ی یونی نوسان الکترواستاتیکی الکترون^۴
- iii. چشمه‌ی یونی تله‌ای^۵
- (۳) چشمه‌های یونی میکروویو^۶
- a. چشمه‌ی یونی چندباری تشدید سیکلوترون الکترون^۷
- b. چشمه‌ی یونی میکروویو با شدت زیاد^۸
- i. چشمه‌ی یونی میکروویو نوع گودالی^۹
- ii. چشمه‌ی یونی میکروویو نوع آنتنی^{۱۰}
- iii. چشمه‌ی پروتون میکروویو با شدت زیاد^{۱۱}
- c. چشمه‌ی یونی لایه‌ی الکترونی داغ^{۱۲} (HELIOS)
- d. چشمه‌ی یونی باریکه‌ی پلاسما^{۱۳}
- (۴) چشمه‌های یونی پلاسما با شدت زیاد^{۱۴}
- a. چشمه‌ی یونی چندباری لیزری^{۱۵}
- b. چشمه‌ی یونی جرقه‌ی خلاء بخار فلزات^{۱۶}
- c. چشمه‌ی یونی جرقه‌ی خلاء^{۱۷}

^۱ Duoplasmatron MCIS

^۲ Other plasma Discharge MCIS

^۳ Radio-frequency ion source

^۴ Electrostatic Oscillating Electron ion source

^۵ Trapped ion source

^۶ Microwave ion sources

^۷ Electron Cyclotron Resonance Multiply charged ion source

^۸ High Intensity Microwave ion source

^۹ Cavity Type Microwave ion source

^{۱۰} Antenna type Microwave ion source

^{۱۱} High-intensity Microwave Proton Source

^{۱۲} Hot Electron Layer Ion Source

^{۱۳} Beam-plasma ion source

^{۱۴} High density plasma sources

^{۱۵} Laser Multiply Charged Ion Source

^{۱۶} Metal Vapor Vacuum Arc Ion Source

^{۱۷} Vacuum Spark Ion Source

٦ فهرست منابع

- [١] Z. HuaShun, (1999), **Ion sources**. Springer.
- [٢] C. L. Ndlangamandla, (2006), "The design, development and fabrication of a Microwave Proton Ion Source at iThemba LABS",
- [٣] I. G. Brown, (2004), **The physics and technology of ion sources**. John Wiley & Sons.
- [٤] C. Lyneis, (1992), "ECR ion sources for accelerators," in *XIII. Int. Conf. Cycl. Appl., Vancouver, Canada*.
- [٥] P. Kumar, G. Rodrigues, P. Lakshmy, and D. Kanjilal, "STUDIES OF METALLIC ION BEAMS USING ECRIS".
- [٦] L. Wartski, C. Schwebel, and J. Aubert, (1996), "Radio frequency, microwave, and electron cyclotron resonance ion sources for industrial applications: A review", **Review of scientific instruments**, vol. 67, no. 3, pp. 895-900.
- [٧] Y. Gotoh, S. Taguchi, H. Tsuji, J. Ishikawa, and S. Sakai, (2014), "Emittance of compact microwave ion source for low energy application a", **Review of Scientific Instruments**, vol. 85, no. 2, p. 02A721.
- [٨] S. Walther, K. Leung, and W. Kunkel, (1986), "Characteristics of a compact microwave ion source", **Review of scientific instruments**, vol. 57, no. 8, pp. 1531-1535.
- [٩] Y.-G. Song, K.-T. Seol, J.-H. Jang, H.-J. Kwon, and Y.-S. Cho, (2012), "Development of the integrated control system for the microwave ion source of the PEPF 100-MeV proton accelerator", **Journal of the Korean Physical Society**, vol. 61, no. 2, pp. 208-212.
- [١٠] S. Walther, (1992), "A high-current microwave ion source for ion implantation", **Review of scientific instruments**, vol. 63, no. 4, pp. 2562-2564.
- [١١] M. Tanaka, K. Miyake, N. Sakudo, K. Kobayashi, and H. Ohkawa, (1995), "Development of a microwave ion source for negative oxygen ion beam production", **Review of scientific instruments**, vol. 66, no. 10, pp. 4911-4915.
- [١٢] N. Takahashi *et al.*, (2016), "Development of a microwave ion source for ion implantations", **Review of Scientific Instruments**, vol. 87, no. 2, p. 02C108.

- [١٣] N. Sakudo, H. Ito, Y. Matsunaga, K. Hayashi, A. Miyamoto, and Y. Tazaki, (2002), "Magnetic-field configuration fitted to the microwave ion-source plasma", **Review of scientific instruments**, vol. 73, no. 2, pp. 812-815.
- [١٤] Z. Yao, X. Tan, H. Du, B. Luo, and Z. Liu, (2008), "A high-current microwave ion source with permanent magnet and its beam emittance measurement", **Review of Scientific Instruments**, vol. 79, no. 7, p. 073304.
- [١٥] O. Waldmann and B. Ludewigt, (2011), "Measurements of beam current density and proton fraction of a permanent-magnet microwave ion source", **Review of Scientific Instruments**, vol. 82, no. 11, p. 113505.
- [١٦] G. Castro *et al.*, (2012), "Comparison between off-resonance and electron Bernstein waves heating regime in a microwave discharge ion source a", **Review of Scientific Instruments**, vol. 83, no. 2, p. 02B501.
- [١٧] S. Bhattacharjee *et al.*, (2002), "Power absorption and intense collimated beam production in the pulsed high-power microwave ion source at RIKEN", **Review of scientific instruments**, vol. 73, no. 2, pp. 620-622.
- [١٨] M. AbdelRahman, (2012), "Ion sources for use in research and low energy accelerators", **International Journal of Instrumentation Science**, vol. 1, no. 5, pp. 63-77.
- [١٩] A. M. A. Ghander, (1972), master of science, "The University of manitoba Duoplasmatron Ion Source ", Manitoba,
- [٢٠] C. Hill, (1994), "Ion and electron sources," CERN.
- [٢١] J. Illgen, R. Kirchner, and J. Schulte, (1972),"Duoplasmatron ion sources", **IEEE Transactions on Nuclear Science**, vol. 19, no. 2, pp. 35-47.
- [٢٢] H. Zhan and C. Hu, (2011),"Kinetic solutions for electrons in multi-cusp ion source", **Applied Physics Letters**, vol. 99, no. 22, p. 221501.
- [٢٣] R. Flauta, T. Kasuya, T. Ohachi, and M. Wada, (2002), "Plasma characteristics of a multi-cusp plasma-sputter-type ion source for thin film formation of gallium nitride", **Journal of crystal growth**, vol. 237, pp. 2116-2120.
- [٢٤] J. Kim, (2015), "Numerical Simulation of a Multi-Cusp Ion Source for High Current H-Cyclotron at RISP", **Physics Procedia**, vol. 66, pp. 498-505.
- [٢٥] G. Alton, (1993), "Ion sources for accelerators in materials research", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions**

with Materials and Atoms, vol. 73, no. 2, pp. 221-288.

- [୨୧] W. Xiao-Bing, H. Tao, O. Hua-Fu, Z. Hua-Shun, and G. Ke-Yun, (2010), "Design of a multi-cusp ion source for proton therapy", **Chinese Physics C**, vol. 34, no. 12, p. 1900.
- [୨୨] A. V. Sy, (2013), **Advanced Penning-type ion source development and passive beam focusing techniques for an associated particle imaging neutron generator with enhanced spatial resolution**. University of California, Berkeley.
- [୨୩] Z. Nouri, R. Li, R. Holt, and S. Rosner, (2010), "A Penning sputter ion source with very low energy spread", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, vol. 614, no. 2, pp. 174-178.
- [୨୪] Z. Yang *et al.*, (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**, vol. 685, pp. 29-34.
- [୨୫] W. He *et al.*, (2006), "Development of external electron-beam enhancement of the Penning ionization gauge ion source", **Review of scientific instruments**, vol. 77, no. 3, p. 03A330.
- [୨୬] B. Das, R. Das, and A. Shyam, "Study of Compact Penning Ion Source for Material Studies," in *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1349, no. 1, pp. 447-448: AIP.
- [୨୭] L. Jidong, Y. Zhen, D. Pan, H. Xiaozhong, and Z. Kaizhi, (2013), "Study on a cold-cathode H-PIG-type ion source", **Nuclear Science and Techniques**, vol. 24, no. 4, pp. 40201-040201.
- [୨୮] J. Yu, J. Yan, Z. Song, Z. Wang, and W. Zhao, (2004), "A cold-cathode PIG ion source for the production of intense O⁻ ion beam", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, vol. 5 ,୨୮ no. 3, pp. 341-345.
- [୨୯] J. L. Rovey, B. P. Ruzic, and T. J. Houlahan, (2007), "Simple Penning ion source for laboratory research and development applications", **Review of Scientific Instruments**, vol. 78, no. 10, p. 106101.
- [୩୦] B. K. Das and A. Shyam, (2008), " Development of compact size penning ion source for compact neutron generator", **Review of Scientific Instruments**, vol. 79, no. 12, p. 123305.

- [۳۶] M. Mahjour-Shafiei, H. Noori, and A. Ranjbar, (2011), "Influence of magnetic field on the electric breakdown in penning ion source", **Review of Scientific Instruments**, vol. 82, no. 11, p. 113502.
- [۳۷] T. Wang *et al.*, (2012), "Electrical shielding box measurement of the negative hydrogen beam from Penning ion gauge ion source", **Review of Scientific Instruments**, vol. 83, no. 6, p. 063302.
- [۳۸] Y. Yeon *et al.*, (2013), "Development Study of Penning Ion Source for Compact 9 MeV Cyclotron", **Science and Technology**, vol. 2012, p. 0925001.
- [۳۹] A. Fathi, S. Feghhi, S. Sadati, and E. Ebrahimibasabi, (2017), "Magnetic field design for a Penning ion source for a 200keV electrostatic accelerator", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, vol. 850, pp. 1-6.
- [۴۰] F. Zakerhosseini, H. Afarideh, J.-S. Chai, M. Ghergherehchi, and S. Sabounchi, (2016), "Heat transfer study of PIG ion source for 10 MeV cyclotron," in *7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, May 8-13, 2016*, pp. 1256-1258: JACOW, Geneva, Switzerland.
- [۴۱] M. Abdelrahman, N. Basal, and S. Zakhary, (2012), "Analytical and simulation studies for diode and triode ion beam extraction systems", **Chinese physics C**, vol. 36, no. 4, p. 344.
- [۴۲] T. Kalvas, (2013), "Development and use of computational tools for modelling negative hydrogen ion source extraction systems", **Research report/Department of Physics, University of Jyväskylä no. 10/2013**.
- [۴۳] M. Abdelrahman, (2012), "Factors enhancing production, extraction and focusing of positive ion beams", **Ain Shams Engineering Journal**, vol. 3, no. 1, pp. 71-78.
- [۴۴] M. Rashid, (2011), "Simple analytical method to design electrostatic einzel lens," in *Proceedings of the DAE Symp. on Nucl. Phys*, 2011, vol. 56, p. 1132.
- [۴۵] H. Liebl, (2008), **Applied charged particle optics**. Springer.
- [۴۶] <https://www.cst.com>.
- [۴۷] F. Hamme, U. Becker, and P. Hammes, (2006), "Simulation of secondary electron emission with CST PARTICLE STUDIO™," in *Proceedings of ICAP*, 2006.
- [۴۸] G. ul Islam, M. Iqbal, A. Rehman, and Z. Zhou, (2017), "Simulation and test of a

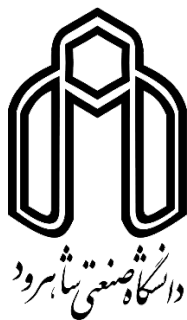
point focused electron beam emitter", **Instruments and Experimental Techniques**, vol. 60, no. 1, pp. 87-90.

- [۴۹] T. Schenkel, Q. Ji, A. Persaud, and A. V. Sy, (2016), "Advanced penning ion source," Patent 9,484,176; Other: 14/018,028 United States Other: 14/018,028 LBNL, English. Available: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1330706>.

Abstract

An ion source is a device that produces a beam of ions. Ion sources are used in mass spectrometry, isotope separation, nuclear fusion, accelerators, neutron production, ion implantation and ion etching. Many different kinds of ion sources have been developed. one of the most important is the penning or PIG ion source. Due to its simplicity of structure and longer life time, these ion source are more widely considered than other ion sources. Today, all ion sources are simulated before making. In this thesis, the work of simulating the Penning ion source using the CST software is performed and the effect of different factors on the ion of the output of the source is expressed. Among the various structures of the permanent magnet around the source, the Circular arrangement is better for confinement particles inside the source. The best potential for anode, cathode and extraction electrode is 15+, -500 and -3000 volt, respectively. The decelerator and accelerator electrodes are used for transport the output beam from the extraction system. Electrostatic lenses are also used to focus the beam. In the discussion of beam optics and electrostatic lenses, it was more beneficial to focus by the triode system (Einzel lens) than the diode system (immersion lens).

Keywords: accelerator, ion source, plasma, ionization, anode, cathode, extraction system, ion beam, electrostatic lens,



Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nuclear Physics

Design and simulation of the parameters affecting ion beam characteristics
from a penning ion source

By: Mohsen Moslemipoorkani

Supervisor

Dr. Moslem Sohani

Dr. Ehsan Ebrahimibasabi

January 2018