

طراحی و شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر باریکه خروجی از چشمه یونی پنینگ

محسن مسلمی پورکانی، احسان ابراهیمی بسابی و مسلم سوهانی

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پست الکترونیکی: e.brahim@shahroodut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶)

چکیده

امروزه انواع مختلفی از چشمه‌های یونی توسعه پیدا کرده‌اند که یکی از متداول‌ترین آنها چشمه یونی پنینگ است. این چشمه با توجه به سادگی ساختار و طول عمر بالاتر نسبت به سایر چشمه‌ها، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی چشمه یونی پنینگ با استفاده از نرم‌افزار CST انجام و تأثیر عوامل مختلف روی باریکه یون خروجی از این چشمه بیان شده است. از بین چیدمان‌های مختلف آهنربای دائمی دور چشمه، چیدمان دربرگیرنده حلقه‌ای برای محصورسازی ذرات داخل چشمه مناسب‌تر است. بهترین پتانسیل آند، کاتد و الکتروود استخراج هم به ترتیب +۱۵، -۵۰۰ و -۳۰۰۰ ولت به دست آمده است. برای انتقال باریکه خروجی از سیستم استخراج، الکترودهای کند کننده و شتاب دهنده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بخش متمرکزسازی باریکه نیز لنزهای تعلیقی عملکرد بهتری نسبت به لنزهای غوطه‌ور دارند.

واژه‌های کلیدی: چشمه یونی، سیستم استخراج، لنزهای الکترواستاتیکی، نرم‌افزار CST

۱. مقدمه

چشمه‌های یونی اولین و یکی از مهم‌ترین بخش‌های شتاب دهنده‌ها هستند که وظیفه تولید و انتقال باریکه به اجزای دیگر شتاب دهنده، به منظور رسیدن به انرژی‌های از چند کیلو الکترون‌ولت تا چند ترا الکترون‌ولت، را برعهده دارند. چشمه‌های یونی در شتاب دهنده‌ها با توجه به نوع و شدت یون خروجی مورد نیاز و همچنین پراکندگی انرژی باریکه انتخاب می‌شوند. از مهم‌ترین و رایج‌ترین چشمه‌های یونی که

در شتاب دهنده‌های آزمایشگاهی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به چشمه‌های یونی پنینگ^۱، تشدید سیکلوترونی الکترون، موج میکرو، دوپلاسماترون^۲ و مولتی کاسپ^۳ اشاره کرد [۱ و ۲].

چشمه یونی پنینگ یکی از چشمه‌های یونی پلازما است، که اختراع آن در اصل مدیون کشف روش تخلیه گاز به وسیله فیلیپس است. این چشمه بعد از اولین تخلیه آزمایشی در سال

۱. Penning Ion Source
۲. Douplasmatron Ion Source
۳. Multi-cusp Ion Source

مغناطیسی، جریان تخلیه و ولتاژ استخراج باریکه را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ یئون در کره اثر تغییر حجم چشمه بر روی پارامترهای خروجی باریکه را مورد بررسی قرار داد [۱۱]. در سال ۲۰۱۵ آفریده و همکاران در دانشگاه صنعتی امیرکبیر در طراحی سیکلوترون ۱۰ مگاالکترون ولتی از چشمه یونی پنینگ به عنوان چشمه شتاب دهنده استفاده کردند [۱۲].

در این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر باریکه خروجی از چشمه یونی پنینگ در دستور کار قرار گرفته است. در این راستا اثر طول و ضخامت الکترودها، اختلاف پتانسیل بین آنها، همچنین اثر میدان مغناطیسی اعمال شده به چشمه یونی مورد بررسی قرار گرفته است. باریکه خروجی از چشمه یونی توسط لنزهای الکترواستاتیکی استخراج و در نهایت با مشخصات مورد نظر روی هدف متمرکز خواهد شد. نمای کلی از چشمه یونی پنینگ طراحی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

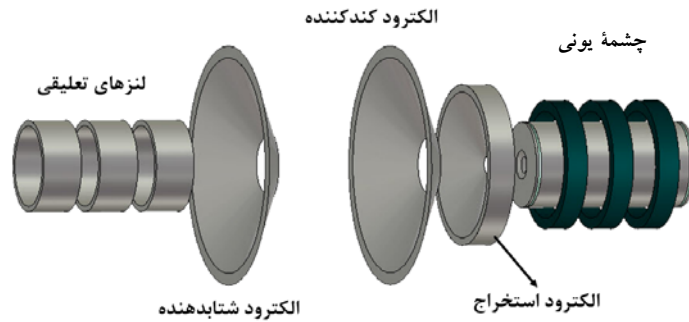
۲. معرفی ساختار چشمه یونی پنینگ

در ساده‌ترین حالت، یک چشمه پنینگ از دو کاتد صفحه‌ای به وسیله یک آند که معمولاً استوانه تو خالی است، از هم جدا شده‌اند و همگی درون یک میدان مغناطیسی محوری قرار گرفته‌اند [۳ و ۱۳]. این چشمه برای تولید الکترون‌ها در اتاقک تخلیه و در نهایت شکل‌گیری پلازما، از یک کاتد استفاده می‌کند که می‌تواند سرد یا گرم باشد. الکترون‌های آزاد موجود در گاز و یا الکترون‌های ساطع شده از کاتد تحت اختلاف پتانسیل بین آند و کاتدها، درون آند استوانه‌ای شتاب گرفته و از کاتد دیگر (آنتی کاتد) منعکس می‌شود. الکترون‌ها به دلیل انعکاس متوالی از کاتدها حول محور و در مرکز آند به دام می‌افتند. میدان مغناطیسی محوری الکترون‌ها را محصور کرده و از این که آنها صرفاً به صورت شعاعی به سمت آند حرکت کنند، جلوگیری می‌کند. در نتیجه مسیر الکترون به واسطه حضور میدان مغناطیسی به صورت مارپیچی شده، مسیر بیشتری را طی کرده و احتمال این که در ستون پلازما با گازهای موجود در چشمه برخورد کنند، افزایش پیدا

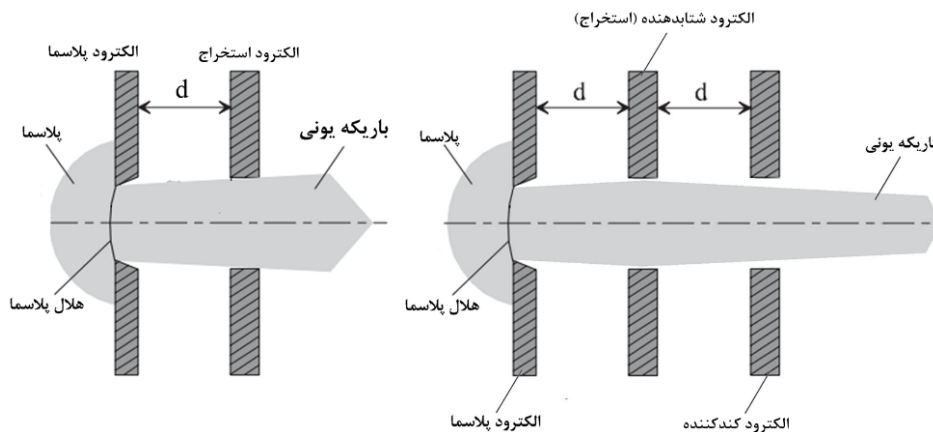
۱۹۳۶ توسط پنینگ، توسعه داده شد. در سنجه یونی پنینگ نیز از روش مشابهی جهت خلأ سنجی استفاده می‌شود [۳ و ۴]. چشمه‌های یونی پنینگ انواع با کاتد سرد و گرم دارند که چشمه‌های یونی پنینگ از نوع کاتد سرد، بدون فیلامان کار می‌کنند، عمر زیادی داشته و به نگهداری ناچیزی نیاز دارند. به همین دلیل این چشمه‌ها به طور گسترده در تحقیقات و کاربردهای صنعتی مثل تولید نوترون و حکاکی روی سطح استفاده می‌شود، همین طور چشمه‌ای مناسب برای کار تحت میدان مغناطیسی زیاد است [۵ و ۶].

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد و مخصوصاً سادگی طراحی و ساخت، این چشمه بسیار مورد توجه قرار گرفته است؛ در همین زمینه می‌توان به کار یو و همکاران در سال ۲۰۰۴ در دانشگاه پکن اشاره کرد. در این تحقیق آنها چشمه یونی پنینگ از نوع کاتد سرد را برای تولید باریکه یون‌های اکسیژن منفی به منظور استفاده در یک شتاب دهنده "چهار قطبی با بسامد رادیویی" RFQ^۱ توسعه دادند [۷]. در سال ۲۰۰۶ هی و همکاران در آزمایشگاه فیزیک جدید آکادمی علوم چین، یک تفنگ الکترونی را پشت چشمه یونی PIG قرار دادند و اثر تزریق الکترون در پلاسمای چشمه را در افزایش باریکه خروجی بررسی کردند. این تیم چشمه جدیدشان را E-PIG نام گذاری کردند [۸]. در سال ۲۰۰۸ کومارداس با همکاری شیم در مرکز تحقیقات اتمی بهابها در هند، یون‌های دوتریوم را از یک چشمه پنینگ خارج کردند. آنها با بررسی جنس الکتروود و زاویه الکتروود استخراج بر روی سیستم استخراج این چشمه اعلام کردند که عامل مهم در استخراج یون از این چشمه، هندسه الکتروود استخراج است [۶]. در سال ۲۰۱۰ نورایو همکاران در دانشگاه اونتاریوی غربی مدلی از چشمه یونی پنینگ فرانکفورت را توسعه دادند. ویژگی خاص این چشمه مد جدید تخلیه آن بود که در فشار زیاد و ولتاژ کم و جریان بالا عمل می‌کرد [۹]. در سال ۲۰۱۲ وانگ و همکاران در انجمن فیزیک سیالات چین از این چشمه به عنوان چشمه داخلی یک سیکلوترون استفاده کردند. آنها با روشی جدید اثر فشار گاز ورودی، شدت میدان

۱. Radio Frequency Quadrupole



شکل ۱. چشمه یونی، سیستم استخراج و انتقال باریکه طراحی شده.



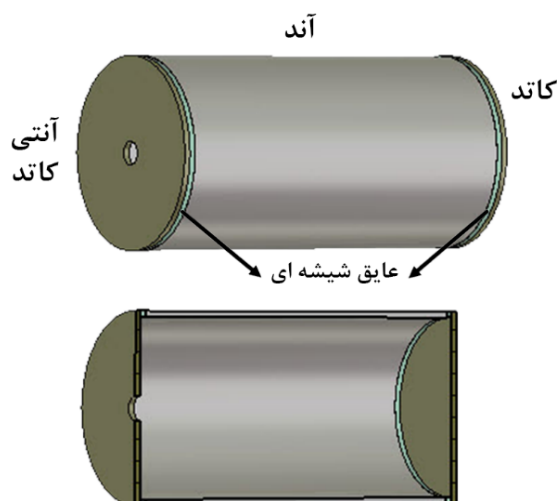
شکل ۲. باریکه خروجی از سیستم استخراج دو کترودی و سه کترودی.

معمولاً سیلندرهایی هستند که نسبت به باریکه با تقارن استوانه‌ای نصب می‌شوند. هم محور بودن لنزها مهم‌ترین نکته‌ای است که باید در چیدمان آنها در نظر گرفته شود. تا زمانی که همه چیز متقارن است، سیستم کمتر دچار مشکل می‌شود [۱۶]. معروف‌ترین لنزهای الکترواستاتیکی که در چشمه‌های یونی به کار می‌روند، سیستم دیودی (دو کترودی) و سیستم تریودی (سه کترودی) هستند [۱۷]. ساده‌ترین نمونه سیستم استخراج دو کترودی (دیودی) است که از کترود پلاسما و کترود شتاب دهنده تشکیل شده است. بسته به پارامترهای خروجی و برای جلوگیری از واگرایی باریکه بعد از خروج از کترود شتاب دهنده، می‌توان کترود سومی تحت عنوان کترود کند کننده به سیستم اضافه کرد. به این ترتیب یک سیستم استخراج سه کترودی شکل می‌گیرد [۱۸]. شکل ۲ نمایشی از سیستم استخراج دیودی و تریودی را نشان می‌دهد.

می‌کند [۱، ۵ و ۱۳]. همین طور که الکترون‌ها دائماً بین کاتد و آنتی کاتد حرکت می‌کنند به واسطه برخورد با مولکول‌ها و اتم‌های گاز، یونش ایجاد شده و باریکه می‌تواند از طریق یک شکاف در آنتی کاتد یا آند خارج شود [۱۳].

۳. سیستم استخراج باریکه

استخراج باریکه از هر چشمه یونی به پارامترهای زیادی همچون هندسه کترودها، تعداد کترودها، پتانسیل اعمال شده به کترودها، فاصله بین آنها و حالت بار باریکه (مرتبه بار در یون‌های چند بار مثبت) خروجی بستگی دارد [۱۴]. در استخراج باریکه از چشمه یونی، طراحی کترودها به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که میدان الکتریکی مناسبی برای استخراج و شتاب گرفتن یون‌ها را فراهم کند [۱۵]. لنزهای الکترواستاتیکی،



شکل ۳. ساختار اتاقک یونش چشمه یونی پنینگ.

۴. سیستم انتقال باریکه

باریکه پس از همگرا شدن توسط الکتروود کند کننده، می تواند در سیستم انتقال شتاب گیرد که این شتاب دهی اغلب توسط یک یا چند لنز انجام می شود. در این راستا به معرفی انواع سیستم های باریکه می پردازیم. سیستم انتقال باریکه شامل ابزاری برای شتاب و متمرکز سازی باریکه بعد از استخراج است و به دو دسته عمده الکترواستاتیکی و مغناطیسی تقسیم می شوند. دسته مغناطیسی شامل سلونوئیدها و چهارقطبی ها می شوند. صرفاً برای متمرکز سازی باریکه استفاده می شود. متمرکز کردن باریکه های پرانرژی با میدان های مغناطیسی و استفاده از ابزارهایی مانند چهارقطبی های مگنتواستاتیکی و یا سلونوئیدها صورت می گیرد، در حالی که برای متمرکز کردن باریکه های کم انرژی بیشتر از میدان های الکتریکی استفاده می کنند. از مهم ترین لنزهای الکترواستاتیکی نیز می توان به چهارقطبی های الکترواستاتیکی، لنزهای تعلیقی^۱ و لنزهای منفرد اشاره کرد [۱۷ و ۱۹].

از آنجایی که سیستم الکترواستاتیکی عمل متمرکز سازی و شتاب دهی یونها به سمت هدف را توامان انجام می دهند، در این پژوهش طراحی و شبیه سازی سیستم متمرکز سازی با روش الکترواستاتیکی انجام شده و اثر تغییر هندسه و پتانسیل بر پارامترهای خروجی شامل نقطه کانونی و پروفایل باریکه مورد بررسی قرار گرفته است.

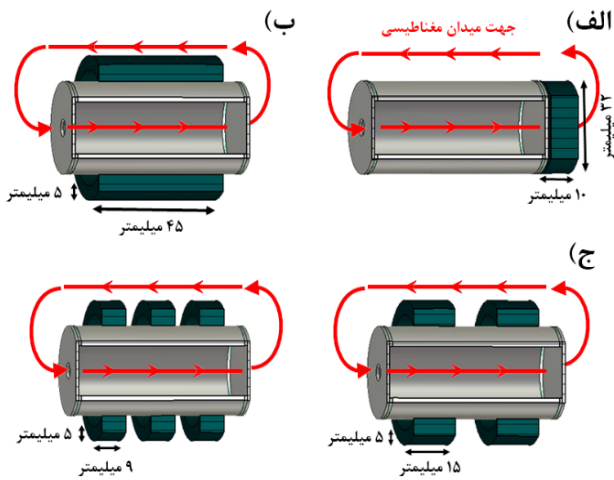
۵. طراحی و شبیه سازی چشمه یونی پنینگ

از دید هندسی، مهم ترین عامل برای تعیین اندازه چشمه، ابعاد آند است. نتایج آزمایش های تجربی نشان می دهد در صورتی که در یک چشمه یونی پنینگ طول آند حدود ۱/۲۵ تا ۲ برابر بزرگتر از قطر داخلی آن باشد، یونش در این چشمه بهتر و بیشتر انجام می شود [۲۰]. برای این منظور ابتدا استوانه نوعی به قطر داخلی ۳۰ و طول ۶۰ میلی متر به عنوان ابعاد آند انتخاب می شود. دو صفحه به قطر ۳۰ میلی متر به عنوان کاتد و آنتی کاتد در ابتدا و انتهای آن قرار می گیرند. حلقه هایی از جنس شیشه هم قطر با دهانه آند و به ضخامت ۱ میلی متر نیز به عنوان عایق بین آند و هر کدام از کاتدها نصب می شوند. شکل ۳ ساختار اولیه اتاقک یونش چشمه پنینگ را نشان می دهد.

۶. بررسی عوامل مؤثر بر باریکه خروجی

فرایند شبیه سازی چشمه، سیستم استخراج و سیستم انتقال باریکه با نرم افزار CST انجام شده است. حل مسائل در این نرم افزار با استفاده از معادلات ماکسول و بر مبنای روش المان محدود است. میدان های الکتریکی و مغناطیسی به دست آمده جهت ترابرد ذرات باردار مورد استفاده قرار می گیرد. این نرم افزار قابلیت شبکه بندی هندسی مسئله بر مبنای المان های چهار و شش وجهی را دارد. برای ایجاد یونها در محیط ردیابی ذرات نرم افزار CST، تابنده ای شکل

۱. Immersion Lens



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سه چیدمان مختلف آهنربای دائمی اطراف چشمه (الف) جانبی، (ب) دربرگیرنده استوانه‌ای و (ج) دربرگیرنده دو و سه حلقه‌ای.

ایجاد یونش و شکل‌گیری یون‌ها می‌شود. استفاده از میدان مغناطیسی همراه با میدان الکتریکی باعث افزایش مسیر حرکت الکترون‌ها و افزایش برخورد‌ها و در نهایت افزایش بازده یونش در چشمه می‌شود. عوامل مختلفی مانند نحوه چیدمان آهنرباها، طول و شدت میدان مغناطیسی آنها بر باریکه خروجی از چشمه مؤثر هستند. که در ادامه به تأثیر این عوامل می‌پردازیم.

۷. چیدمان آهنرباها

چیدمان آهنرباها در چشمه‌های یونی را می‌توان به دو دسته ساختارهای جانبی و دربرگیرنده تقسیم کرد. در ساختارهای جانبی، آهنربا در کنار چشمه (پشت چشمه) قرار دارد و در ساختارهای دربرگیرنده آهنرباها اطراف چشمه (دور چشمه) قرار می‌گیرند [۲۲]. شکل ۴ سه چیدمان رایج آهنربای دائمی را نشان می‌دهد: (الف) چیدمان جانبی (استوانه‌ای توپر)، (ب) دربرگیرنده استوانه‌ای و (ج) دربرگیرنده حلقه‌ای (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 ناشی از این اثر در بخشی از حجم چشمه کمتر صورت گیرد. این چیدمان زمانی مورد استفاده

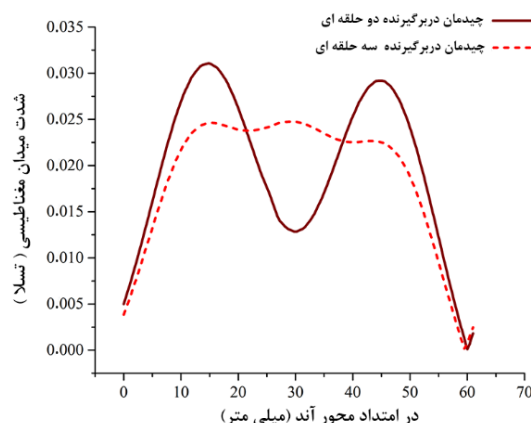
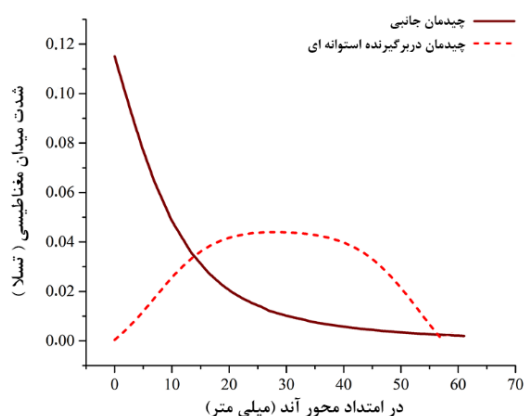
بیضی‌گون (با قطر بزرگ و کوچک به ترتیب ۱۲ و ۶ میلی‌متر) که از سطح آن پروتون‌های با انرژی نوعی ۱۰ الکترون‌ولت و در همه زوایا به طور یکنواخت با نرخ تابندگی ۱ آمپر ساطع می‌شود استفاده شده است. این تابنده در فضای چشمه یونی (روی مرکز محور آند) قرار گرفته و در ادامه تأثیر عوامل مختلف (مانند پتانسیل‌های اعمال شده به الکترودهای مختلف، میدان مغناطیسی و آرایش الکترودهای مختلف) بر پارامترهایی مانند چگالی جریان خروجی از چشمه، شدت نشر، قطر باریکه و فاصله کانونی باریکه بر مبنای المان‌های شش وجهی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

الف) اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد و تعیین قطر روزنه خروجی آنتی کاتد

یکی از عواملی که بر باریکه خروجی چشمه یونی اثر می‌گذارد، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد است. با بررسی چگالی جریان خروجی از چشمه و شدت نشر باریکه خروجی به ازای اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد در محدوده ۲۰۰-۷۰۰ ولت، بهینه مقدار پتانسیل برای آند و کاتد به ترتیب ۱۵+ و ۵۰۰- به دست آمده است [۲۱]. روزنه آنتی کاتد عامل دیگری است که بر باریکه خروجی از چشمه مؤثر است. 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 مقدار پتانسیل ۱۵+ ولتی برای آند و پتانسیل ۵۰۰- ولتی برای الکترودهای خروجی (آنتی کاتد)، بهینه مقدار قطر آنتی کاتد، که بر مبنای دو کمیت چگالی جریان خروجی از چشمه و شدت نشر باریکه خروجی است، ۶ میلی‌متر به دست آمده است.

ب) اثر میدان مغناطیسی بر روی چشمه یونی

همان‌طور که در مقدمه نیز بیان شد؛ برای تشکیل پلاسما، الکترون‌ها با گازهای موجود در چشمه برخورد کرده و باعث



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت میدان مغناطیسی روی محور آند برای چیدمان‌های جانبی و دربرگیرنده.

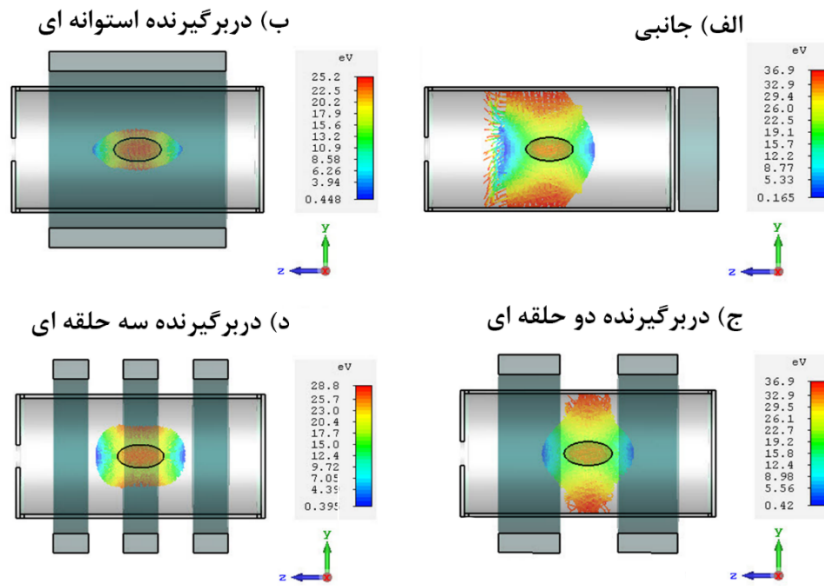
محصولسازی الکترون‌ها در چشمه، تابنده الکترونی استفاده شده و میدان مغناطیسی آهنرباها به یک صدم تسلا کاهش پیدا کرده است. مطابق با شکل ۶ و با توجه به این نکته که برخورد الکترون‌ها با هر کدام از اجزای چشمه (اتافک یونش) باعث آسیب رساندن به آن قطعات و همین طور به منبع تغذیه می‌شود، دو چیدمان جانبی و دربرگیرنده دو حلقه‌ای به علت برخورد الکترون‌ها با آند مناسب نیستند. چیدمان‌های دربرگیرنده استوانه‌ای و سه حلقه‌ای توزیع مناسبی از الکترون‌ها را ایجاد می‌کنند. بین این دو چیدمان نیز میزان محصولسازی الکترون‌ها در چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای بیشتر است. بنابراین شعاع چرخش الکترون کمتر و بازده یونش نیز کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه چیدمان دربرگیرنده سه حلقه‌ای برای محصولسازی الکترون‌ها مناسب‌تر است و در مراحل بعدی طراحی و شبیه‌سازی این ساختار در نظر گرفته خواهد شد.

۸. طول آهنرباها

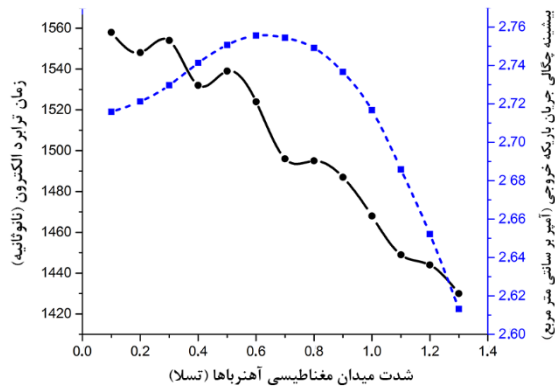
با افزایش طول آهنرباها در راستای محوری، شدت میدان مغناطیسی در اتافک یونش بیشتر می‌شود، هر چند که تقارن محوری توزیع الکترون‌ها تغییری نمی‌کند. از بررسی بیشینه زمان ترابرد الکترون‌ها در اتافک یونش و نیز بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه، بهینه مقدار برای طول آهنرباها ۸ میلی‌متر به دست می‌آید. شکل ۷ بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه و زمان ترابرد تعداد یکسانی الکترون را

قرار می‌گیرد که طراحی چشمه محدودیتی روی قطر آند اعمال کند. زمانی که باریکه‌ای با چگالی جریان زیاد مورد نیاز باشد، بازده یونش باید 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 مقدار نوعی نیم تسلا انتخاب شده است. توزیع میدان مغناطیسی محوری در ساختارهای دربرگیرنده را می‌توان با تغییر ساختاری آهنرباها از حالت استوانه‌ای به حلقه‌ای بهبود داد. شکل ۵ توزیع میدان مغناطیسی در امتداد محور آند را برای ساختارهای جانبی و دربرگیرنده نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، استفاده از چیدمان حلقه‌ای باعث می‌شود که توزیع میدان مانند آینه مغناطیسی عمل کرده و مولفه محوری سرعت الکترون‌هایی که از مکانی با شدت میدان کمتر به مکانی با شدت میدان بیشتر می‌روند، 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 [۲۲].

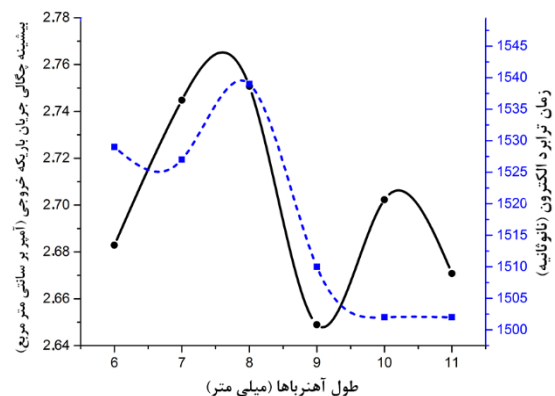
از آنجایی که بهره یونش با چگالی الکترون‌ها متناسب است و با توجه به این که جرم الکترون بسیار کمتر از جرم یون است، میدان مغناطیسی نیم تسلا (که اعمال آن در چشمه‌ها متداول است) ترابرد الکترون‌ها را به خوبی نشان نمی‌دهد و صرفاً برای نمایش اثر چیدمان آهنرباها بر



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نحوه توزیع الکترون در چیدمان‌های مختلف آهنرباهای دائمی.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه و زمان ترابرد الکترون ها بر حسب شدت آهنرباها.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه و زمان ترابرد الکترون‌ها.

از چشمه و زمان ترابرد یون‌ها را درون چشمه نشان می‌دهد. مطابق با نتایج شبیه‌سازی، بهینه مقدار شدت آهنرباها ۰/۶ تسلا است زیرا در این مقدار بیشینه چگالی جریان خروجی از چشمه ایجاد می‌شود در حالی که زمان ترابرد الکترون همچنان مقدار مناسبی است.

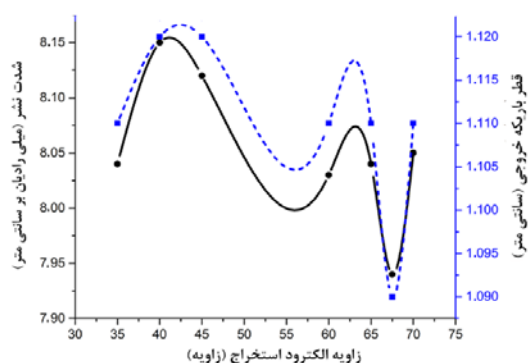
نشان می‌دهد (خطوط بین نقاط از درون‌یابی به روش اسپلاین به دست آمده است).

۹. شدت میدان آهنرباها

با در نظر گرفتن طول ۸ میلی‌متری برای آهنرباها، بهینه شدت میدان آنها بررسی می‌شود. شدت میدان مغناطیسی را می‌توان مهم‌ترین عامل در محصورسازی پلاسما در چشمه پنینگ بیان کرد. در چشمه پلاسما هر چه شدت میدان مغناطیسی بیشتر باشد، محصورسازی ذرات بیشتر است به عبارت دیگر با استفاده از آهنبرای قوی‌تر، شعاع چرخش ذرات باردار درون چشمه کمتر می‌شود. شکل ۸ بیشینه چگالی جریان خروجی

۱۰. سیستم استخراج

همان طور که در مقدمه نیز اشاره شد رایج‌ترین سیستم‌های استخراج در چشمه‌های یونی، سیستم‌های دو الکترودی (دیودی) و سه الکترودی (تریودی) هستند. در ادامه این دو سیستم و همچنین عوامل مؤثر بر باریکه خروجی از جانب



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت نشر و قطر باریکه خروجی بر حسب زاویه الکتروود استخراج در فاصله ۱۰ میلی متری از الکتروود استخراج.

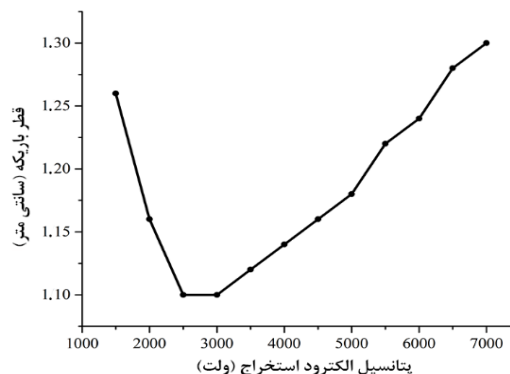
انجام می شود.

۱۳. زاویه الکتروود استخراج

پس از انتخاب ولتاژ استخراج ۳ کیلوولتی برای الکتروود استخراج، به بررسی اثر زاویه این الکتروود روی باریکه خروجی می پردازیم. طبق شکل ۱۰ زاویه ۶۷/۵ درجه، که به زاویه پیرس^۱ نیز معروف است، بهترین زاویه برای این الکتروود است [۲۳]. شدت نشر و قطر باریکه خروجی در این زاویه کمترین مقدار را دارد. از آنجایی که کوچک بودن این دو کمیت در انتقال مؤثر باریکه از چشمه به بخش بعدی سیستم تأثیر جدی دارند، محاسبات مربوطه به شبیه سازی ها از این مرحله به بعد با این زاویه انجام می شود.

۱۴. فاصله الکتروود استخراج از آنتی کاتد

با در نظر گرفتن پتانسیل ۳ کیلوولتی و زاویه ۶۷/۵ درجه برای الکتروود استخراج، در گام بعد فاصله بهینه بین الکتروود و آنتی کاتد مورد بررسی قرار می گیرد. افزایش این فاصله ممکن است منجر به برخورد باریکه خروجی به الکتروود استخراج شود. این اثر در شکل ۱۱ مورد بررسی قرار گرفته است، همان طور که در این شکل مشاهده می شود افزایش فاصله بین این دو الکتروود از ۱۴ میلی متر به بعد موجب برخورد باریکه به این الکتروود و در نهایت از دست



شکل ۹. قطر باریکه خروجی از الکتروود استخراج بر حسب پتانسیل.

سیستم استخراج بررسی می شود.

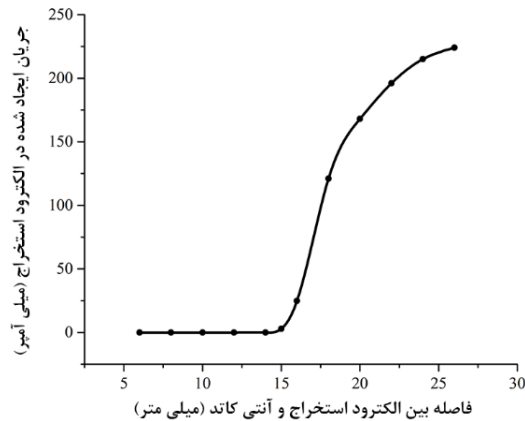
۱۱. سیستم دیودی

به منظور استخراج باریکه، الکتروود بعد از آنتی کاتد قرار می دهند. در این راستا بررسی عوامل مؤثر برای رسیدن به شرایط بهینه باریکه خروجی (به ازای الکتروود اضافه شده به سیستم) اهمیت دارد. این عوامل عبارتند از: پتانسیل الکتروود استخراج، زاویه الکتروود استخراج، فاصله الکتروود استخراج از آنتی کاتد و در نهایت طول الکتروود که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند.

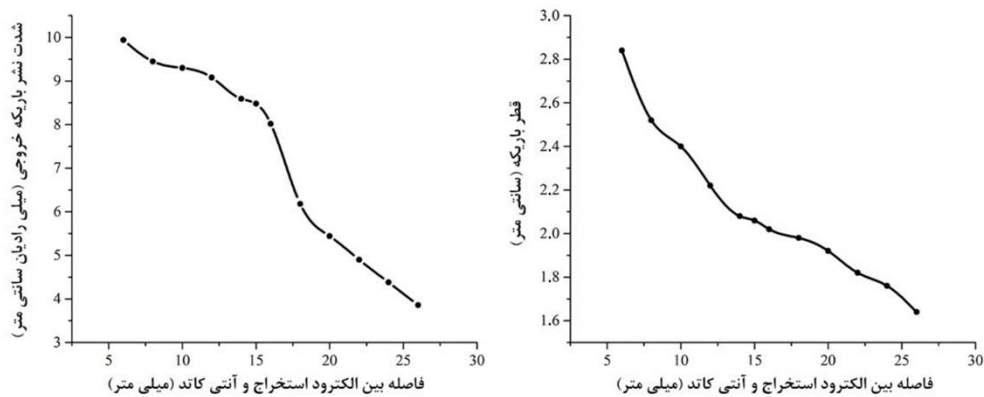
۱۲. پتانسیل الکتروود استخراج

برای بررسی اثر تغییر پتانسیل الکتروود استخراج بر باریکه خروجی، پارامترهای دیگر مثل زاویه این الکتروود و فاصله آن از آنتی کاتد را ثابت نگه داشته و مقادیر نوعی آنها به ترتیب ۶۷/۵ درجه و ۸ میلی متر انتخاب شده است. قطر باریکه یکی از عامل های مهم باریکه خروجی از چشمه است که می تواند متأثر از تغییر پتانسیل الکتروود استخراج باشد. شکل ۹ قطر باریکه را بر حسب پتانسیل الکتروود شتاب دهنده نشان می دهد. برای هندسه تعیین شده و مطابق با نتایج شبیه سازی، بهترین پتانسیل برای این الکتروود ۳ کیلو ولت و قطر دهانه الکتروود استخراج ۲۰ میلی متر انتخاب می شود. بنابراین بررسی های بعدی بر روی الکتروود استخراج با این مشخصات

۱. Pierce angle



شکل ۱۱. جریان ایجاد شده در الکترود استخراج بر حسب فاصله از آنتی کاتد.



شکل ۱۲. قطر باریکه و شدت نشر بر حسب فاصله بین الکترود استخراج و آنتی کاتد در فاصله ۴۰ میلی متری از الکترود استخراج.

۱۵. سیستم تریودی

سیستم استخراج تریودی با داشتن الکترود کند کننده انرژی باریکه را کاهش داده اما مانع واگرایی باریکه می شود و باریکه را برای ورود به سیستم انتقال آماده می کند. تغییر ساختار این الکترود نیز بر باریکه خروجی از سیستم استخراج مؤثر است که در ادامه، اینها مورد بررسی قرار می گیرد.

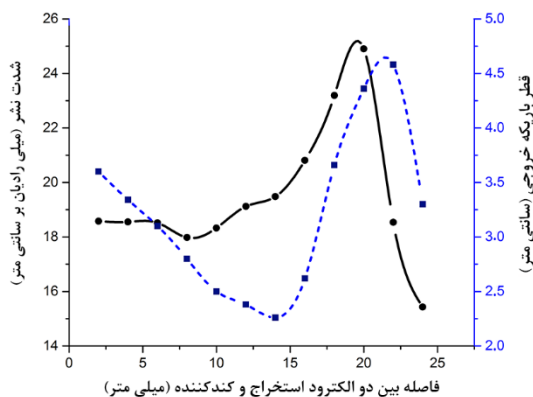
۱۶. پتانسیل الکترود کند کننده

پتانسیل این الکترود را می توان مهم ترین عامل مؤثر از جانب این الکترود بر باریکه خروجی نامید. با توجه به این که پتانسیل الکترود استخراج منفی ۳ کیلو ولت است، پتانسیلی که برای الکترود کند کننده انتخاب می شود باید منفی و از لحاظ مقداری کمتر از پتانسیل الکترود شتاب دهنده باشد. برای بررسی اثر تغییر پتانسیل این الکترود بر باریکه خروجی دیگر عوامل مؤثر مانند طول (در راستای محوری) و زاویه این

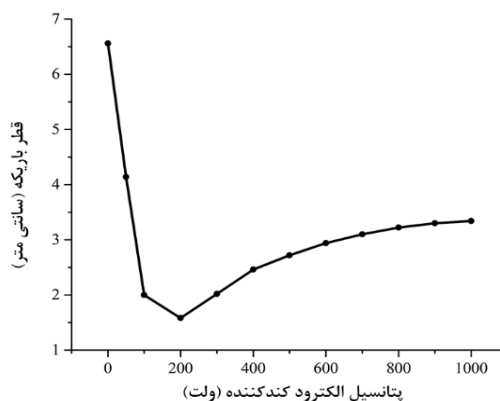
رفتن بخشی از باریکه می شود.

شکل ۱۲ قطر و شدت نشر باریکه خروجی را بر حسب فاصله بین الکترود استخراج و آنتی کاتد نشان می دهد. مطابق با این شکل شدت نشر و قطر باریکه، دو پارامتر مهم در بررسی باریکه خروجی از سیستم استخراج، نیز با افزایش فاصله الکترود استخراج از آنتی کاتد نسبت عکس دارند.

شدت نشر و قطر باریکه در فاصله ۵-۱۴ میلی متر به دلیل اثر لنزی الکترود استخراج، با افزایش فاصله الکترود استخراج از آنتی کاتد کاهش پیدا می کنند. علت کاهش قطر و شدت نشر باریکه از ۱۴ میلی متر به بعد، علاوه بر اثر لنزی الکترود استخراج، به برخورد باریکه به الکترود استخراج و کاهش باریکه خروجی برمی گردد. از آنجایی که از فاصله ۱۴ میلی متری به بعد یونهای خروجی با این الکترود برخورد دارند و این برخوردها با افزایش فاصله بیشتر می شود، فاصله بهینه بین این الکترود و آنتی کاتد ۱۴ میلی متر انتخاب شده است.



شکل ۱۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) شدت نشر و قطر باریکه خروجی بر حسب فاصله بین دو الکترود استخراج و کندکننده (میلی متر).



شکل ۱۳. قطر باریکه خروجی بر حسب پتانسیل الکترود کندکننده (ولت).

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 باریکه خروجی از آن است. با بررسی قطر باریکه مناسب‌ترین فاصله بین دو الکترود استخراج و کندکننده ۱۴ میلی‌متر انتخاب شده است.

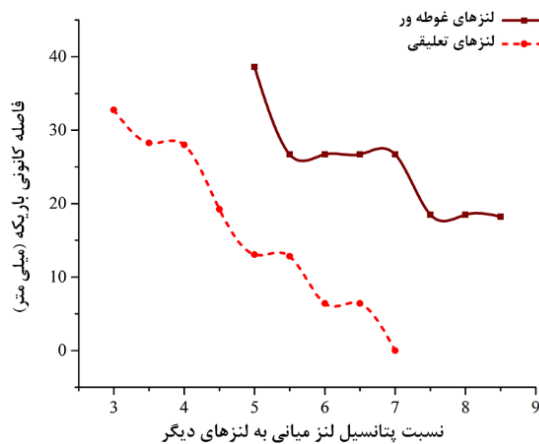
۱۸. تعیین ابعاد الکترود کند کننده

قطر دهانه این الکترود با توجه به قطر دهانه الکترود استخراج انتخاب می‌شود. قطر دهانه این الکترود باید بزرگ‌تر از قطر دهانه الکترود استخراج باشد. انتخاب مقادیر کوچک برای این الکترود باعث برخورد باریکه به این الکترود می‌شود. از طرفی قطر دهانه الکترود کند کننده، تعیین کننده قطر باریکه خروجی از آن نیز هست. با توجه به نکات ذکر شده، قطر ۲۰ میلی-متری برای دهانه این الکترود انتخاب می‌شود. با در نظر گرفتن پتانسیل ۲۰۰- ولت و فاصله ۱۴ میلی‌متری از الکترود استخراج و قطر ۲۰ میلی‌متری دهانه این الکترود، مناسب‌ترین زاویه برای این الکترود نیز ۶۷/۵ درجه (مطابق با شکل ۱۰) است و شبیه‌سازی‌های بعدی نیز با این مقدار انجام می‌شود. اثر تغییر طول این الکترود بر قطر باریکه خروجی پارامتر دیگری است که در شکل ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است. طبق این شکل طول‌های ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر، از آن جهت که باریکه قطر کمتری دارد، برای این الکترود مناسب است. هر چه طول این الکترود کمتر باشد، مولفه طولی میدان به میزان کمتری روی باریکه خروجی اثر می‌کند بنابراین انرژی باریکه

الکترود را ثابت و به ترتیب ۱۵ میلی‌متر و ۶۷/۵ درجه انتخاب می‌کنیم (دلیل این انتخاب در قسمت‌های آتی تشریح خواهد شد). شکل ۱۳ قطر باریکه به ازای تغییر پتانسیل این الکترود در فاصله نوعی ۳۰ میلی‌متری از آن را نشان می‌دهد. طبق این شکل کمترین قطر باریکه زمانی است که پتانسیل الکترود کند کننده ۲۰۰- ولت است. علت تغییر قطر و واگرایی باریکه خروجی از این الکترود تغییر مولفه عرضی (شعاعی) میدان الکتریکی شکل گرفته درون این الکترود است.

۱۷. فاصله الکترود کند کننده از الکترود استخراج

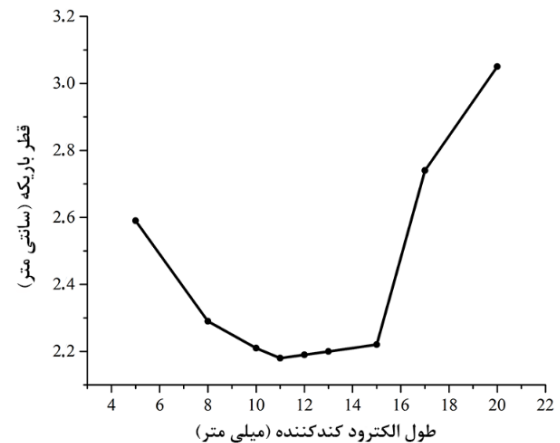
برای بررسی اثر فاصله الکترود کند کننده از الکترود استخراج؛ پتانسیل، طول، قطر دهان و زاویه این الکترود ثابت و به ترتیب ۲۰۰- ولت، ۱۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۶۷/۵ درجه (با توجه به اشکال ۱۰-۱۳) انتخاب می‌شوند. با تغییر فاصله بین الکترود کند کننده و استخراج مولفه عرضی میدان تغییر کرده و باعث تغییر قطر باریکه ورودی به الکترود کند کننده و نیز واگرایی آن در طول مسیر می‌شود. مولفه طولی میدان الکتریکی با تغییر فاصله بین الکترود کند کننده و استخراج تغییری نمی‌کند بنابراین انرژی باریکه خروجی از الکترود کند کننده تقریباً یکسان است. زمانی که فاصله این الکترود از الکترود استخراج زیاد شود (بیش از ۲۰ میلی‌متر) یونها با این الکترود برخورد می‌کنند بنابراین انتخاب این فاصله مناسب نیست. شکل ۱۴ شدت نشر و قطر باریکه را بر حسب فاصله الکترود کند کننده از الکترود استخراج نشان می‌دهد. طبق این



شکل ۱۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) فاصله کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای دیگر برای لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی.

می‌کند. توضیح میدان الکتریکی شکل گرفته بین لنزها دارای دو مولفه طولی و عرضی (شعاعی) است. افزایش مولفه طولی میدان باعث شتاب گرفتن باریکه می‌شود. از سویی دیگر هر چه مولفه عرضی میدان بیشتر باشد، فاصله کانونی باریکه خروجی از لنزها کاهش پیدا می‌کند. با افزایش نسبت پتانسیل بین لنزها فاصله کانونی باریکه کوچک‌تر می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد که در سیستم انتقال باریکه، بهینه طول و فاصله بین لنزها بر حسب قطر آنها انتخاب می‌شود و مقدار آنها به ترتیب یک دوم و یک چهارم قطر است [۱۶]. قطر لنزها بزرگ‌تر از قطر باریکه ورودی، که در اینجا ۲۰ میلی‌متر است، ۳۰ میلی‌متر انتخاب می‌شود. بنابراین طول و فاصله بین لنزها نیز به ترتیب ۱۵ و ۷/۵ میلی‌متر است. شکل ۱۶ فاصله کانونی باریکه خروجی از لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی را بر حسب نسبت پتانسیل بین آنها نشان می‌دهد. طبق این شکل استفاده از لنزهای تعلیقی برای کانونی کردن باریکه مفیدتر از لنزهای غوطه‌ور هستند.

در لنزهای تعلیقی اگر قطر لنز میانی کمتر از دو لنز دیگر باشد، سیستم در مد شتاب دهنده- کند کننده عمل می‌کند و در صورتی که بیشتر باشد، در مد کند کننده- شتاب دهنده قرار دارد. اگر قطر هر سه لنز برابر باشد، سیستم در مد نرمال قرار دارد. شکل ۱۷ فاصله کانونی باریکه را بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای اطراف در مدهای مختلف نشان



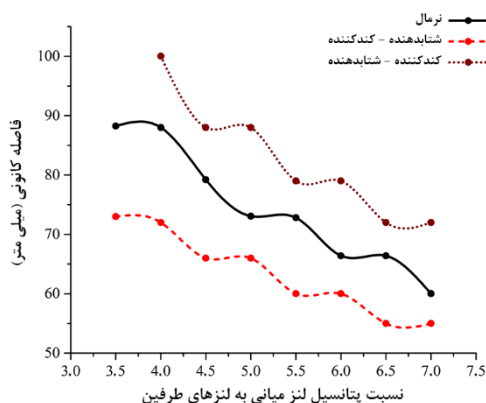
شکل ۱۵. قطر باریکه خروجی از الکتروود کند کننده بر حسب طول این الکتروود.

کمتر کاهش پیدا می‌کند. از سویی دیگر با افزایش طول این الکتروود مولفه عرضی میدان اثر بیشتری بر باریکه داشته، آن را بیشتر به سمت محور جمع می‌کند. در نتیجه طول این الکتروود را می‌توان طبق پارامترهای مورد نیاز باریکه خروجی از آن تعیین کرد. برای شبیه‌سازی‌های بعدی مقدار ۱۵ میلی‌متر برای طول این الکتروود انتخاب می‌شود.

برای افزایش انرژی باریکه‌ای که توسط الکتروود کند کننده همگرا شده، از الکتروودی تحت عنوان الکتروود شتاب دهنده استفاده می‌شود که از لحاظ شکل هندسی شبیه الکتروود کند کننده است با این تفاوت که در پتانسیل بیشتری نسبت به آن قرار دارد. همچنین این الکتروود در ترکیب با الکتروود کند کننده باعث موازی شدن باریکه ورودی به سیستم انتقال خواهد شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای ادامه کار پتانسیل این الکتروود ۲ کیلو ولت انتخاب می‌شود [۲۱].

۱۹. سیستم انتقال باریکه

باریکه خروجی از الکتروود شتاب دهنده توسط مجموعه‌ای از لنزهای الکترواستاتیکی، مانند لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی، برای انتقال به سیستم بعدی آماده سازی می‌شود. در سیستم لنزهای غوطه‌ور و تعلیقی افزایش پتانسیل لنزها مؤثرترین راه برای کاهش قطر باریکه است [۱۷ و ۱۹]. با افزایش پتانسیل لنز دوم در واقع نسبت پتانسیل بین لنزها تغییر



شکل ۱۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) فاصله کانونی باریکه بر حسب نسبت پتانسیل لنز میانی به لنزهای اطراف در سیستم تعلیقی و برای مدهای مختلف.

جدول ۱. پارامترهای خروجی از چشمه یونی پنینگ.

خروجی (در ۱۰ میلی متری)		اتاقک یونش	سیستم استخراج	
۳۰۰	انرژی (الکترون ولت)			الکتروود استخراج
۱/۰۵	قطر (سانتی متر)			
۲۲/۴	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)			
۴۰۰	انرژی (الکترون ولت)	الکتروود کندکننده		
۱/۲۸	قطر (سانتی متر)			
۷/۸۵	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)			
۴۰۰	انرژی (الکترون ولت)	الکتروود شایدهنده		
۱/۵۴	قطر (سانتی متر)			
۲۴/۶	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)			
۱۵۰۰	انرژی (الکترون ولت)	لنزهای تعلیقی		
۲/۰۷	قطر (سانتی متر)			
۹/۱۲	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)			
۳۶۰۰	انرژی (الکترون ولت)	لنزهای تعلیقی		
۱/۱۳	قطر (سانتی متر)			
۶/۴۳	شدت نشر (میلی رادیان سانتی متر)			

۲۰. نتیجه گیری

در این مقاله جنبه های مختلف طراحی یک چشمه یونی پنینگ بررسی شد. در اصل دو جنبه برای مطالعه و طراحی چشمه یون وجود دارد: تولید یون و استخراج یون [۲۴]. با تأکید بر روی این دو جنبه، بخش های مختلف چشمه نوعی

می دهد. طبق این شکل با کاهش قطر لنز میانی و قرار دادن لنزها در مد شتاب دهنده- کند کننده، با اعمال پتانسیل کمتری (نسبت به مدهای دیگر) می توان به فاصله کانونی مورد نظر رسید. پارامترهای خروجی هر یک از بخش های چشمه یونی پنینگ جدول ۱ نشان داده شده است.

سیستم‌های دیودی و تریودی بررسی و شبیه‌سازی شدند. تعیین پتانسیل بهینه و همچنین هندسه مناسب در تعیین پارامترهای خروجی باریکه نقش مهمی را ایفا می‌کند. نتایج نشان دادند، بهترین زاویه برای الکتروود شتاب دهنده که در آن باریکه با کمترین شدت نشر و قطر خارج می‌شود، ۶۷/۵ درجه است. همچنین قطر باریکه در سیستم تریودی نسبت به سیستم دیودی کمتر است و بهترین پتانسیل برای الکتروود شتاب دهنده و کند کننده در این سیستم به ترتیب ۳۰۰۰ و ۲۰۰ ولت است. برای کانونی کردن باریکه، استفاده از لنزهای تعلیقی مناسب‌تر از سایر لنزها است. با کاهش قطر لنز میانی و قرار دادن لنزها در مد شتاب دهنده- کند کننده، با اعمال پتانسیل کمتری می‌توان به فاصله کانونی مورد نظر بر روی هدف رسید.

پنینگ در محیط ترابرد ذره نرم‌افزار CST طراحی و شبیه‌سازی شده است. عوامل مختلف مؤثر بر باریکه خروجی در هر مرحله در نظر گرفته شده است تا بهینه مقدار برای هر پارامتر به دست آید و مقادیر بهینه به دست آمده در هر مرحله، در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا اثر چیدمان‌های مختلف آهنربای دائمی در افزایش یونش و محصورسازی ذرات در چشمه یونی پنینگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که توزیع میدان مغناطیسی درون چشمه در چیدمان دربرگیرنده استوانه‌ای به علت ایجاد یونش در کل حجم آند، نسبت به چیدمان جانبی، مفیدتر است. توزیع میدان مغناطیسی و ایجاد آینه مغناطیسی در چیدمان دربرگیرنده حلقه‌ای، موجب افزایش گیراندازی ذرات درون چشمه و در نتیجه افزایش بازده یونش می‌شود. همین‌طور مهم‌ترین سیستم‌های استخراج باریکه در چشمه یونی شامل

مراجع

11. Y H Yeon et al., "Development Study of Penning Ion Source for Compact 9 MeV Cyclotron", Proceedings of Cyclotrons 2013, Vancouver, BC, Canada.
۱۲. ر صلحجو و همکاران، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲، ویژه نامه، تابستان ۱۳۹.
13. W He et al., *Review of Scientific Instruments*, **77**, 3 (2006) 03A330.
14. M Abdelrahman et al., *Chinese physics C* **36**, 4 (2012) 344.
15. B A Soliman et al., *Chinese Physics C* **35**, 1 (2011) 83.
16. H Liebl, "Applied Charged Particle Optics". Springer. Chapter 1 (2008).
17. M Abdelrahman, *Ain Shams Engineering Journal*, **3**, 1 (2012) 71.
18. I G Brown, "The physics and technology of ion sources", John Wiley & Sons (2004) Chapter 5.
19. M Rashid, "Simple analytical method to design electrostatic einzel lens", in Proceedings of the DAE Symp. On Nucl. Phys. **56**, (2011) 1132.
20. T Schenkel, Q Ji, A Persaud, and A V Sy, "Advanced penning ion source", (2016), 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>.
۲۱. م مسلمی پورکانی، "طراحی و شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر خروجی یک چشمه یونی پنینگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۶).
1. C L Ndlangamandla, "The design, development and fabrication of a Microwave Proton Ion Source at iThemba LABS", M.Sc. Thesis, University of Zululand (2006).
۲. م مسلمی پورکانی، ابراهیمی بسابی و م سوهانی، "بررسی ترابرد باریکه یونی از یک چشمه یونی بر اساس لنزهای الکترواستاتیکی تعلیقی و منفرد" کنفرانس فیزیک ایران (۱۳۹۶).
3. A V Sy, "Advanced Penning-type ion source development and passive beam focusing techniques for an associated particle imaging neutron generator with enhanced spatial resolution", dissertation, University of California, Berkeley, (2013).
4. Z Yang et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **685** (2012) 29.
5. B K Das and A Shyam, *Review of Scientific Instruments*, **79**, 12 (2008) 123305.
6. L Jidong, Y Zhen, D Pan, H Xiaozhong, and Z Kaizhi, *Nuclear Science and Techniques*, **24**, 4 (2013) 40201.
7. J Yu, J Yan, Z Song, Z Wang, and W Zhao, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **531**, 3 (2004) 341.
8. W He et al., *Review of scientific instruments*, **77**, 3 (2006) 03A330.
9. Z Nouri, R Li, R Holt, and S Rosner, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **614**, 2 (2010) 174.
10. T Wang et al., *Review of Scientific Instruments*, **83**, 6 (2012) 063302.

- tools for modelling negative hydrogen ion source extraction systems*”, *Research report/Department of Physics, University of Jyväskylä* (2013).
24. K D Basanta and Sh Anurag, *Review of Scientific Instruments*, **79** (2008) 123305.
۲۲. م مسلمی پورکانی، ا ابراهیمی بسابی، م سوهانی. "بررسی چیدمان‌های آهنربای دائمی در چشمه یونی پنینگ"، سومین کنفرانس ملی شتابگرهای ذرات و کاربردهای آن (۱۳۹۶).
23. T Kalvas, “*Development and use of computational*