

## طراحی و شبیه‌سازی ستون شتابدهنده دوترونی الکترواستاتیکی ۲MV

پیوند طاهرپرور<sup>۱\*</sup> و جواد رحیقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشکده ذرات و شتابدهنده‌ها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران.

\*گیلان، رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کدپستی: ۴۱۳۳۵-۱۹۱۴۱

پست الکترونیکی: p.taherparvar@guilan.ac.ir

### چکیده

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی ستون بهینه یک شتابدهنده برای تولید باریک‌های پروتون و دوترون با انرژی ۲MeV ارائه شده است. در طراحی این شتابدهنده، از هندسه شتابدهنده و اندوگراف سازمان انرژی اتمی و کدهای رایانه‌ای Virtual Device، SIMION 7.0 و SIMION Toolkit در طراحی الکترودها و شبیه‌سازی میدان‌های الکترواستاتیکی استفاده شده است. در این ستون، باریک خارج شده از چشمه یونی توسط الکترودهای اولیه که هر یک در پتانسیل کمتری نسبت به الکترودهای پیشین قرار دارند، به صورت همگرا وارد ستون شتابدهنده می‌شود، سپس از طریق الکترودهای همسان شتابدهنده و سپس لوله هدایت‌کننده پس از رسیدن به انرژی مورد نظر به هدف برخورد می‌نماید. در این مقاله، به کمک شبیه‌سازی‌های انجام گرفته و مقایسه آن با فیزیک مسئله، به مطالعه دینامیک رفتار باریک در میدان الکترواستاتیکی و نیز اثرات هندسه متفاوت الکترودها بر کیفیت باریک خروجی درون ستون به کمک امیتانس باریک، پرداخته شده است.

کلیدواژه‌گان: SIMION، باریک، امیتانس، الکترودها.

### ۱. مقدمه

خطی محسوب می‌شوند که در آن ذرات باردار به کمک اعمال میدان‌الکتریکی تولیدشده توسط اختلاف پتانسیل اعمالی به الکترودهای آن، شتاب می‌گیرند. این شتابدهنده‌ها در ابتدا در زمینه پژوهش‌های فیزیک هسته‌ای مورد بهره‌برداری قرار گرفتند اما با پیشرفت تکنولوژی شتابدهنده‌ها، و دستیابی به انرژی‌های زیاد، به پژوهش‌های کاربردی و میان رشته‌ای محدود شدند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای اینگونه از

امروزه استفاده از شتابدهنده‌های کم‌انرژی در موارد پرتو-درمانی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی و ضایعات ارگان‌های متفاوت و پیشگیری گسترش ضایعات مورد توجه است. هدف از استفاده از این ابزار تولید ذرات و یا فوتون‌های پرتو و هدایت آن‌ها به سمت هدف مورد نظر است. شتابدهنده‌های الکترواستاتیکی یکی از انواع شتابدهنده‌های

حجم اشغال شده در فضای فاز توسط ذرات باردار را نشان می‌دهد، اما معمولاً امیتانس را برحسب مکان و زاویه عرضی ذرات ترسیم می‌نمایند (فضای مسیر). زیرا زاویه عرضی ذرات به سهولت قابل اندازه‌گیری است [۲]. به کمک این شبیه‌سازی‌ها، بررسی شکل بهینه الکترودهای ستون موجود انجام گرفته و نقش هر یک از آن‌ها تعیین شده است.

## ۲. اجزای شتابدهنده

قسمت‌های مهم یک شتابدهنده، شامل ستون شتابدهنده و چشمه یون می‌باشد که در واقع قلب یک شتابدهنده را تشکیل می‌دهند. این ستون دارای ۵۸ الکتروده می‌باشد که توسط عایق‌هایی از یکدیگر جدا شده‌اند. در این سیستم، ولتاژ ۲MV بین الکترودها به‌طور مساوی تقسیم شده است که تغییرات میدان الکتریکی یکنواختی را برای شتاب دادن به ذرات باردار فراهم می‌کند، نکته مهم در طراحی این ستون ایجاد باریکه‌ای پیرامحور است که برای تشخیص آن از امیتانس باریکه در نقاط مختلف ستون استفاده شده است. در باریکه پیرامحور، حرکت عرضی ذرات تشکیل‌دهنده باریکه، مستقل از حرکت طولی می‌باشد [۲].

### ۱.۲. چشمه یونی فرکانس رادیویی<sup>۱</sup>

یک چشمه یونی از نوع فرکانس رادیویی، یون‌های مثبت پروتون یا دوترون را برای تزریق به درون ستون شتابدهنده تولید می‌کند. در این چشمه، الکترون‌های تولید شده میان دو آنتن RF<sup>۲</sup> شروع به حرکت نوسانی می‌کنند که برخورد بین الکترون‌ها و ذرات گاز موجود در چشمه یون موجب تشکیل پلاسمای حاوی یون‌های H<sup>+</sup>، H<sub>2</sub><sup>+</sup> یا D<sup>+</sup>، D<sub>2</sub><sup>+</sup> می‌گردد. یون‌های تولید شده با قرار گرفتن در اختلاف پتانسیل میان آند و الکتروده اول ستون شتابدهنده («الکتروده استخراج‌کننده»)، از

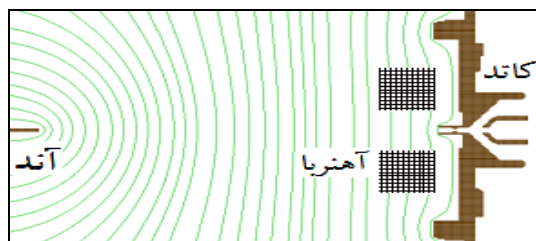
شتابدهنده‌ها در روش BNCT بر پایه شتابدهنده است، که به کمک شتاب پروتون و دوترون و بهره‌گیری از هسته‌های مناسب در هدف (مانند واکنش‌های  $T(d,n)$ ،  ${}^9Be(d,n)$ ،  ${}^7Li(p,n)$  و  $D(d,n)$ ) نوترون‌های پرنرژی برای تابش به بافت مورد نظر تولید می‌گردند. از کاربردهای مهم دیگر آن، آنالیز باریکه یونی برای تعیین غلظت عناصر تشکیل‌دهنده هدف و یا نحوه توزیع این عناصر به کمک روش‌هایی مانند آنالیز پیکسی، پس‌پراکندگی رادرفورد، کانال‌زنی یونی و PIGE است [۱،۲]. از نمونه کاربردهای پزشکی روش آنالیز باریکه یونی نیز می‌توان به ارزیابی نمونه‌های بیولوژیکی بیماران برای تشخیص بیماری‌های مانند تالاسمی و ویلسون به کمک بررسی میزان آهن و مس در کبد اشاره نمود [۳،۴].

با توجه به موارد یادشده، یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند بر افزایش بازده عملکرد شتابدهنده‌ها تأثیرگذار باشد، کیفیت باریکه خروجی شتاب یافته است. در این مقاله به کمک بررسی الکترودهای ستون شتابدهنده و اندوگراف سازمان انرژی اتمی (شتابدهنده ۳MeV و اندوگراف ساخت شرکت High Voltage Engineering) به طراحی و شبیه‌سازی بهینه یک ستون شتابدهنده برای شتاب‌دهی ذرات سبکی مانند پروتون و دوترون تا انرژی ۲MeV و همچنین نحوه آرایش خطوط هم‌پتانسیل حاصل از الکترودها به کمک نرم‌افزارهای SIMION7.0W [۵]، VIRTUAL DEVICE [۵] و TOOLKIT SIMION [۶] پرداخته شده است.

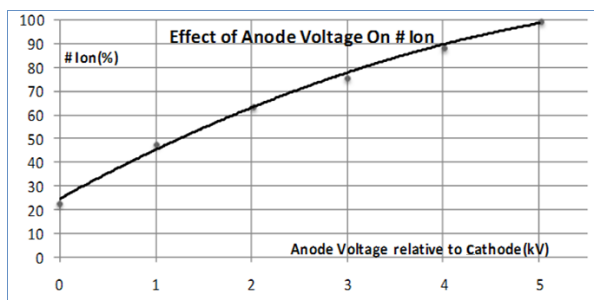
در این مطالعه همچنین به کمک شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته و مقایسه آن با فیزیک مسأله، به مطالعه دینامیک رفتار باریکه در میدان الکترواستاتیکی و نیز تأثیرات هندسه متفاوت الکترودها بر کیفیت باریکه خروجی درون ستون (به کمک بررسی امیتانس باریکه) مورد توجه قرار گرفته است. امیتانس

<sup>1</sup> Radio-Frequency Ion Source

<sup>2</sup> Radio-Frequency



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) آرایش خطوط هم پتانسیل الکترواستاتیکی در داخل چشمه یون، (ب) نمودار درصد یون‌های استخراجی از چشمه یون درازای ولتاژهای متفاوت الکتروند آند توسط SIMION.

## ۲.۲. نقش الکترودها در عملکرد ستون شتابدهنده

عملکرد کلی الکترودهای فلزی به صورتی است که با ایجاد یک پتانسیل متقارن-محور، باریکه‌ای پیرامون تولید کرده و با هدایت این باریکه به سمت هدف، ضمن آنکه از رشد شعاعی آن جلوگیری می‌نماید، انرژی باریکه را به میزان دلخواه می‌رساند. توصیف مسیر حرکت ذرات در عبور از عدسی‌های الکترواستاتیکی در حالت غیر نسبیتی و بدون حضور میدان مغناطیسی توسط معادله Picht بیان می‌شود [۹].

$$\frac{d^2 R}{dz^2} + \frac{3}{16} \left[ \frac{V'}{V} \right]^2 R = 0 \quad (1)$$

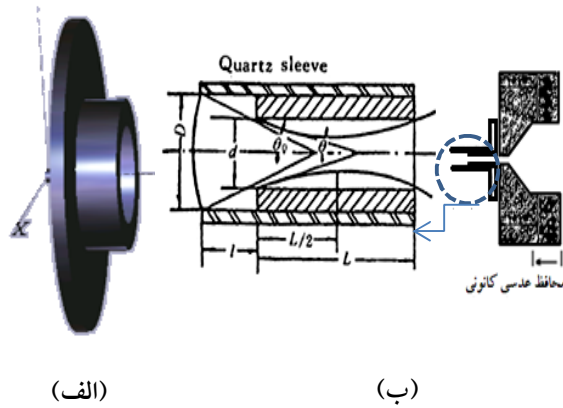
که در آن،  $V$  پتانسیل محوری و  $R=rV^{1/4}$  به‌عنوان مسیر کاهشی ذره ذکر می‌شود که جابه‌جایی عرضی از محور را نشان می‌دهد. کد SIMION نیز ابتدا به روش تفاضل محدود

چشمه یون خارج می‌شوند و تشکیل باریکه یونی می‌دهند [۲،۷،۸].

این چشمه یون به دلیل جریان زیاد پروتون تولیدی، عمر زیاد، کارکرد ساده، درصد نسبی یون زیاد و مصرف کم گاز به‌طور گسترده در شتابدهنده‌های واندوگراف و کوکرافت والتون به کار گرفته می‌شود [۷].

شبیه‌سازی چشمه یون و آرایش خطوط هم‌پتانسیل آن (شکل ۱) نشان می‌دهد که یون‌های تولید شده با هر انرژی و راستای حرکت اولیه در اثر اختلاف پتانسیل بین آند و الکتروند اول (حداکثر ۵kV) به سمت الکتروند اول شروع به حرکت می‌کنند. ضمن آنکه میدان مغناطیسی ایجاد شده (در حدود ۵۰ گاوس) توسط آهنرباهای نشان داده شده در شکل ۱ باریکه را هرچه بیشتر به سوی حفره آند سوق می‌دهد و نقش مضاعفی برای جلوگیری از ورود الکترون‌ها به داخل ستون و همچنین یونش گاز ورودی به چشمه یون ایفا می‌کند.

در شبیه‌سازی چشمه یون سعی شده تا مکان تولید یون‌ها به گونه‌ای انتخاب شود تا پوش باریکه (مرزهای مربوط به فضای هندسی اشغال شده توسط حرکت باریکه در ستون شتابدهنده) در ستون، بیشینه مقدار خود را اختیار کند. در سیستم شتابدهنده الکترواستاتیکی طراحی شده، برای تنظیم جریان خارج شده از چشمه یون، اختلاف ولتاژ میان دو سر چشمه یون از ۰ تا ۵ کیلوولت قابل تغییر است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این تغییرات در تعداد ذرات خروجی به کمک نرم افزار SIMION در شکل ۱ قسمت ب نشان داده شده است. همانطور که قابل انتظار است بر تعداد یون‌های خروجی از چشمه یون، با افزایش ولتاژ دو سر آن افزوده می‌گردد.

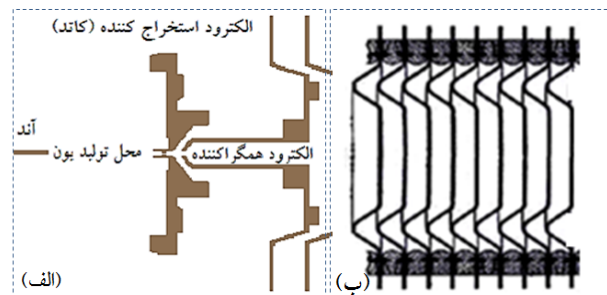


شکل (۳): (الف) طرح سه بعدی الکتروود استخراج کننده توسط نرم افزار VIRTUAL DEVICE، (ب) دو قسمت تشکیل دهنده الکتروود اول به صورت مجزا.

به طور کلی می توان این الکتروود را شامل دو قسمت با عملکردهایی متفاوت اما مکمل یکدیگر در نظر گرفت (شکل ۳ قسمت ب). ابتدای این الکتروود به گونه ای طراحی شده، که پذیرش بسیار کوچکی برای پلاسمای تولید شده در چشمه یون فراهم نموده و در نهایت باریکه ای پیرامحور ایجاد شود. در سیستم استخراج کننده حفره ای، قانون بسیار مهمی وجود دارد که مانع از شارش ذرات از پلاسمای داخل ستون به سبب بارهای فضایی می گردد (قانون چایلد-لانگمیر). این محدودیت به وجود آمده می تواند به واسطه میدان الکتریکی طولی ناشی از ذرات باردار باریکه [۱۰] و از طرفی دیگر میان اندازه حفره و چگالی پلاسمای تولیدی در چشمه یون باشد، که می تواند سطح پلاسمای تشکیل شده در ابتدای حفره (مینسکس پلاسمای) را به صورت محدب، صاف و یا مقعر درآورد که این امر، اثر مؤثری بر شکل باریکه خروجی می گذارد و در واقع علاوه بر همگرایی باریکه، سبب کاهش اتلاف باریکه در ستون می گردد [۱۰-۱۲].

شکل کلی این حفره استخراج کننده همانطور که در شکل ۳ قسمت ب نشان داده شده است توسط چهار فاکتور  $L$ ،  $d$ ،  $D$  و  $l$  معین می گردد، که  $d$  و  $D$  به ترتیب قطر لوله کوارتز و الکتروود اول،  $l$  میزان فاصله لبه کوارتز تا الکتروود اول و  $L$  طول

(FDM<sup>۱</sup>) پتانسیل را در نقاط مختلف محاسبه نموده و سپس به کمک معادله فوق مسیر حرکت ذرت را مشخص می نماید. به طور خلاصه می توان گفت در ستون شتاب دهنده های الکترواستاتیک باریکه خارج شده از چشمه یونی توسط الکتروود استخراج کننده (الکتروود اول) وارد ستون شتاب دهنده می شود (شکل ۲ قسمت الف). پس از همگرا شدن باریکه توسط الکتروود و یا الکتروودهای همگرا کننده (شکل ۲ قسمت الف) که هر یک در پتانسیل کمتری نسبت به الکتروود پیشین قرار دارند، باریکه از طریق الکتروودهای شتاب دهنده به انرژی مورد نظر می رسد شکل (۲ قسمت ب)، و از طریق لوله هدایت کننده (رانش) به هدف برخورد می نماید. بنابراین می توان چنین شتاب دهنده هایی را به دو بخش تقسیم نمود بخش اول که شامل الکتروودهای استخراج کننده و همگرا کننده است و بخش دوم که الکتروودهای همسان شتاب دهنده می باشند. الکتروود استخراج کننده (الکتروود اول ستون شتاب دهنده (شکل ۳) در تعامل با آند انتهای چشمه یون و الکتروود دوم، وظیفه استخراج باریکه و کانونی کردن آن را دارد. در طراحی های صورت پذیرفته این الکتروود در پتانسیل  $2MV$  قرار می گیرد و اختلاف پتانسیل مابین این الکتروود و الکتروود قرار داده شده در پشت چشمه یون (آند) حداکثر  $5 kV$  می باشد.



شکل (۲): نمایش شکل هندسی (الف) الکتروودهای استخراج کننده باریکه، همگرا کننده باریکه و (ب) شتاب دهنده باریکه.

<sup>1</sup> Finite Difference Method

فاصله‌ای کوتاه به کار می‌رود. بنابراین شیب این الکتروود باید به گونه‌ای باشد تا حالت بهینه‌ای را میان حالات یاد شده ایجاد نماید که شیب ۴۵ درجه که در ادامه به یک شاخه هذلولی ختم می‌شود به بهترین نحو این شرایط را ارضا می‌نماید [۱۵]، چنین حالتی در ستون شتابدهنده ۳MeV واندوگراف مشهود است [۱۶].

در انتهای سطح فنجان مانند الکتروود اول، سطحی صاف برای جلوگیری از نفوذ میدان‌های خارجی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳ قسمت ب) [۱۷]. پس از خروج ذرات باردار از چشمه یون، مسیر ذرات بر حسب نیروی وارد شده بر هر ذره متفاوت است و در واقع ذرات مسیری کاتوره‌ای را می‌پیمایند، لذا با استفاده از یک عدسی استوانه‌ای همگراکننده، ذرات همگرا می‌شوند. در شکل ۴ (قسمت الف و ب) این الکتروود به تصویر کشیده شده است.

در شکل ۴ (قسمت ج) از طرح خطوط هم‌پتانسیل حول الکتروود همگراکننده می‌توان دید که یک اثر قیف مانند بر روی یون‌های خارج شده از چشمه یون اعمال می‌شود. یعنی زمانی که یون خارج از محور قرار دارد جدا از نیروی محوری، نیرویی شعاعی را نیز احساس می‌کند که اثر کانونی کردن را ایجاد می‌نماید. طول کانونی این عدسی به طور تقریبی برابر با  $F \approx 4 V_F (dV/dx)^{-1}$  است.  $V_F$  پتانسیلی است که یون قبل از اینکه وارد الکتروود کانونی کننده شود، به آن شتاب می‌دهد و  $dV/dx$  شیب پتانسیل در طول کانال است. ولتاژ اعمالی به این الکتروود متغیر است که سبب تغییر نقطه کانونی باریکه در داخل ستون می‌گردد. به‌طور نمونه برای واندوگراف موجود، ولتاژ اعمالی به این الکتروود از ۱/۹۶ تا ۲MV در تغییر است.

در صورتی که اختلاف پتانسیلی مابین الکتروودها وجود نداشته باشد، باریکه در گذر از این ناحیه نیروی خالصی را تجربه نمی‌کند و بنابراین به سبب کمی واگرایی اولیه، به این واگرایی ادامه می‌دهد (شکل ۵ قسمت الف). در این حالت این

الکتروود اول می‌باشد [۷]. اگر فرض شود که باریکه با زاویه  $\theta$  حفره را ترک می‌کند در این صورت برای اجتناب از برخورد باریکه به دیواره حفره استوانه‌ای شکل، معادلاتی برای فاکتورهای یادشده بر اساس پروینس باریکه (P) و زاویه خروجی باریکه ( $\theta$ ) وجود دارد که به صورت زیر می‌باشد:

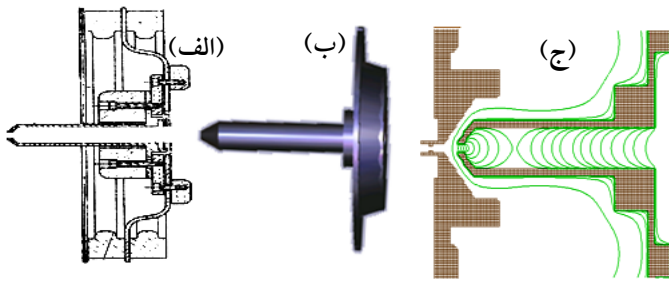
$$\frac{l}{d} \approx 2.1 \times 10^{-4} \frac{\cos \theta}{\sqrt{P \cdot \cos \theta}} \quad (2)$$

$$\frac{D}{d} \approx 1.25 + 8.3 \times 10^{-4} \frac{\sin(\theta/2)}{\sqrt{P}}$$

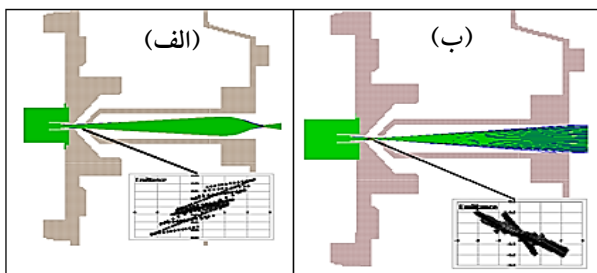
نسبت  $I/V^{3/2}$  به‌عنوان پروینس باریکه شناخته می‌شود که I جریان باریکه و V اختلاف پتانسیل میان الکتروودهای مجاور است، هر گاه مقدار پروینس کمتر از  $10^{-8} A/V^{3/2}$  باشد، می‌توان از اثرات بار فضایی چشم‌پوشی کرد و باریکه را به صورت پیرامحور در نظر گرفت [۱۳].

الکتروود اول به یک سطح فنجان مانند (شکل ۳ قسمت ب) ختم می‌شود که برای محاسبه شیب آن در مورد استخراج یون با سطح منیسکس غیرمسطح، باید معادلات مربوط به ناحیه‌ای که در ابتدای حفره استخراج کننده (شیث) تشکیل می‌شود را حل نموده و شرایط برای خارج نمودن موازی باریکه یونی در نظر گرفته شود، زیرا شیب این الکتروود تاثیر بسیار محسوسی در امیتانس باریکه دارد. البته برای طراحی نهایی آن در عمل باید الکتروود به گونه‌ای طراحی شود که در مقابل خوردگی نیز محافظت شود [۱۴].

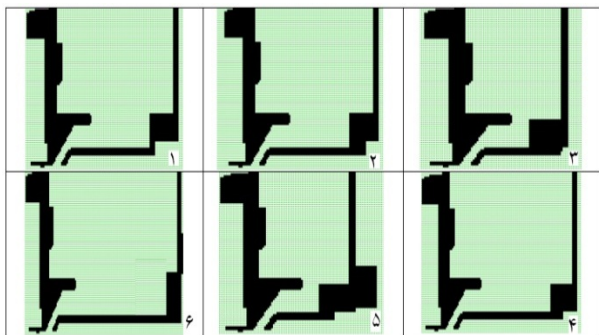
این شیب برای سطح گسیلنده الکترونی مسطح ۶۷/۵ درجه (هندسه Pierce) می‌باشد [۱۰]. اما از طرفی در شتابدهنده‌های الکترواستاتیک برای تغییر شعاع باریکه در هدف، ولتاژ الکتروود دوم نسبت به این الکتروود قابل تغییر است، بنابراین وظیفه اصلی این قسمت در هنگام ولتاژ یکسان با الکتروود دوم، ایجاد شکم‌های صفحات هم‌پتانسیل برای بیرون کشیدن یون است (عدسی الکترواستاتیک دهانه‌ای)، اما در ولتاژهای متفاوت، این بار عدسی تشکیل شده از دو الکتروود برای همگرایی باریکه در



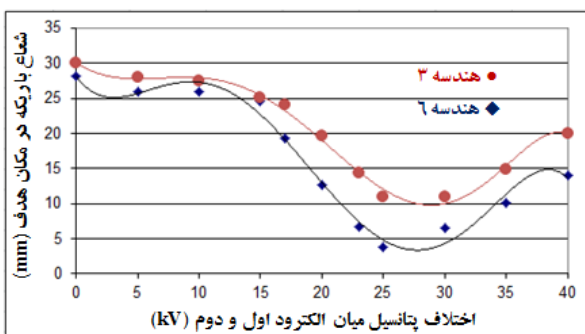
شکل (۴): (الف) الکتروود استخراج کننده؛ (ب) طرح سه بعدی الکتروود اول توسط VIRTUAL DEVICE؛ (ج): آرایش خطوط هم پتانسیل شکل گرفته توسط الکتروود دوم، توسط کد SIMION 7.0.



شکل (۵): چگونگی تأثیر الکتروود اول (الف) در اختلاف پتانسیل صفر و (ب) اختلاف پتانسیل غیر صفر، به کمک امیتانس باریکه (پایین تصاویر).



شکل (۶): نمایش هندسه های متفاوت الکتروود همگراکننده.



شکل (۷): مقایسه اندازه شعاع باریکه یونی در مکان هدف نسبت به تغییرات ولتاژ الکتریکی برای هندسه ۳ و هندسه ۶ الکتروود همگراکننده.

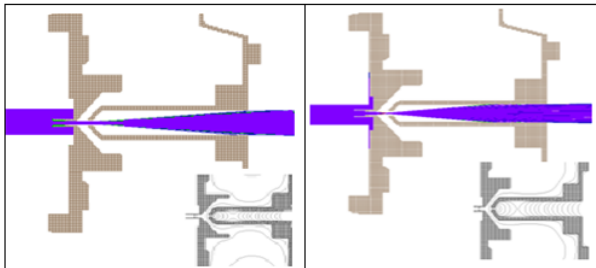
الکتروود نیز می تواند در نقش مردمک به کار رود، یعنی تنها به ذراتی از باریکه که در زاویه فضایی معینی قرار دارند، اجازه عبور دهد.

در حالتی که الکتروود دوم در پتانسیلی پایین تر از پتانسیل الکتروود اول قرار می گیرد (شکل ۵ قسمت ب)، دو الکتروود اول به صورت یک عدسی، باعث کانونی شدن باریکه در نقطه ای که وابسته به اختلاف پتانسیل این دو می باشد، می شوند.

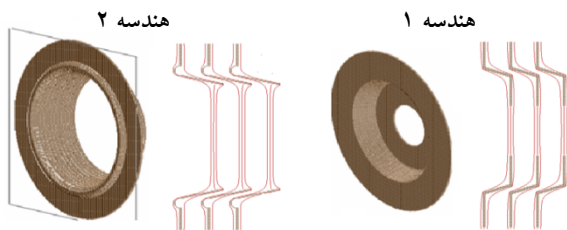
دهانه ورودی این الکتروود دارای شیب ۴۵ درجه می باشد که موجب تغییر آرایش خطوط هم پتانسیل به گونه ای می شود تا شعاع باریکه پس از عبور از قسمت مرکزی الکتروود دوم مقادیر کوچکتری را نسبت به حالتی که الکتروود دارای شیب قائمی است، اختیار کند. از طرفی دیگر شعاع و طول این الکتروود بر شعاع باریکه و شار ذرات فرودی بر هدف تأثیر می گذارد. نمونه ای از هندسه های در نظر گرفته شده را می توان در شکل ۶ مشاهده نمود که برگرفته از شکل این الکتروودها در شتابدهنده های مختلفی می باشد [۲، ۱۳].

شبیه سازی ها نشان داد با در نظر گرفتن هندسه شکل ۶ می توان باریکه را در میان ستون به طور مؤثرتر، و با ابیراهی کمتر همگرا نمود، زیرا خطوط مقعر هم پتانسیل با انحنای بیشتر و در فاصله بیشتر بر باریکه اثر می کند (شکل ۴). شکل ۷ مقایسه بین شعاع باریکه در هدف را برای دو هندسه ۳ و ۶ نشان می دهد، تفاوت بین این دو در شعاع باریکه بر روی هدف است و نمودار نشان می دهد که با افزایش طول الکتروود می توان بر باریکه تأثیر بیشتری نهاد که منجر به کاهش شعاع باریکه در هدف می شود.

نقاط مرکزی الکترودها همسان است و اگر باریکه‌ای پیرامحور باشد تأثیر هر دو هندسه بر آن یکسان خواهد بود اما هندسه ۱ در جلوگیری از برخورد ذرات ثانویه به عایق که از مهمترین عوامل در نقص عایق محسوب می‌شود، مؤثرتر است.



شکل (۸): آرایش خطوط هم‌پتانسیل (در قسمت پایین اشکال) و نمایش حرکت باریکه از میان آن برای شعاع‌های متفاوتی از الکتروود دوم و برخورد باریکه به الکتروود با شعاع کوچکتر (سمت راست).



شکل (۹): نمونه‌ای از الکترودهای شتابدهنده و شکل خطوط هم‌پتانسیل آن، شبیه‌سازی شده توسط کد SIMION 7.0.

حفاظت در برابر میدان‌های خارجی، جلوگیری از برخورد ذرات باریکه به عایق و چسب، جلوگیری از ایجاد جریان الکترونی و جلوگیری از تحت تأثیر قرار گرفتن باریکه در حضور بارهای سطحی از مهم‌ترین عوامل در استفاده از الکترودهای لبه‌دار در مورد الکترودهای شتابدهنده می‌باشد. ایجاد جرقه و شکست‌های الکتریکی محدودیتی است که در انتخاب فاصله میان الکترودها وجود دارد که با استفاده از معادله ۴ می‌توان میزان بهینه این فاصله را تعیین کرد [۱۹].

$$V=Cx^{\alpha} \quad (4)$$

که در آن  $V$  اختلاف پتانسیل میان دو الکتروود متوالی، ثابت  $\alpha$  بین ۰/۱ تا ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود و ثابت  $C$  نیز وابسته به

در هندسه شکل ۶ نیز اگر از شعاع الکتروود همگراکننده کاسته شود تقعر یاد شده در خطوط هم‌پتانسیل کم می‌شود، بنابراین باریکه به‌طور مؤثرتری در فاصله کانونی، همگرا می‌گردد. به‌طور نمونه برای شعاع ۷ میلی‌متری الکتروود همگراکننده (در پتانسیل ۲۰ kV- از الکتروود اول) شعاع دایره با کمترین اغتشاش در نقطه کانونی (که در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از ابتدای ستون تشکیل می‌گردد) برابر ۱/۴۲ میلی‌متر می‌باشد و این در حالی است که این شعاع برای الکتروود همگراکننده‌ای با شعاع ۱۱ میلی‌متر برابر ۱/۸۵ میلی‌متر است. اما باید توجه داشت در این صورت تعداد ذراتی که به الکتروود همگراکننده برخورد می‌نمایند در صورت کاهش شعاع این الکتروود افزایش می‌یابد و باعث کاهش شار ذرات فرودی بر روی هدف و کاهش عمر این الکتروود می‌گردد (شکل ۸). شبیه‌سازی‌ها نشان داد برای شعاع ۷ میلی‌متری، الکتروود همگراکننده حدود ۴۰٪ ذرات را نسبت به الکتروود با شعاع الکتروود همگراکننده ۱۱ میلی‌متر، از دست خواهد داد. البته باید توجه داشت، شعاع الکتروود استخراج‌کننده، ناحیه قابل دسترس در فضای مسیر برای ذراتی که انتقال می‌یابند (اکسپاناس باریکه [۲]) را معین می‌نماید و نقش مهمی در این زمینه ایفا می‌کند.

### ۳.۲. الکترودهای شتابدهنده

پس از همگرایی باریکه، شتاب دادن ذرات و رساندن آن‌ها به انرژی مطلوب مد نظر است. این الکترودها که تعداد آن‌ها وابسته به میزان انرژی مقرر شده برای باریکه و اختلاف پتانسیل مابین آن‌ها است، میدان الکترواستاتیکی یکنواختی در سیستم تولید می‌کنند، که این میدان‌ها، ذرات باریکه را شتاب می‌دهند و به انرژی مطلوب می‌رسانند.

در شکل ۹ نمونه‌هایی از این الکترودها نشان داده شده است، همانطور که دیده می‌شود شکل خطوط هم‌پتانسیل در

شیب پوش ذرات در فضای مسیر کمی تغییر می‌کند که این حالت برای نمودار ۵ در شکل ۱۰ قسمت الف کاملاً محسوس است.

نمودار ۶ در شکل ۱۰ قسمت الف، نمایانگر نقطه کانونی شدن باریکه است. در حالت ایده‌آل امیتانس باریکه در این نقطه به صورت یک خط عمودی است، اما به سبب ابیراهی‌های موجود، شکل حاصل در فضای مسیر ناهمگون است اما گرایش به سوی محور عمودی است. در انتهای مسیر به دلیل اینکه پس از نقطه کانونی قرار گرفته، ذرات تمایل به واگرایی دارند که نمودار ۷ شکل ۱۰ قسمت الف، بازگوکننده این امر است.

نمایش کانتور خطوط هم‌پتانسیل در شکل ۱۰ قسمت ب، از طرفی کاهش پتانسیل از الکتروود اول به الکتروود دوم را نشان می‌دهد که این کاهش تا آخرین الکتروود ستون شتابدهنده ادامه می‌یابد و نیز شکل خطوط پتانسیل در الکتروودهای اولیه، همگرایی باریکه در گذر از آن‌ها را به دنبال خواهد داشت.

با توجه به قابلیت تغییر اختلاف پتانسیل الکتروود همگراکننده نسبت به الکتروود استخراج‌کننده از ۰ تا ۴۰ ولت، اثرات این تغییر بر روی کیفیت باریکه خروجی مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱۱ می‌توان اشکال مربوط به امیتانس باریکه را در هدف به ازای مقادیر متفاوتی از این اختلاف پتانسیل مشاهده نمود. با توجه به شیب مثبت و کمتر از ۹۰ درجه در بیشتر نمودارها کاملاً پیدا است که باریکه‌ای واگرا در انتهای ستون قرار دارد که البته قابل انتظار است زیرا باریکه در نقطه‌ای در میان ستون کانونی می‌گردد و پس از نقطه کانونی باریکه‌ای واگرا وجود خواهد داشت (شکل ۱۰ قسمت الف).

مشاهده می‌شود در نموداری که مربوط به اختلاف ۳۰ کیلوولتی میان الکتروود اول و دوم می‌باشد، پوش باریکه در راستای محور عمودی است که این بیانگر آن است که باریکه

شدت میدان الکتریکی، فاصله بین الکتروودها و جنس آن‌ها می‌باشد. در اکثر سیستم‌ها  $\alpha$  بین ۰/۵ تا ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. در سیستم طراحی شده تعداد این الکتروودها ۵۶ عدد می‌باشد که فاصله خارجی آن‌ها ۱ اینچ و اختلاف پتانسیل مابین هر کدام ۳۵ kV می‌باشد، تا باریکه را به انرژی ۲MeV برساند.

### ۳. نتایج و بررسی نتایج

همانطور که پیش‌تر گفته شد، ستون شتابدهنده مجموعه‌ای از الکتروودهای اولیه و شتابدهنده است که این مجموعه را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده نمود. در شکل ۱۰ قسمت الف نحوه حرکت باریکه در داخل ستون به همراه اشکال مربوط به امیتانس باریکه در نقاط متفاوت ستون شتابدهنده ۲MV، و نیز نمایش کانتور خطوط هم‌پتانسیل (شکل ۱۰ قسمت ب) و همچنین نحوه عبور باریکه از الکتروودهای اولیه (شکل ۱۰ قسمت ج) را که توسط کد SIMION 7.0 شبیه‌سازی گشته، نشان داده شده است.

به کمک تغییرات امیتانس باریکه در سرتاسر ستون نحوه عملکرد کل ستون و فیزیک آن قابل تفسیر خواهد بود. از نمودارهای ۱ تا ۷ در شکل ۱۰ قسمت الف کاملاً پیداست که ابتدا باریکه تحت تأثیر عدسی حاصل از الکتروود اول و دوم در نقطه‌ای میان این دو الکتروود کانونی می‌گردد (نمودار ۱)، سپس باریکه مسیری را طی می‌کند که به واگرایی باریکه می‌انجامد (نمودار ۲).

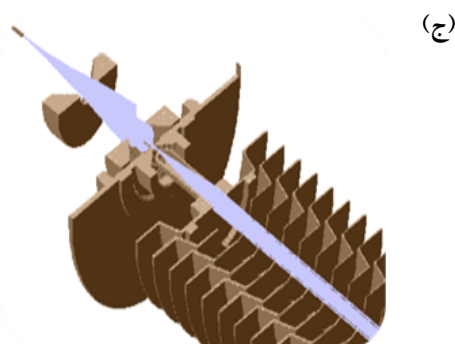
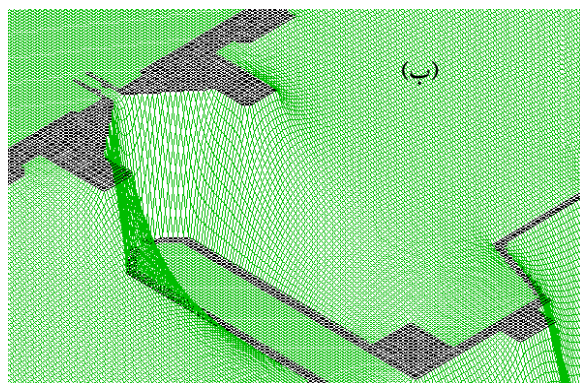
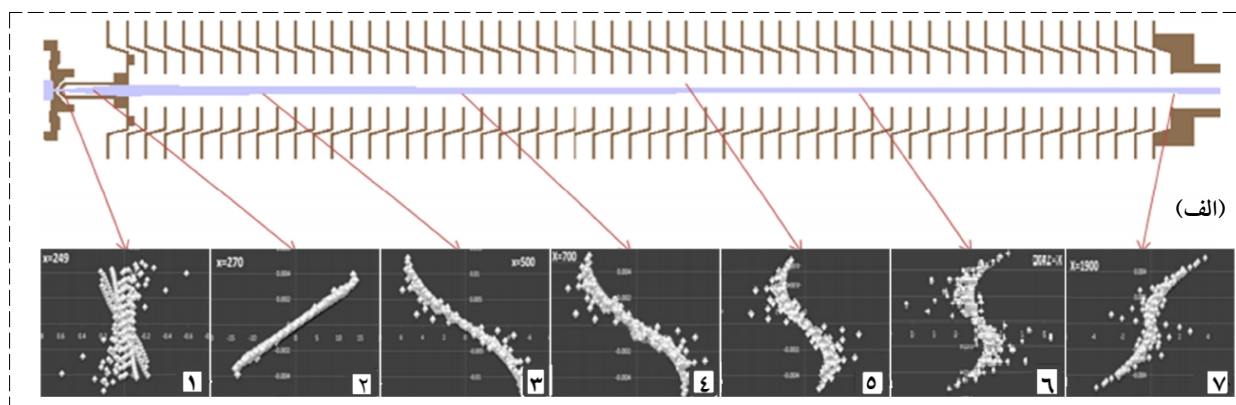
در ادامه، تأثیر الکتروود کانونی‌کننده سبب می‌شود تا باریکه همگرا گردد (نمودارهای ۳، ۴ و ۵). در این حالت به ظاهر (به خصوص در نمودارهای ۳ و ۴ در شکل ۱۰ قسمت الف) تغییر محسوسی در امیتانس باریکه دیده نمی‌شود اما در واقع با افزایش سرعت محوری ذرات باریکه نسبت به سرعت عرضی،



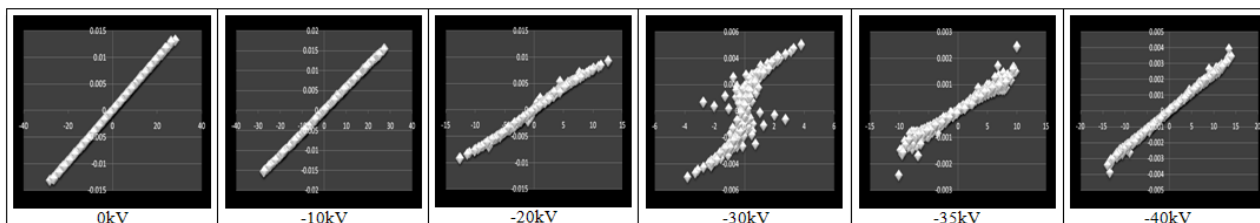
#### ۴. تشکر و سپاسگزاری

تشکر و قدردانی خود را از زحمات استاد فرزانه جناب آقای دکتر محمد لامعی رشتی به سبب راهنمایی‌های علمی در طراحی الکترودهای ستون شتابدهنده واندوگراف، اعلام می‌داریم.

تقریباً موازی است و این حالت بسیار مطلوب می‌باشد زیرا باریکه میل کمتری به واگرایی دارد، ضمن آن که باریکه در این نقطه با توجه به شکل ۷ دارای شعاع کمتری است، که این نتیجه، حالت بهینه‌ای را برای دسترسی به باریکه‌ای مناسب و تقریباً موازی در این اختلاف پتانسیل معرفی می‌نماید.



شکل (۱۰): (الف) نحوه حرکت باریکه در داخل ستون به همراه اشکال مربوط به امیتانس باریکه، شیب نمودار مربوط به امیتانس بیانگر میزان همگرایی، واگرایی و کانونی شدن باریکه است؛ (ب) نمایش کانتور خطوط هم‌پتانسیل که نمایانگر کاهش پتانسیل از الکتروود اول به سمت الکتروود دوم است که این کاهش تا آخرین الکتروود ستون ادامه می‌یابد؛ (ج) نحوه عبور باریکه از الکتروودهای اولیه به صورت سه-بعدی.



شکل (۱۱): نمودار امیتانس باریکه در هدف برای اختلاف پتانسیل های ۰ تا -۴۰ کیلوولت الکتروود نسبت به الکتروود اول.

## ۵. مراجع

- [1] W. Scharf. Particle accelerator and their uses, Harwood academic (1978).
- [2] R. Hellborg. Electrostatic Accelerator, Springer, New York (2005).
- [3] S. Koltsov. VIRTUAL DEVICE user's manual, Saint Petersburg (2006).
- [4] A.J. Kapadia, G.D. Tourassi, A.C. Sharma, A.S. Crowell, M.R. Kiser and C.R. Howell. Experimental detection of iron overload in liver through neutron stimulated emission spectroscopy, Phys. Med. Biol., 53 (2008) 2633.
- [5] Elemental analysis of biological materials current problems and techniques with special reference to trace elements; technical reports series No. 197, IAEA Publications, (1980).
- [6] D.A. Dahl. SIMION 3D version 7.0 user's manual, (2000).
- [7] H. Zhang. Ion Sources, Springer, 1999.
- [8] M.E. Abdelaziz, M.M. Abdelbaki, S.G. Zokhary. CH 2387-9/87/0000-0331 IEEE (1987) 331.
- [9] D.W.O. Heddle. Electrostatic Lens Systems, second ed, IOP, London, (2000).
- [10] S. Hamphries. Charged particle beams, John Wiley and Sons, New York, (2002).
- [11] S.D. Kovaleski. Calculation of the ion extraction boundary of a plasma ion source, IEEE Trans Plasma Sci., 34(1) (2006) 23.
- [12] J. Ishikawa, F. Sano, T. Takagi. Ion beam extraction with ion space-charge compensation in beam-plasma type ion source, J. Appl Phys. 53(9) (1982) 6018.
- [13] E. Harting, F.H. Read. Electrostatic lenses, Amsterdam, Elsevier, (1976).
- [14] R. Becker. Numerical simulation of ion-beam formation, Rev. Sci. Instrum. 67(3) (1996) 1132.
- [15] K.E. Koltay, P.B. Pausperl. Revue De Physique, 12 (1977) 1481.
- [16] High Voltage Engineering, Europa, B.V. Amersfoort, the Netherland (1980).
- [17] R.D. Cook, D.W.O. Heddle. The simple accurate calculation of cylinder lens potentials and focal properties, J.phys.E: Sci Instrum, 9 (1976) 279.
- [18] I. Michael, E.D. Berners, F.J. Eppling, D.J. Knecht, L.C. Northcliffe and R.G. Herb. Review of Sci. Instrum, 30(10) (1959) 855.
- [19] A. Maitland, New Derivation of vacuum breakdown, J. Appl. Phys. 32 (1961) 2399.