

## طراحی و شبیه‌سازی یک ستون شتاب‌دهی ۵۰۰ کیلوولت برای شتاب‌دهنده‌های داینامی‌ترون

معصومه غلامی اکبرآباد<sup>۱</sup>، محمدرضا قاسمی<sup>۲</sup>، علی اصغر شکری<sup>۱</sup>، علیرضا گراییلی<sup>۲</sup> و محمد نظری<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور تهران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

پست الکترونیکی: gholami219@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳)

### چکیده

استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک الکترونی با انرژی متوسط به دلیل بازدهی بالا و قیمت مناسب در صنعت کاربرد بسیار زیادی دارند. در شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، ستون شتاب‌دهی نقش تقسیم پتانسیل پایانه ولتاژ بالا را دارد به طوری که در یک مسیر مستقیم، باریکه را به صورت گام‌ای شتاب می‌دهد. در این مقاله یک ستون شتاب‌دهی ۵۰۰ کیلوولت توسط نرم‌افزار CST Studio Suite طراحی شده است. در این طراحی از تفنگ الکترونی با کاتد مسطح و جریان ۵۰ میلی‌آمپر استفاده شده است. به منظور استخراج باریکه از تفنگ الکترونی، از دو الکتروود فیلتر و الکتروود لنز، به ترتیب با ولتاژ ۴۹۵ و ۴۸۱ کیلوولت و جهت شتاب‌دهی الکترون، ۱۳ الکتروود با گام پتانسیل ۳۷ کیلوولت طراحی شده است. برای نگهداری الکتروودها و جلوگیری از تخلیه بار الکتریکی بین الکتروودها، صفحات عایقی از جنس پیرکس در نظر گرفته شده است. در انتهای ستون شتاب‌دهی، جریان باریکه ۵۰ میلی‌آمپر، شعاع کمر باریکه کمتر از ۰/۵ میلی‌متر، گسیلندگی باریکه ۷۳ نانومترادیان و پروانه‌انس باریکه ۰/۱۵ میکروپرو به دست آمد. ابعاد ستون شتاب‌دهی و نتایج حاصل از بررسی تغییر شعاع داخلی الکتروودها، جابه‌جایی و انحراف زاویه‌ای الکتروود اول نسبت به محور ستون شتاب‌دهنده در این مقاله ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده الکترواستاتیک، ستون شتاب‌دهی، تغییر شعاع الکتروود، نرم افزار CST Studio Suite

### ۱. مقدمه

الکتریکی و ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت، به‌جای دو صفحه از چندین صفحه موازی استفاده می‌شود تا ولتاژ زیاد به طور مساوی بین صفحات تقسیم شود. این صفحات طوری طراحی می‌شوند که بتوانند مانند لنز الکتریکی، باریکه را همگرا کنند. اگر ولتاژ اعمال شده به صفحات  $V$  باشد میدان الکتریکی بین

اساس کار ستون شتاب‌دهنده الکترواستاتیک اعمال ولتاژ بین دو صفحه و ایجاد میدان الکتریکی و در نهایت شتاب ذرات باردار بین دو صفحه است. اگر ولتاژ بین دو صفحه بیش از حد زیاد باشد تخلیه بار الکتریکی رخ می‌دهد. برای جلوگیری از تخلیه

ابتدای ستون یک یا چند الکترون برای کنترل کردن باریکه قرار می‌دهند. آرایش این الکترودهای کنترلی باید به گونه‌ای باشد که باریکه را با شکل دلخواه به انتهای ستون برسانند. هنگامی که پتانسیل اعمال شده به این الکترودها را تغییر دهیم، شکل خطوط میدان در دهانه ستون تغییر کرده و موجب تغییر در مسیر حرکت ذرات و قطر باریکه می‌شود. بنابراین برای رسیدن به قطر باریکه مورد نظر خود در انتهای ستون تنها کافی است که پتانسیل روی الکترودهای کنترلی (لنز) تغییر داده شود. هندسه این الکترودها باید بتواند علاوه بر انتقال کامل باریکه از سمت تفنگ به سمت الکترودهای شتاب‌دهی ستون، نقش موثر در همگرایی و واگرایی باریکه را نیز داشته باشند.

یکی از وظایف عایق‌های به کار رفته در ستون‌های شتاب‌دهی، نگه داشتن خلأ درون محفظه ستون است. چنانچه این عایق‌ها در معرض برخورد با ذرات پرنرژی قرار گیرند، ساختار مولکولی آنها به سرعت آسیب دیده و در نتیجه دچار ترک و شکستگی می‌شوند. ذرات بارداری که به سطح عایق برخورد می‌کنند علاوه بر ایجاد ترک، باعث انباشتگی بارهای الکتریکی و غیر یکنواختی گرادیان بارهای سطحی می‌شوند. این اتفاق موجب افزایش احتمال تخلیه الکتریکی بارهای سطحی و ایجاد میدان‌های الکتریکی عمودی غیر یکنواخت و در نتیجه، انحراف باریکه خواهد شد. بنابراین برای جلوگیری از برخورد این ذرات به عایق‌ها، الکترودهای ستون باید به گونه‌ای طراحی شوند که عایق‌های ستون را کاملاً از برخورد ذرات محافظت کنند.

در طراحی الکترودهای سطح باید شعاع داخلی و خارجی الکترودها و فاصله آنها از یکدیگر تعیین شود. کمیت تعیین کننده در طراحی الکترودهای سطح، ضریب محافظت است. شکل ۱ مسیرهای مختلف حرکت ذرات را در الکترودهای سطح نشان می‌دهد.

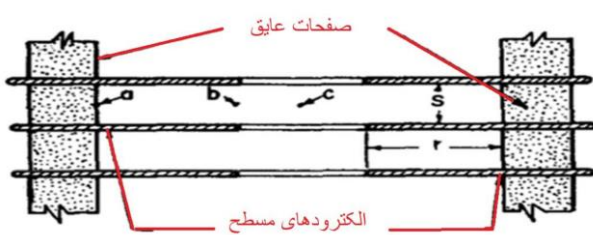
$$K(\text{shielding factor}) = r \left[ \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left[ \frac{\left(\frac{r}{s}\right)^r + n^r}{\left(\frac{r}{s}\right)^r} \right]^{-r/r} \right] \quad (1)$$

صفحات از رابطه  $E = -\nabla V$  به دست می‌آید. در صورتی که ولتاژ بین صفحات ثابت باشد میدان الکتریکی به صورت  $E = V/L$  درخواهد آمد که  $L$ ، طول ستون شتاب‌دهی است. در واقع با اعمال ولتاژ ثابت به صفحات، خطوط میدان الکتریکی موازی و هم محور به دست خواهند آمد. ساختار ستون شتاب‌دهی از سه بخش اصلی الکترودها، صفحات عایق و مقسم ولتاژ تشکیل شده است. الکترودها به منظور ایجاد میدان الکتریکی و شتاب دادن ذرات به کار می‌روند. صفحات عایق برای جداسازی الکترودها از هم و جلوگیری از تخلیه بار الکتریکی بین آنها و مقسم ولتاژ نیز به منظور تقسیم ولتاژ بین الکترودها استفاده می‌شوند [۱ و ۲].

بعد از شتاب گرفتن الکترون‌ها به وسیله اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد، برای رسیدن این ذرات به انرژی نهایی، باید آنها را به صورت متوالی در اختلاف پتانسیل‌های متوالی ایجاد شده شتاب داد. این گام‌های پتانسیلی متوالی، توسط ستون شتاب‌دهی ایجاد می‌شوند. سه نکته در ساخت یک ستون شتاب‌دهی بسیار حائز اهمیت است که عبارتند از: انتخاب مناسب جنس عایق ستون، انتخاب مناسب جنس الکترودهای ستون، طراحی مناسب ساختار ستون.

الکترودهای شتاب‌دهی در اکثر شتاب دهنده‌های الکترواستاتیک از جنس استیل، آلومینیوم و تیتانیوم ساخته می‌شوند [۳]. با توجه به توانایی ساخت آلیاژهای مختلف استیل و قیمت مناسب آن نسبت به تیتانیوم، به نظر می‌رسد استیل ضد زنگ، ماده مناسبی برای ساخت الکترودهای الکترواستاتیک است. برای عایق‌های بین الکترودها معمولاً از سرامیک و شیشه استفاده می‌شود. شیشه بروسیلیکات به دلیل بالاتر بودن مشخصات عایقی و پایین تر بودن ضریب انتشار ثانویه، مناسب‌تر است [۳ و ۴].

الکترودها شامل دو دسته‌اند. دسته اول، الکترودهای کنترلی ابتدای ستون و دسته دوم، الکترودهای شتاب‌دهی هستند. هنگامی که باریکه از دهانه آند تفنگ خارج می‌شود، دچار واگرایی می‌شود. برای این که باریکه خروجی از تفنگ به شکلی همگن و با شعاع مورد نظر به انتهای ستون برسد، در



شکل ۱. مسیرهای مختلف حرکت ذرات در الکترودهای مسطح [۶].

$$\Delta V = \frac{rV}{rn+1}, \quad (۲)$$

$$\Delta V = \frac{V}{n}, \quad (۳)$$

$V$  پتانسیل ستون شتاب‌دهنده و  $\Delta V$  گام پتانسیل و  $n$  تعداد الکترودهاست [۶].

## ۲. طراحی ستون شتاب‌دهنده دینامیتر

هدف از این تحقیق طراحی ستون شتاب‌دهنده به منظور به کارگیری در شتاب‌دهنده دینامیتر ۵۰۰ کیلوولت است و خصوصیات باریکه خروجی در انتهای ستون شتاب‌دهی باید جریان ۵۰ میلی‌آمپر و شعاع باریکه خروجی ۲ میلی‌متر باشد.

شتاب‌دهنده‌های الکترونی الکترواستاتیک از یک ژنراتور ولتاژ بالا متصل به یک تیوب شتابگر تحت خلأ تشکیل شده‌اند. تفنگ الکترونی یکی از بخش‌های ضروری شتاب‌دهنده‌های الکترون است. نقش تفنگ الکترونی، تولید و شکل دادن به جریان الکترون‌ها در یک شکل مناسب برای تزریق در میدان شتاب‌دهنده است [۷].

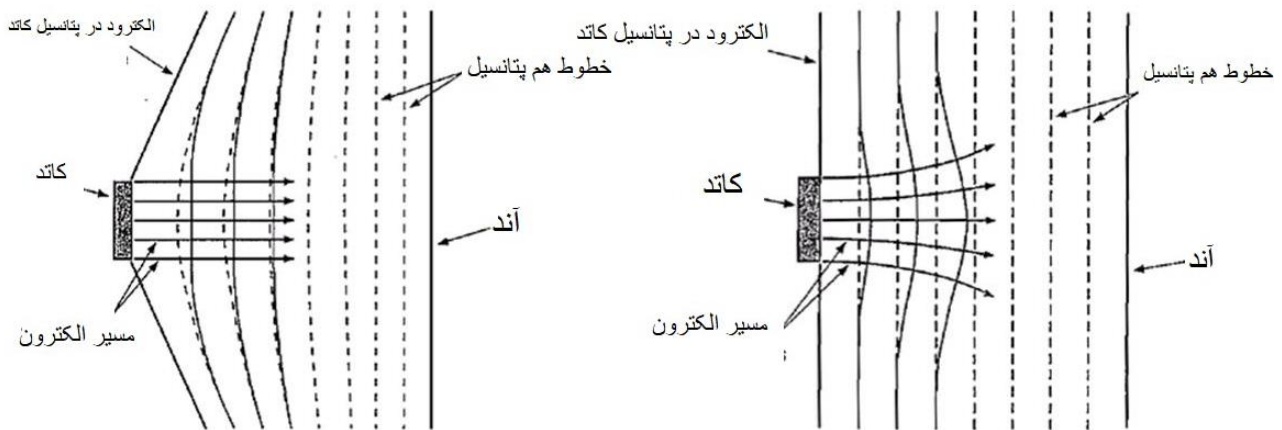
منبع ایجاد الکترون (تفنگ الکترونی) یک کاتد یونش گرمایی است که در آن معمولاً یک قطعه سیم تنگستن‌ی انتشار الکترون را به عهده دارد. برای افزایش طول عمر فیلامان از آلیاژهای تنگستن استفاده می‌شود که حاوی مقادیری توریم یا عناصر دیگر است. به همین دلیل تنگستن برای جنس کاتد تفنگ الکترونی در نظر گرفته شد. تابع کار این فلز ۴/۵ الکترون‌ولت و چگالی جریان تولیدی آن  $15 \text{ A/cm}^2$  در دمای حدود  $1350^\circ \text{C}$  کلون است. با استفاده از رابطه چایلد-لانگمویر برای چگالی

$r$  فاصله بین دهانه الکترودها تا عایق و  $s$  فاصله بین دو الکترودها متوالی و  $n$  شمارنده سری است. میزان انحراف باریکه از مسیر خود بستگی به شعاع حرکتی باریکه دارد. هرچه باریکه به مرکز محور نزدیک‌تر باشد (نقطه  $c$  در شکل ۱)، میزان اثرپذیری آن از میدان‌های عمودی کمتر است. نتایج تجربی و تئوری حاکی از این است که با افزایش نسبت  $\frac{r}{s}$ ، ضریب محافظت از برخورد یون، بهبود یافته و میزان اثرپذیری باریکه از میدان‌های نامتقارن ناشی از تجمع بارهای سطحی کم می‌شود. ضریب محافظت در رابطه (۱) آورده شده است [۵ و ۶].

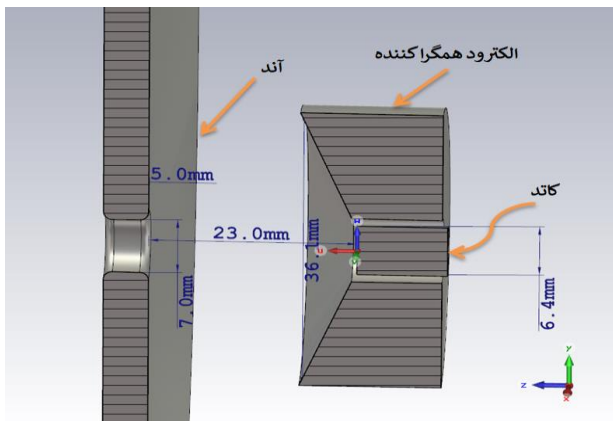
عامل موثر بعدی شکل الکترودها است. اگر شکل الکترودها مسطح باشد طول مسیر موثری که باریکه تحت تاثیر میدان‌های عمودی قرار می‌گیرد کمتر است.

کمیت  $\frac{r}{s}$  در محافظت تفنگ الکترونی بسیار اهمیت دارد. اگر  $\frac{r}{s} = 1$  باشد ضریب محافظت بسیار کم است. اگر  $\frac{r}{s} = 2$  باشد ضریب محافظت معقول است. در نزدیکی تفنگ الکترونی و الکترودهای اولیه با توجه به میزان انحراف باریکه، به ازای مقدار  $\frac{r}{s} < 2/5 < 2/7$  ضریب محافظت مناسب است و در سیستم‌هایی با الکترودهای مسطح، حداکثر  $\frac{r}{s} = 3$  است [۶].

نکته قابل توجه دیگر در تعیین فاصله الکترودها از یکدیگر، قدرت تحمل عایق‌های ستون در برابر تخلیه الکترونیکی ایجاد شده در بین دو الکترودها متوالی است. بیشینه میدان الکترونیکی که عایق‌ها می‌توانند تحمل کنند کمتر از ۱۰ کیلوولت بر سانتی‌متر است؛ بنابراین عایقی که بین دو الکترودها قرار دارد باید بتواند اختلاف پتانسیل بین دو الکترودها را تحمل کند. پس از طراحی الکترودها و تعیین فاصله بین آنها، باید تعداد الکترودهای شتاب‌دهنده مشخص شود. به طور کلی تعداد الکترودهای شتاب‌دهنده به انرژی مورد نیاز، طول سیستم شتابگر، فاصله میان الکترودها و گام پتانسیل بستگی دارد. برای ایجاد گام‌های پتانسیل یکسان در الکترودها می‌توان از معادله‌های (۲) و (۳) استفاده کرد. معادله (۲) برای تعداد الکترودهای فرد و معادله (۳) برای تعداد الکترودهای زوج است.



شکل ۲. شکل خطوط پتانسیل در حضور الکتروود صاف و الکتروود پیرس.



شکل ۳. ابعاد تفنگ با کاتد مسطح.

ایجاد یک میدان الکتریکی یکنواخت در داخل ستون را برای شتاب گرفتن ذرات بر عهده دارد. بدین منظور می‌توان الکترودهای ستون را به اشکال متفاوتی طراحی کرد. شکل ۴ هندسه الکترودهای لبه‌دار و تخت را نشان می‌دهد. از آنجایی که بیشتر شتاب دهنده‌های صنعتی الکترودهای مسطح دارند و از طرف دیگر ساخت آن کم هزینه‌تر و راحت‌تر است، این هندسه الکتروود برای طراحی ستون شتاب‌دهنده دینامیترون انتخاب شد.

هدف از این تحقیق طراحی یک ستون شتاب‌دهی با ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت و تعداد ۱۳ الکتروود شتاب‌دهی است، بنابراین با

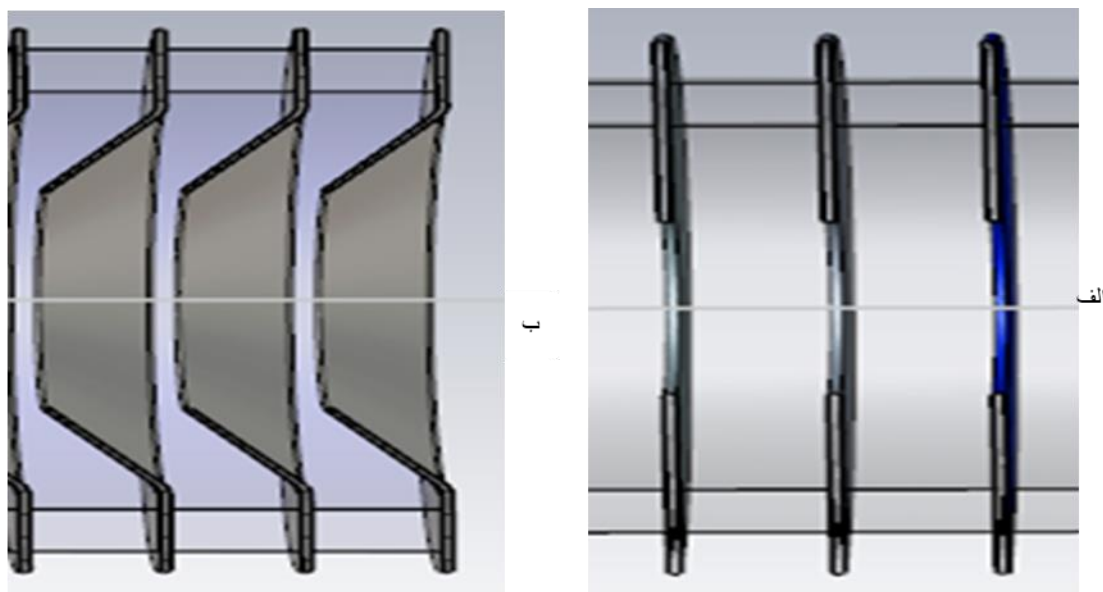
جریان (J)، مساحت سطح کاتد (A)،  $0.33 \text{ cm}^2$  و شعاع کاتد (r)،  $3/25 \text{ mm}$  به دست می‌آید [۷ و ۸]. قطر دهانه آند ۷ میلی‌متر و ضخامت آن ۵ میلی‌متر است. در این طراحی ولتاژ کاتد ۵ کیلوولت در نظر گرفته شد. با این ولتاژ فاصله کاتد-آند (d) از رابطه چایلد-لانگمیر،  $23 \text{ mm}$  به دست آمد. به منظور حصول باریکه الکترونی همگرا، یک الکتروود پیرس<sup>۱</sup> طراحی شد که کاتد را احاطه کرده و هم‌پتانسیل با آن است [۹-۱۴]. این الکتروود باید به گونه‌ای طراحی شود که در غیاب الکترون، خطوط هم‌پتانسیل به سمت کاتد انحنا یابند اما حضور الکترون و به تبع آن اثر واگراکنندگی بارفضایی آنها، این خطوط را وادار به حرکت به سمت آند کرده و در نهایت خطوط هم‌پتانسیل مستقیم و موازی در حضور الکترون ایجاد شود (شکل ۲).

مطابق شکل ۳، الکتروود همگراکننده در نزدیکی کاتد قرار گرفته و نوک آن به سمت آند انحنا یافته است. فاصله این الکتروود با کاتد یک میلی‌متر است. ابعاد تفنگ الکترونی با کاتد مسطح در شکل ۳ آورده شده است.

## ۱.۲. بررسی هندسه الکترودهای شتاب‌دهی

در ستون شتاب‌دهی، بعد از تفنگ الکترونی، الکترودهای شتاب‌دهی قرار می‌گیرند. الکترودهای ستون شتاب‌دهی، وظیفه

۱. Pierce



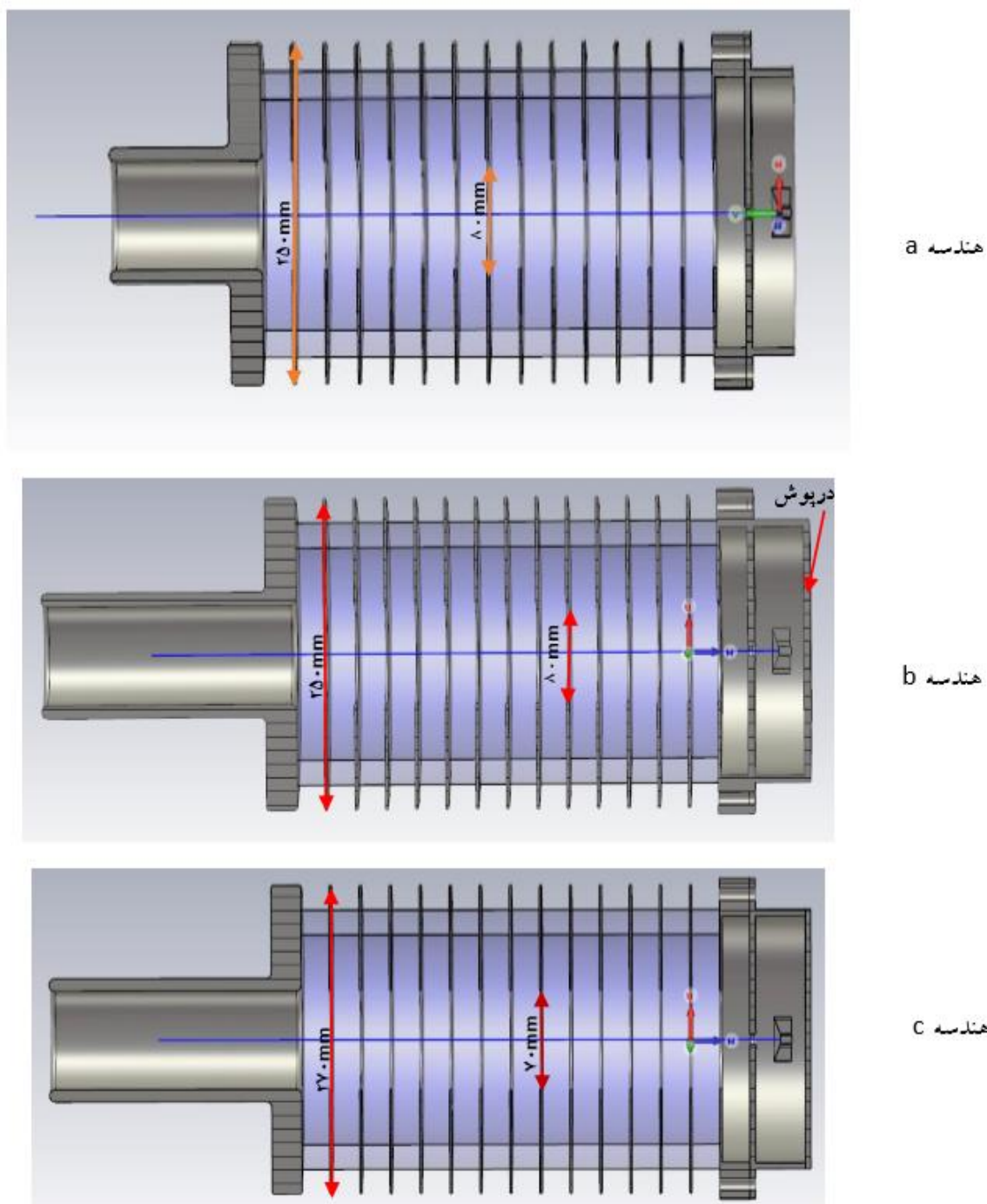
شکل ۴. الف) الکتروستات تخت و ب) الکتروستات لوله‌دار.

بود. این الکتروستات علاوه بر اتصال آسان به آند، تا جای ممکن از اثر نامطلوب میدان الکتروستاتیکی ستون بر روی عملکرد تفنگ جلوگیری می‌کند. الکتروستات اول، نقش فیلتر کردن ذرات پراکنده شده به بیرون از مسیر اصلی را دارد، به همین دلیل به آن الکتروستات فیلتر گفته می‌شود که با اعمال پتانسیلی ۴۹۵ کیلوولت از انحراف ذرات جلوگیری می‌کند. بعد از الکتروستات فیلتر، الکتروستات متغیر لنز قرار داده شد که با تغییر پتانسیل مسیر باریکه را تنظیم می‌کند و لذا آن ۴۸۱ کیلوولت اعمال شد. شکل ۶ نحوه اتصال این الکتروستات را نشان می‌دهد.

پس از اعمال پتانسیل‌های مورد نظر، جریان خروجی ستون شتاب‌دهنده در هندسه a اندازه‌گیری شد. جریان خروجی در این حالت، حدود ۱۱۰ میلی‌آمپر به دست آمد. علت این افزایش جریان، نفوذ میدان‌های الکتریکی پراکنده ستون به محفظه درون تفنگ (فضای بین آند و کاتد) است. برای حذف این اختلال باید محفظه تفنگ با استفاده از یک درپوش از میدان‌های پراکنده محفوظ بماند. شکل ۷ مسیر باریکه و خطوط میدان الکتریکی هندسه a را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ خطوط میدان الکتریکی در اطراف کاتد بسیار متمرکزتر (میدان قوی) از انتهای ستون شتاب‌دهی هستند.

استفاده از رابطه (۲)، گام پتانسیل ۳۷ کیلوولت به دست می‌آید. در این مقاله ستون شتاب‌دهی به صورت هندسه a، هندسه b و هندسه c بررسی شد. هندسه a و b شعاع خارجی هر الکتروستات شتاب‌دهی ۱۲۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر و شعاع داخلی الکتروستات ۴۰ میلی‌متر طراحی شد. تنها تفاوت هندسه a و b درپوش کاتد است. از آنجایی که عایق بین الکتروستات‌ها شیشه پیرکس انتخاب شده است و توانایی این عایق ۱۸۰۰-۱۲۰۰ کیلوولت بر سانتی‌متر است، فاصله بین الکتروستات‌ها ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. هندسه c، شعاع خارجی هر الکتروستات شتاب‌دهی ۱۳۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر و شعاع داخلی الکتروستات‌ها ۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل ۵ هندسه a، b و c ستون شتاب‌دهی آورده شده است.

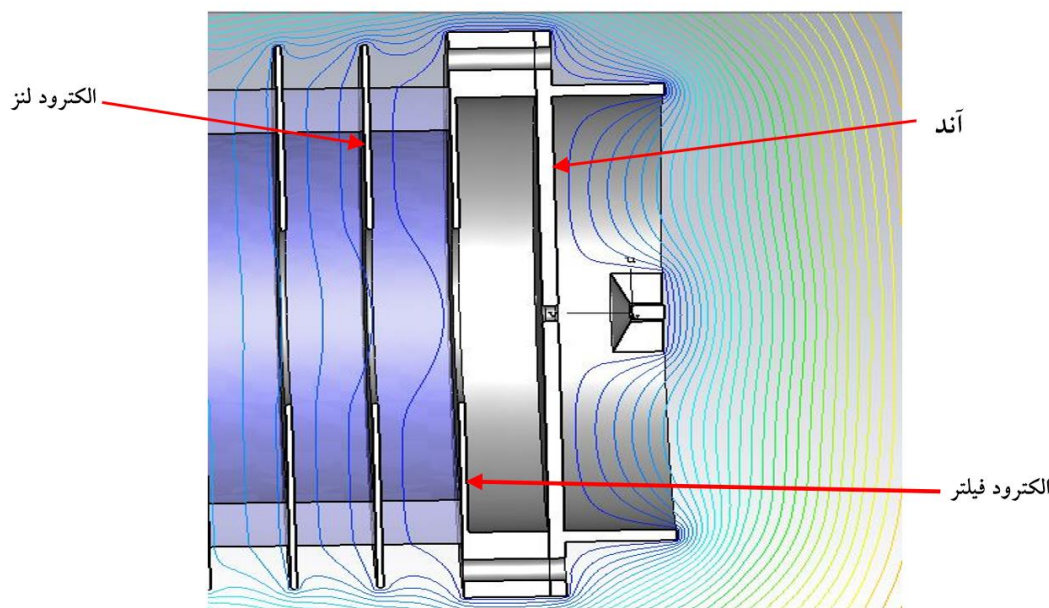
برای اتصال ستون شتاب‌دهی به تفنگ الکترونی، باید دریچه ابتدایی ستون به گونه‌ای طراحی شود که قابلیت اتصال آسان به الکتروستات آند را داشته باشد. به دلیل اتصال بین این الکتروستات و الکتروستات آند، هر دوی آنها در پتانسیل یکسانی قرار می‌گیرند [۱۵]. با توجه به طراحی شدن تفنگ در مد بارفضایی، برای تغییر دادن جریان گسیلی از تفنگ، پتانسیل آند و الکتروستات اتصال ابتدایی ستون، از یک تا پنج کیلوولت نسبت به کاتد متغیر خواهند



شکل ۵. هندسه a، b و c ستون شتابدهی طراحی شده توسط نرم افزار CST Studio Suite.

ستون شتاب‌دهنده در هندسه b برابر با ابعاد در هندسه a است و فقط در این هندسه درپوشی برای کاتد طراحی شده است. خطوط میدان اطراف کاتد در هندسه b در شکل ۸ آورده شده است. پروفاایل ذرات خروجی در شکل ۹ نشان می‌دهد که شعاع

به منظور اصلاح هندسه ستون شتاب‌دهی، درپوشی برای کاتد طراحی شد تا خطوط میدان در انتهای ستون شتاب‌دهی قوی‌تر شوند و مقدار جریان اصلاح شود. بعد از تنظیم پارامترهای هندسی درپوش، جریان ۵۰ میلی‌آمپر به دست آمد. همه ابعاد



شکل ۶. نحوه اتصال تفنگ الکترونی به الکتروودهای ابتدایی ستون شتاب‌دهی.

شکل ۱۱. ب نشان می‌دهد با افزایش شعاع داخلی الکتروودها، انحنای خطوط میدان الکتریکی ایجاد شده در بین الکتروودهای متوالی تقریباً از بین رفته و به یک خط صاف تبدیل شده است. بنابراین شعاع داخلی ستون کاملاً بر روی چگونگی توزیع میدان‌های الکتریکی در داخل ستون تاثیر گذار است [۱۵]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شعاع داخلی ستون تاثیر بسیار زیادی بر روی شکل پروفایل و چگونگی توزیع ذرات دارد و افزایش شعاع الکتروود سبب افزایش شعاع پروفایل باریکه و همچنین افزایش گسیلمندی باریکه شده است.

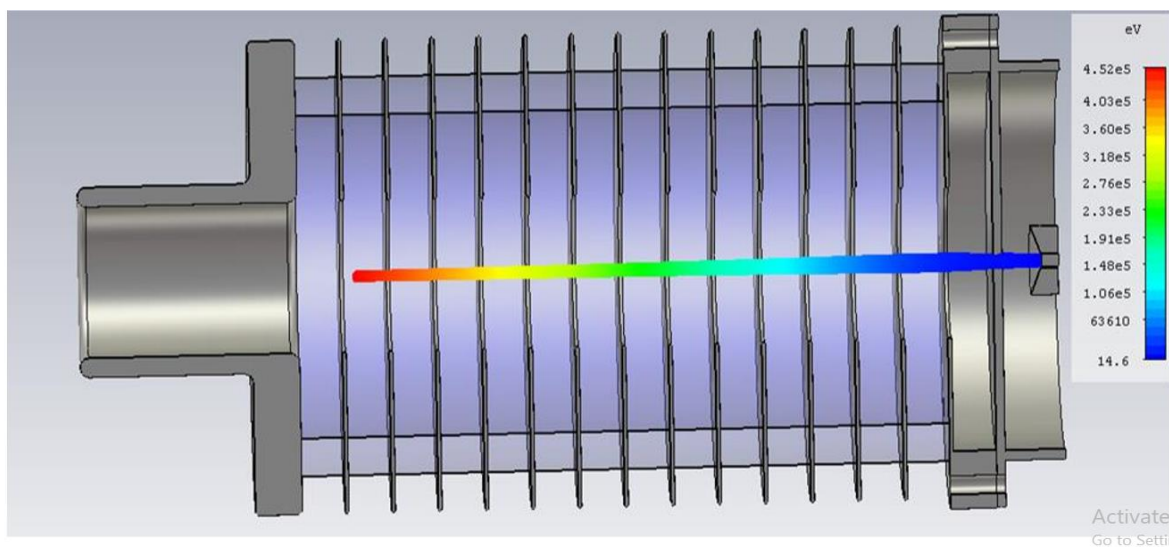
شکل ۱۱. ج شعاع الکتروود فیلتر ۴۰ میلی‌متر و شعاع الکتروودهای شتاب‌دهی ۶۰ میلی‌متر است که این تفاوت شعاع در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی ستون موجب اعوجاج خطوط میدان شده است. این اعوجاج در واقع باعث ایجاد یک تغییر ناگهانی در مسیر ذرات شده و مانند یک ضربه عمل می‌کند. این ضربه باعث تغییر پروفایل گوسی و دایره‌ای ذرات وارد شده به ستون می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد این ضربه، باید اعوجاج خطوط میدان در این نقاط از بین برود. برای این کار کافی است که تفاوت شعاع الکتروودهای ستون با شعاع بخش ابتدایی و انتهایی کم شود.

کمر در انتهای ستون به کمتر از  $\frac{1}{8}$  میلی‌متر رسیده و گسیلمندی باریکه در این مکان نیز ۷۳ نانومتر رادیان است. شکل ۹. ب، روند تغییرات شعاع کمر باریکه را در طول ستون به صورت باریکه با تقارن دایره‌ای نشان می‌دهد.

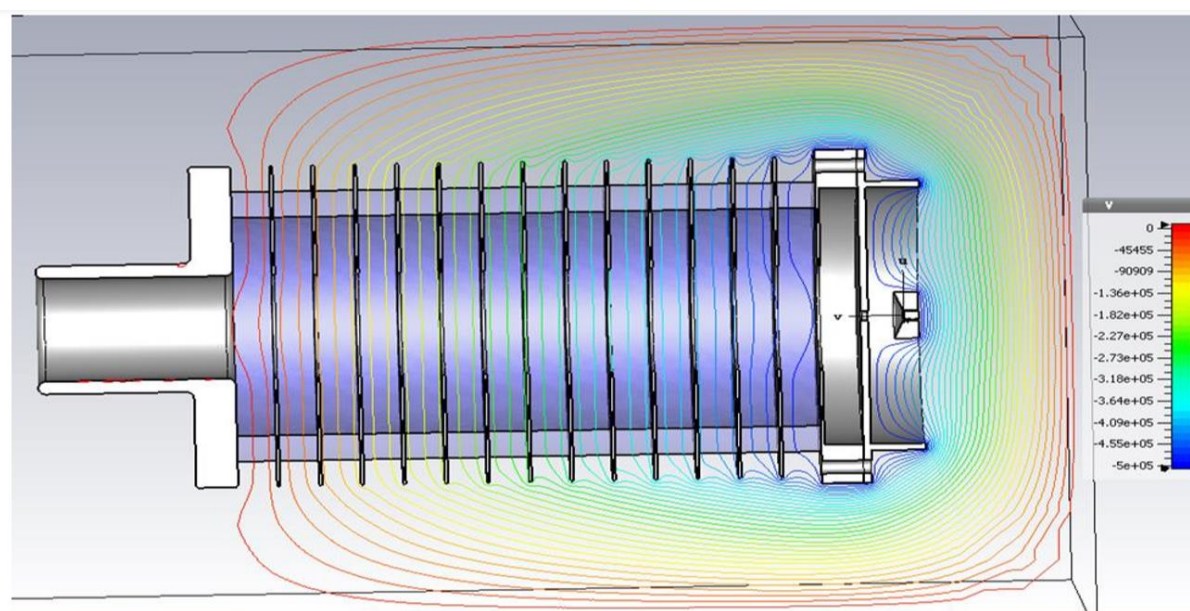
## ۲.۲. بررسی تغییر شعاع الکتروودهای شتاب‌دهی و الکتروود

### کنترلی

از آنجایی که هدف از این تحقیق به دست آوردن ابعاد مناسب به منظور ساخت ستون شتاب‌دهنده داینامی‌ترون و بومی‌سازی این صنعت در کشور است لازم است که اهمیت هر کدام از ابعاد ستون شتاب‌دهنده در تغییر باریکه خروجی مشخص شود. بدین منظور ابتدا فقط شعاع داخلی الکتروودهای شتاب‌دهی در هندسه را تغییر می‌دهیم تا شعاع الکتروودی که باریکه‌ای با تقارن کروی در انتهای ستون می‌دهد، مشخص شود. اندازه شعاع داخلی را ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ میلی‌متر قرار داده‌ایم. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پروفایل باریکه در ابتدای ستون تقارن دایره‌ای دارد اما در انتهای ستون این پروفایل به شکل مربعی با مرکز خالی تغییر حالت داده است.



الف



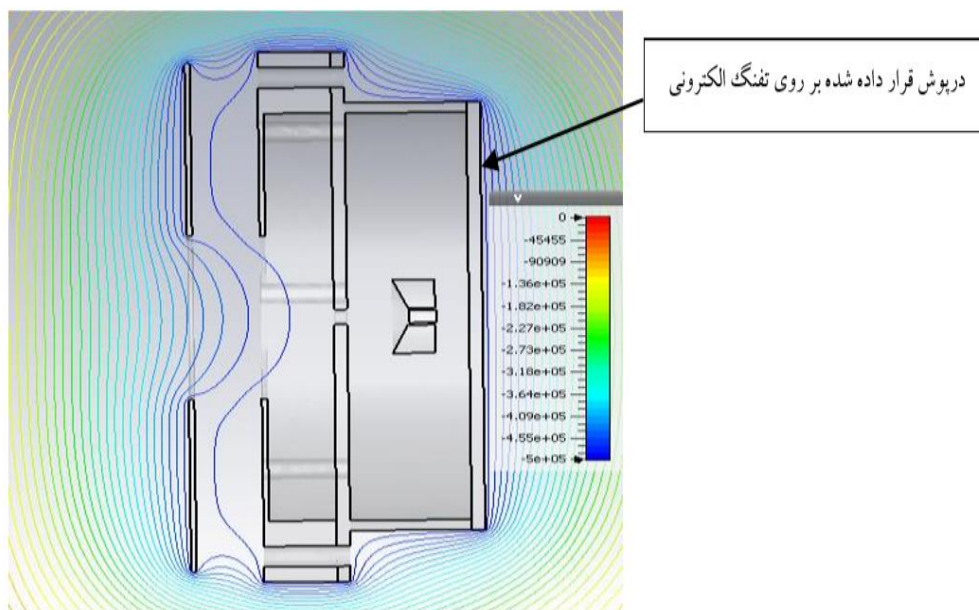
ب

شکل ۷. نتایج طراحی هندسه a ستون شتابدهی (الف) مسیر باریکه و (ب) خطوط میدان الکتریکی.

الکتریکی در الکترودها، تغییر در گوسی بودن و شعاع کمر باریکه و گسیلمندی باریکه خروجی می‌شود. به منظور جلوگیری از اعوجاج میدان در الکترودهای اولیه باید الکتروود لنز، الکتروود فیلتر و الکترودهای شتابدهی شعاع برابری داشته باشند.

حال اگر الکتروود کنترلی ابتدایی ستون را نیز مانند بقیه الکترودهای ستون به شعاع ۶ سانتی‌متر تغییر یابد، خطوط میدان اعوجاج زیادی در الکتروود فیلتر و الکتروود لنز دارد و گسیلمندی باریکه، در انتهای ستون در این حالت ۱۲۰ نانومتر رادیا خواهد شد. شکل ۱۲ تصویر خطوط میدان در بخش ابتدایی این ستون را نشان می‌دهد. در نتیجه تغییر شعاع الکترودهای ستون شتابدهی موجب تغییر میدان





شکل ۸. هندسه تفنگ الکترونی با کاتد درپوشدار در هندسه b.

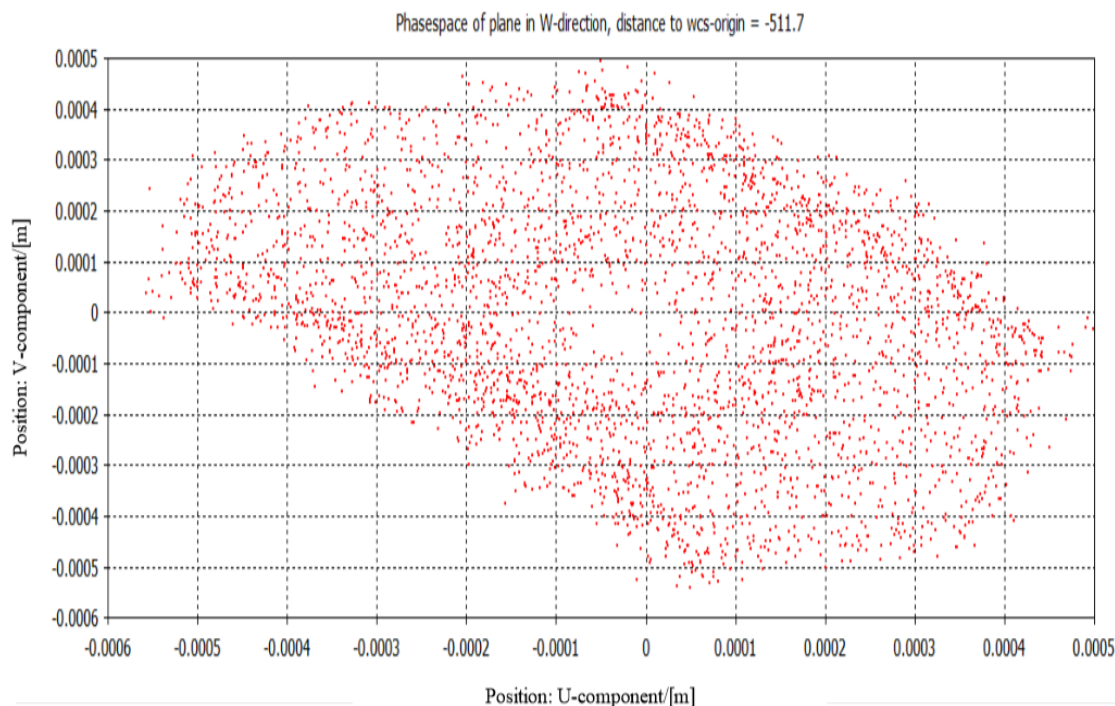
زیرا در غیر این صورت، بر اثر برخورد الکترون‌های پراکنده با ستون، شکستگی آن محتمل خواهد بود.

به منظور بررسی اثرات انحراف الکتروود در هندسه b، الکتروود اول را به اندازه ۲ درجه از حالت عمود بودن بر محور ستون منحرف کرده‌ایم. در این حالت نیز تغییرات پروفایل باریکه خروجی در طول ستون در شکل ۱۴ آورده شده است.

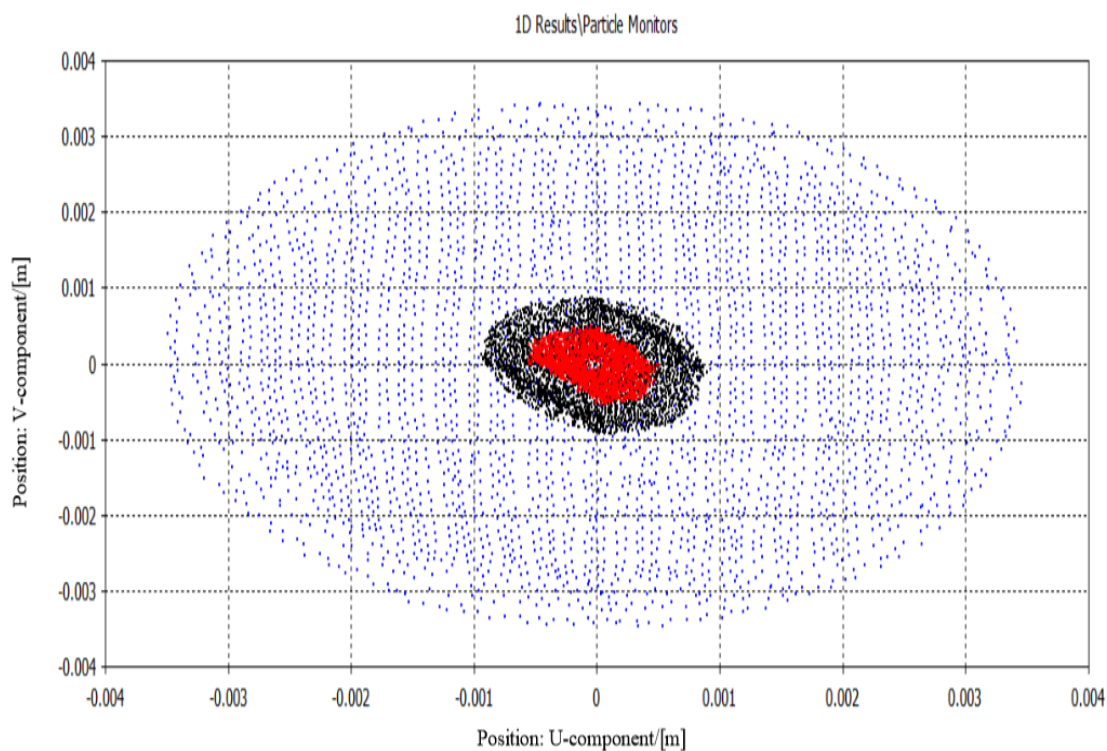
در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که پروفایل ذرات در انتهای ستون، خارج از محور ستون است. همچنین شکل ۱۴ الف نشان می‌دهد که پروفایل ذرات در انتهای ستون نه دایره‌ای و نه گوسی است. این مورد، یک نکته منفی در طراحی ستون‌هایی است که به منظور جوشکاری با باریکه الکترونی و یا تولید پرتو ایکس به کار می‌روند. گسیلمندی باریکه در انتهای ستون ۱۰۰ نانومتر رادیان است بنابراین با انحراف الکتروود اول به اندازه ۲ درجه، ذرات خروجی از محور ستون فاصله می‌گیرند و تعداد ذرات برخوردی به بدنه داخلی ستون افزایش می‌یابد و در نتیجه عایق‌های ستون پس از مدتی بسیار کوتاه می‌شکنند.

### ۳.۲. بررسی تاثیر تراز بودن الکتروودها در خروجی باریکه

الکتروودهای شتاب دهنده ممکن است بر اثر گذر زمان، به علت آزاد شدن تنش‌ها در قطعات ساخته شده و یا تغییر اندازه چسب و اتصالات از حالت تراز خودشان خارج بشوند. این قضیه ممکن است موجب انحراف باریکه الکترونی و برخورد به بدنه شتاب دهنده و کاربر آن بشود. برای بررسی تاثیر تراز بودن الکتروودها بر خروجی باریکه، ابتدا اولین الکتروود ستون را به اندازه ۲ میلی‌متر از محور خود منحرف کردیم در واقع محور این الکتروود به اندازه ۲ میلی‌متر پایین‌تر از محور اصلی ستون شتاب‌دهی قرار گرفت. شکل ۱۳ پروفایل باریکه را در طول مسیر ستون نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ ب مشاهده می‌شود که این پروفایل از حالت گوسی خود خارج شده و همچنین شکل دایره‌ای آن نیز از دست رفته است. نمودار ۱۳ ج نیز تغییر ایجاد شده بر روی منحنی میدان الکتریکی در طول ستون را نشان می‌دهد که در محل حضور الکتروود منحرف شده (در نمودار با یک کادر آبی نشان داده شده است)، یک انحراف و یک بخش تقریباً مسطح ایجاد شده است که نشان دهنده اعوجاج میدان است. بنابراین تراز بودن الکتروودها بر روی محور ستون امری کاملاً ضروری است

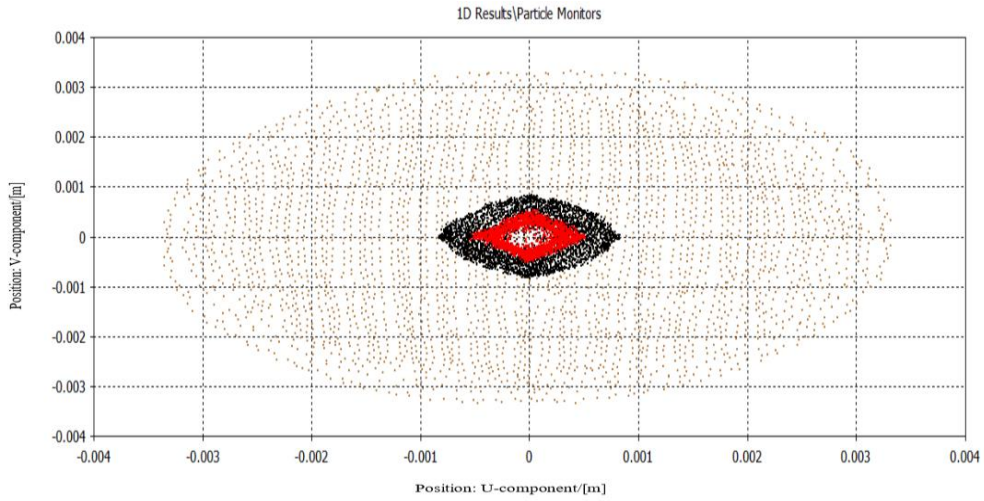


الف

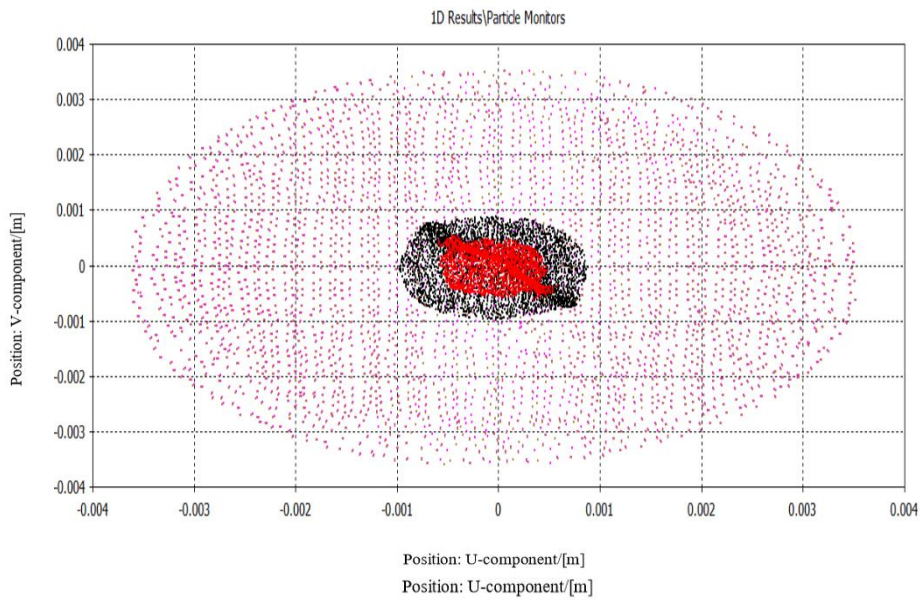


ب.

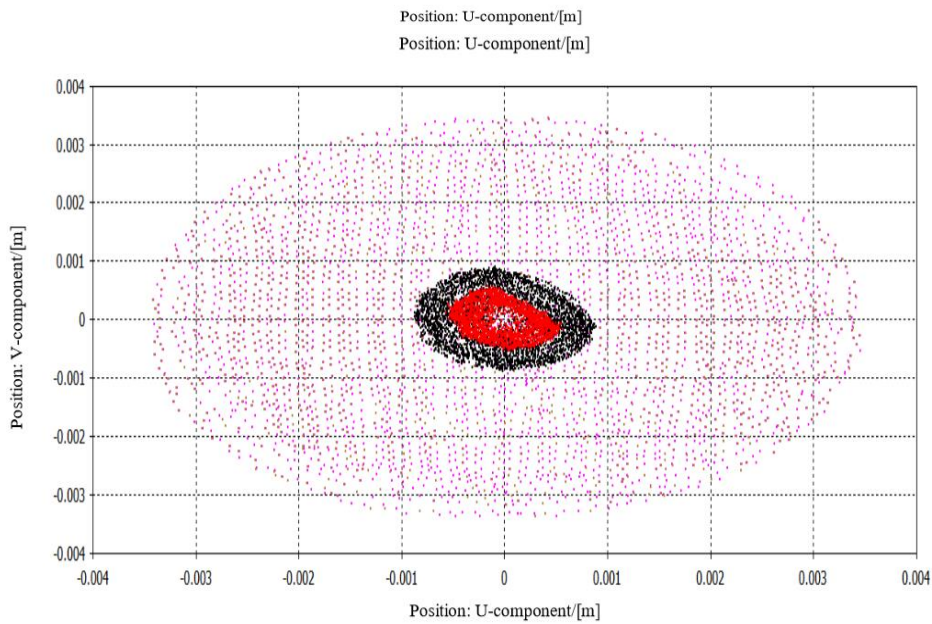
شکل ۹. نتایج ستون شتاب‌دهی در هندسه b (الف) پروفایل ذرات خروجی انتهای ستون و (ب) تغییرات شعاع کمر باریکه در طول ستون. رنگ قرمز در فاصله ۵۱ سانتی‌متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح کاتد و رنگ آبی در سطح دهانه آند است.



الف

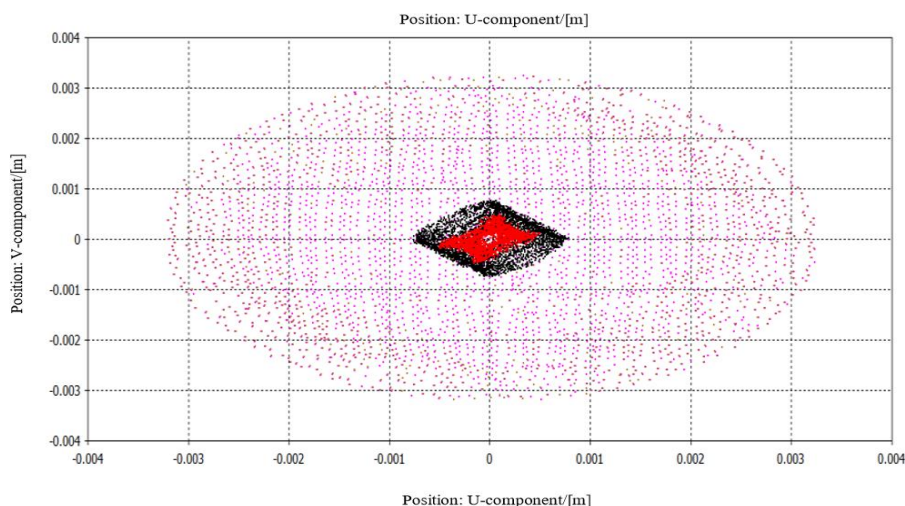


ب



ج

شکل ۱۰.



ادامه شکل ۱۰. خطوط میدان الکتریکی در ستون با الکتروود شتاب‌دهی در هندسه b (الف) با شعاع داخلی ۴۵ میلی‌متر، (ب) با شعاع داخلی ۵۰ میلی‌متر، (ج) با شعاع داخلی ۵۵ میلی‌متر و (د) با شعاع داخلی ۶۰ میلی‌متر. رنگ قرمز در فاصله ۵۱ سانتی‌متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی از سطح کاتد و رنگ صورتی در سطح دهانه آند است.

در طراحی هندسه b نسبت  $\frac{r}{s} = 1/1$  بوده که در گستره قابل قبولی است. شعاع خارجی و شعاع داخلی الکتروودها تغییر داده شد به طوری که  $\frac{r}{s} = 2/6$  در نظر گرفته شد تا این نسبت در بازه بهینه قرار گیرد. در این حالت، شعاع خارجی هر الکتروود شتاب‌دهی ۱۳۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۲ میلی‌متر و شعاع داخلی الکتروودها ۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در هندسه مورد نظر (هندسه c)  $r = 65 \text{ mm}$  و فاصله بین الکتروودها ۲۵ میلی‌متر ( $s = 25 \text{ mm}$ ) انتخاب شد. طبق رابطه (۱) ضریب محافظت،  $0/4$  به دست می‌آید. شکل ۱۶ مسیر باریکه را در طول ستون شتاب‌دهی در هندسه c نشان می‌دهد. در این حالت، باریکه نسبت به هندسه b، بسیار متمرکزتر شده است و شعاع کمر باریکه حدود  $0/5$  میلی‌متر است.

در این مرحله، ولتاژ الکتروود لنز تغییر داده شده است. شکل ۱۷ باریکه خروجی را در سه حالت نشان می‌دهد. پروفایل ذرات خروجی در ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۱- کیلوولت، گوسی و دایره‌ای است در حالی که در ولتاژ ۴۸۵ و ۴۹۰ کیلوولت، پروفایل ذرات خروجی از حالت گوسی خارج شده و دایره‌ای

#### ۴.۲. بررسی تغییر ولتاژ الکتروودهای ابتدایی در خروجی

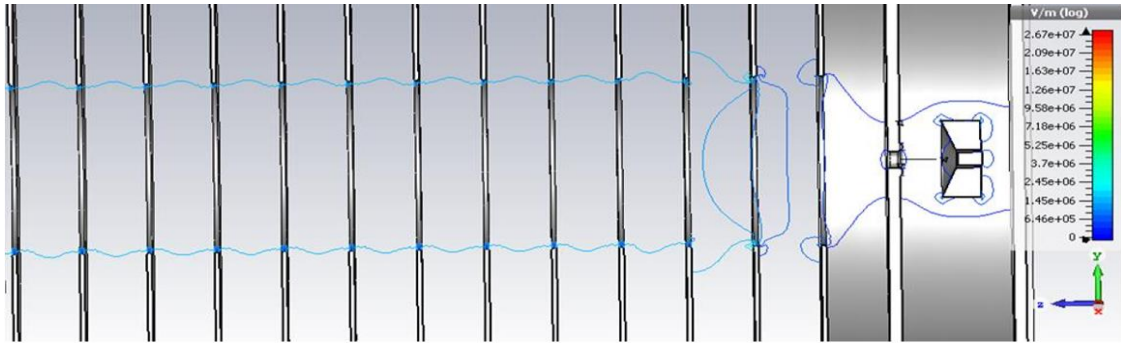
##### باریکه

به منظور بررسی تاثیر ولتاژ الکتروود لنز، پتانسیل این الکتروود را تغییر داده و شکل باریکه خروجی مطالعه شده است. پتانسیل کاتد ۵۰۰ کیلوولت، پتانسیل آند ۴۹۵ کیلوولت و پتانسیل لنز ۴۸۱ کیلوولت است. بنابراین اختلاف پتانسیل بین آند و الکتروود لنز ۱۴ کیلوولت است. این اختلاف پتانسیل با گام ۲ کیلوولت تغییر داده شده است و تغییرات پروفایل باریکه خروجی در شکل ۱۵ آورده شده است. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با تغییر ولتاژ الکتروود لنز، شعاع کمر باریکه تغییر نمی‌کند اما شکل گوسی باریکه در طول ستون شتاب‌دهی تغییر می‌کند؛ به همین دلیل ولتاژ این الکتروود متغیر در نظر گرفته شد تا بتوان با تغییر ولتاژ آن شکل باریکه را تنظیم کرد.

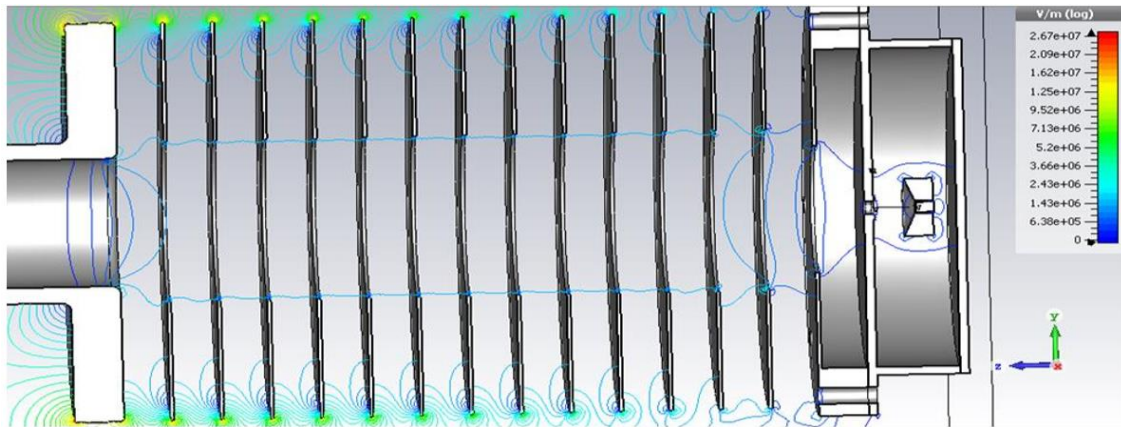
#### ۵.۲. تاثیر ضریب محافظت در باریکه خروجی ستون

##### شتاب‌دهی

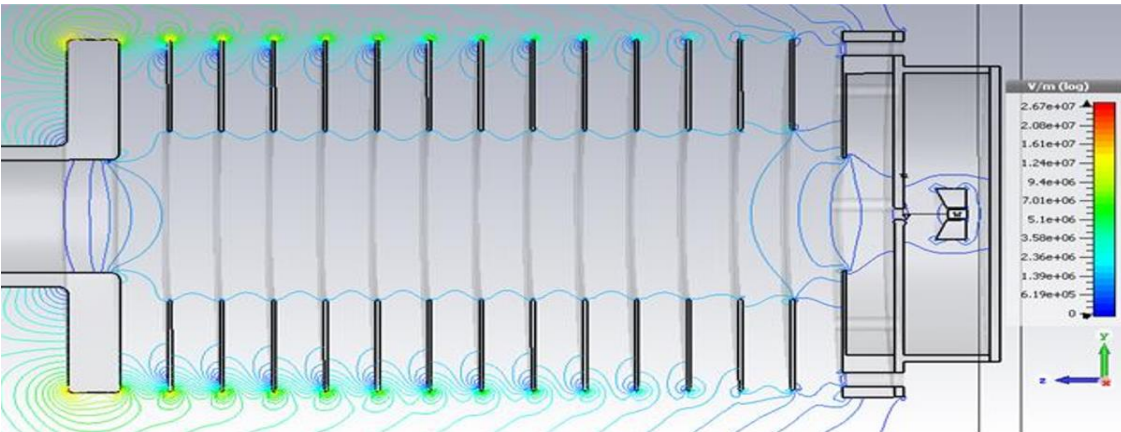
به منظور بررسی دقیق‌تر، طراحی ستون شتاب‌دهنده با الکتروود تخت، ضریب محافظت و نسبت  $\frac{r}{s}$  را در نظر گرفته شده است.



الف

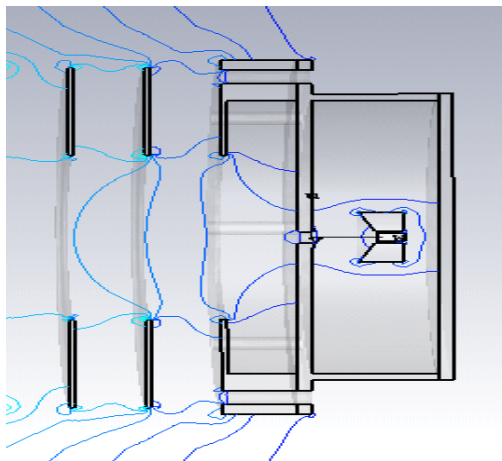


ب

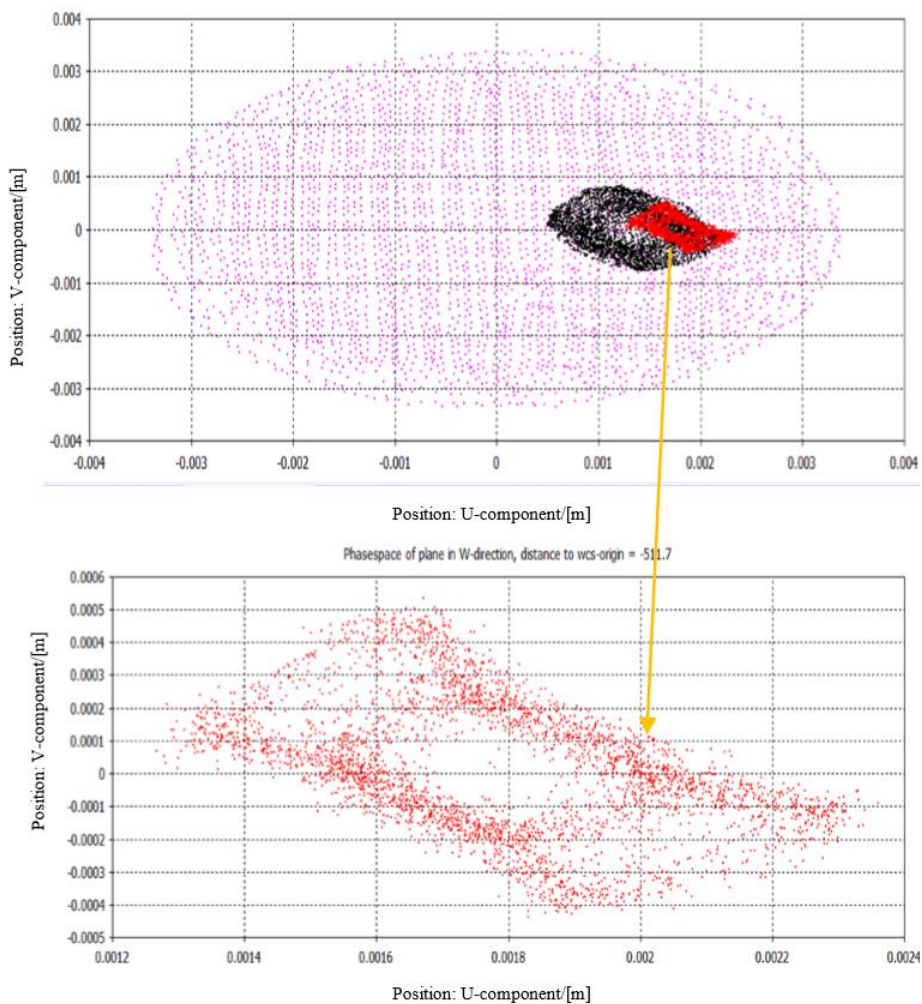


ج

شکل ۱۱. خطوط میدان الکتریکی در ستون با الکتروود شتاب‌دهی در هندسه b (الف) با شعاع داخلی ۴۰ میلی‌متر و (ب) با شعاع داخلی ۵۰ میلی‌متر و (ج) با شعاع داخلی ۶۰ میلی‌متر.



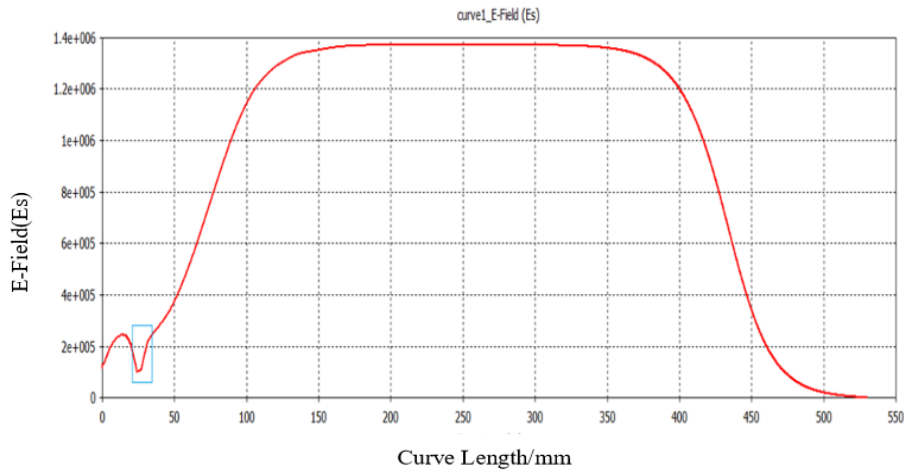
شکل ۱۲. خطوط میدان در الکترودهای کنترلی در هندسه b با شعاع داخلی ۶۰ میلی متر.



الف

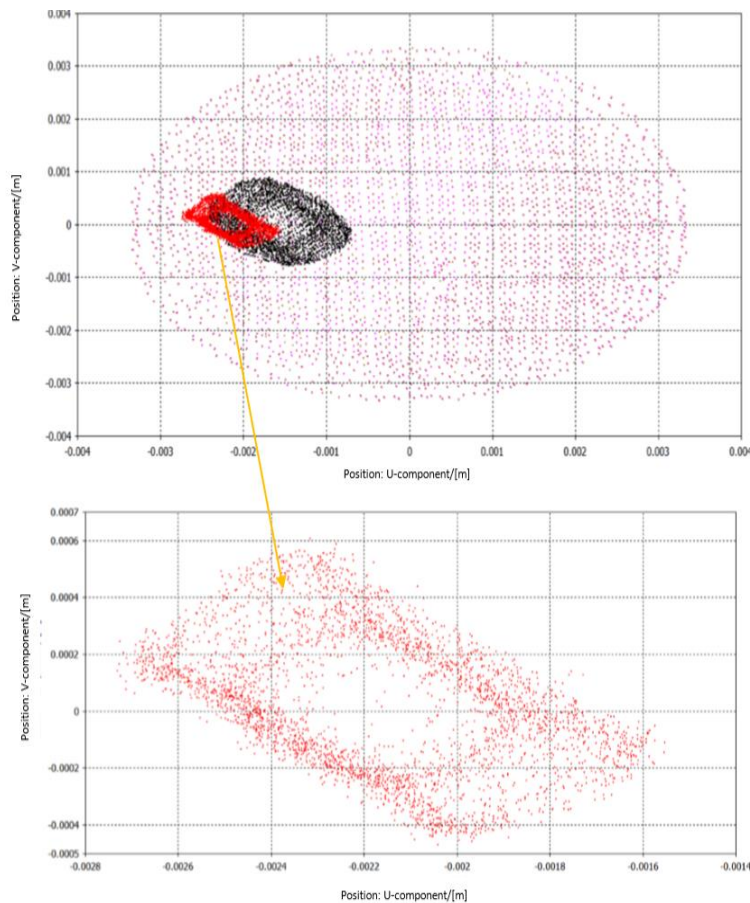
ب

شکل ۱۳.



ج

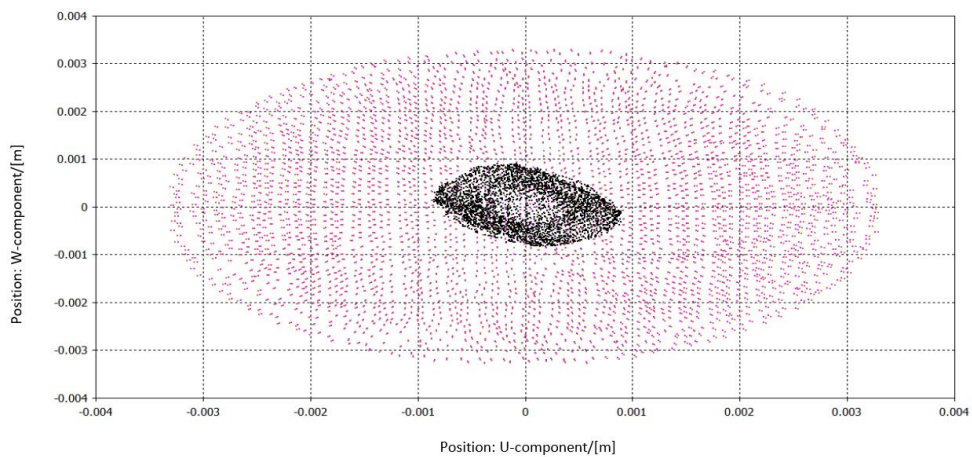
ادامه شکل ۱۳. در حالتی که الکترون اول در هندسه b، ۲ میلی‌متر از محور خودش منحرف شود (الف) روند تغییرات شعاع کمر باریکه (رنگ قرمز) در فاصله ۵۱ سانتی‌متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح کاتد و رنگ صورتی در سطح دهانه آند است. (ب) پروفایل ذرات خروجی در انتهای ستون و (ج) میدان الکتریکی در طول ستون.



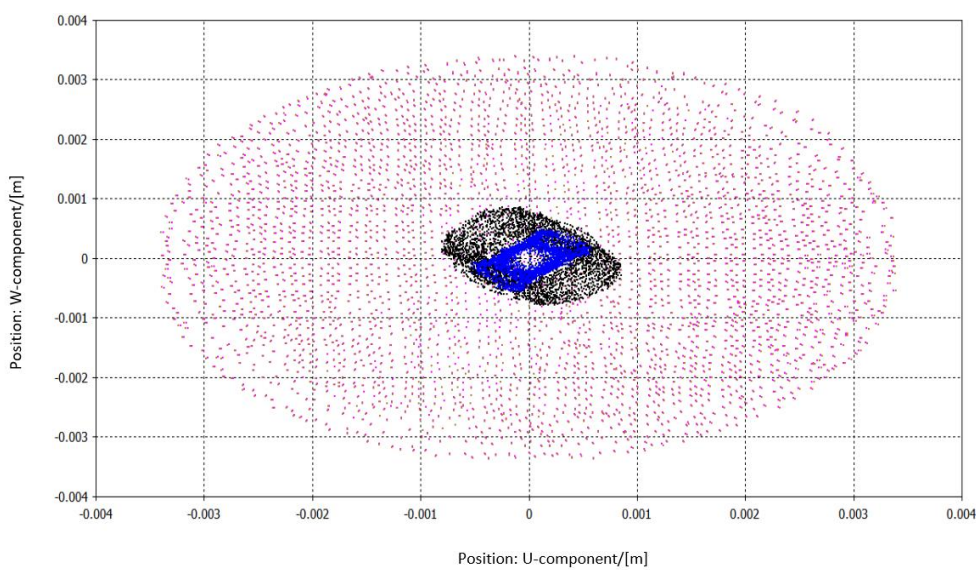
الف

ب

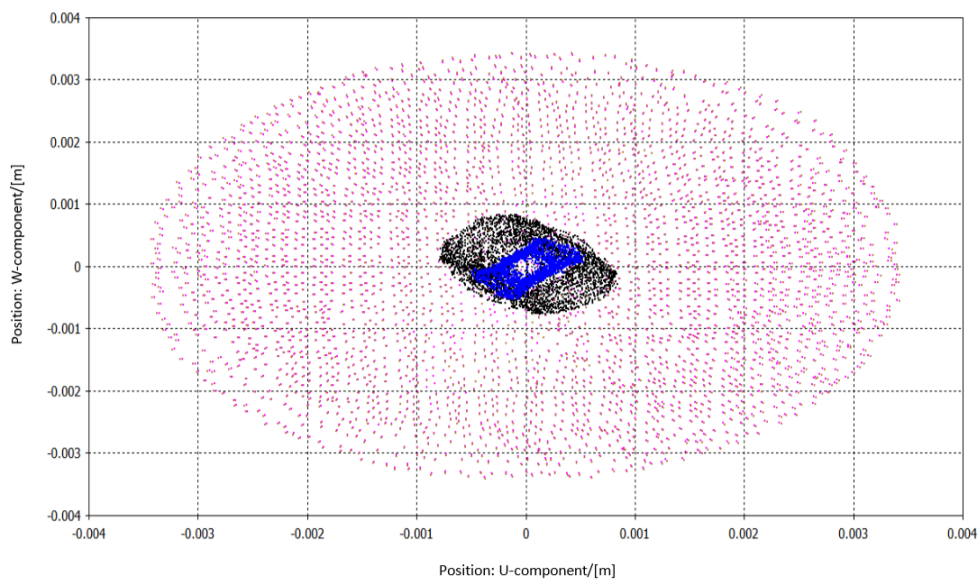
شکل ۱۴. در حالتی که اولین الکترون ستون در هندسه b، ۲ درجه از محور خود منحرف شود (الف) تغییرات شعاع کمر باریکه و (ب) شعاع کمر باریکه در انتهای ستون. رنگ قرمز در فاصله ۵۱ سانتی‌متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی‌متر از سطح کاتد و رنگ صورتی در سطح دهانه آند است.



الف

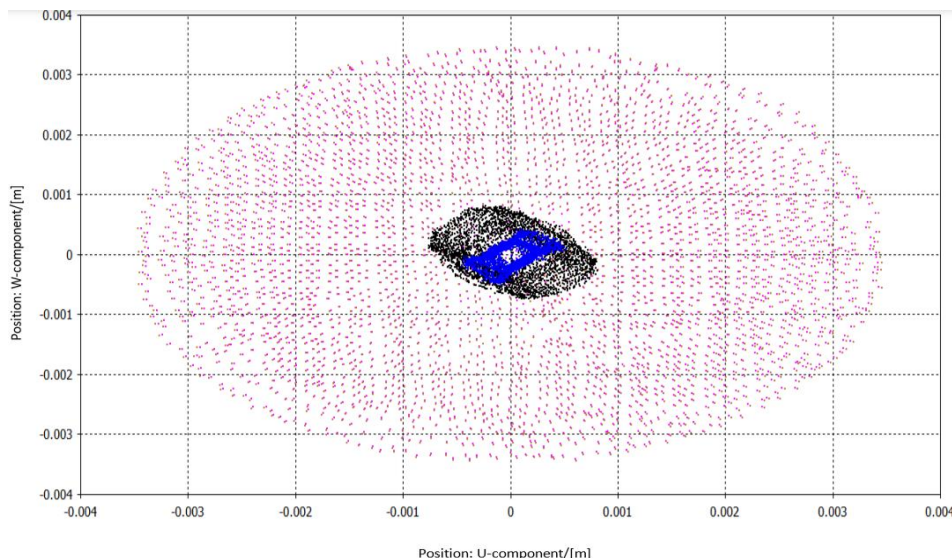


ب

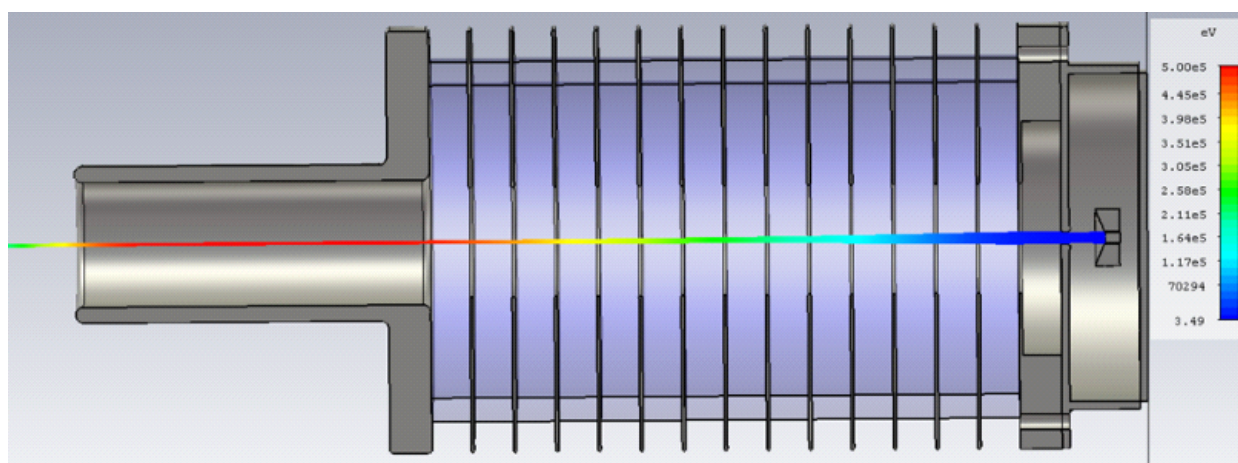


ج





شکل ۱۵. تغییر ولتاژ الکتروود لنز در هندسه **b** (الف) ولتاژ لنز ۴۸۱ کیلوولت، (ب) ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۳ کیلوولت، (ج) ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۵ کیلوولت و (د) ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۷ کیلوولت. رنگ آبی در فاصله ۵۱ سانتی‌متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از سطح کاتد و رنگ صورتی در سطح دهانه آند است.



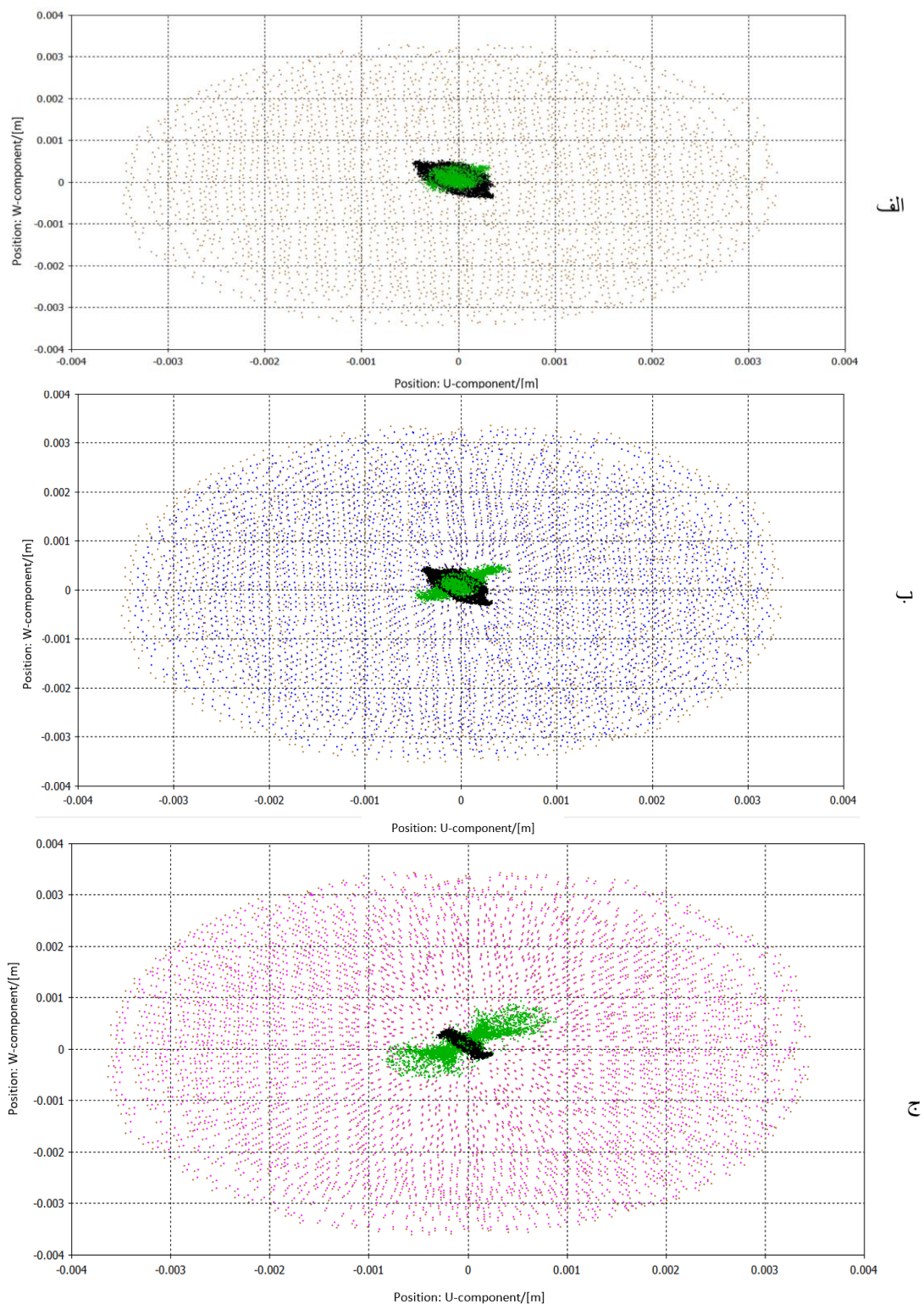
شکل ۱۶. مسیر باریکه در هندسه **c**.

درپوش به آند متصل و هم‌پتانسیل با آن است. بررسی جابه‌جایی الکتروود اول و همچنین انحراف الکتروود اول نسبت به محور ستون شتاب‌دهنده مشخص می‌کند که با کوچک‌ترین جابه‌جایی این الکتروود، مسیر باریکه در طول ستون شتاب‌دهی منحرف شده و موجب آسیب به بدنه و عایق‌ها خواهد شد. از طرف دیگر ممکن است به مرور زمان الکتروودها کمی نسبت به محور ستون شتاب‌دهی جابه‌جا شوند که در شتاب‌دهنده‌های

نیست. بنابراین ولتاژ الکتروود لنز، بین ۴۸۰ تا ۴۸۵ کیلوولت متغیر خواهد بود.

### ۳. نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، برای کاتد تفنگ الکترونی، بایستی درپوشی طراحی شود تا میدان الکتریکی اطراف کاتد ضعیف‌تر و میدان انتهای ستون شتاب‌دهنده قوی‌تر شود. این



شکل ۱۷. تغییر ولتاژ لنز هندسه c (لف) ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۱ کیلوولت، (ب) ولتاژ الکتروود لنز ۴۸۵ کیلوولت و (ج) ولتاژ الکتروود لنز ۴۹۰ کیلوولت. رنگ سبز در فاصله ۵۱ سانتی متری از سطح کاتد، رنگ مشکی در فاصله ۴۰ سانتی از سطح کاتد و رنگ‌های آبی و صورتی در سطح دهانه آند است.

در این هندسه، مسیر باریکه در طول ستون شتاب‌دهی، کانونی و گوسی است. با توجه به نتایج به دست آمده، فاصله بین الکترودهای ستون ۲/۵ سانتی‌متر، شعاع داخلی آنها ۳/۵ سانتی‌متر و شعاع خارجی آنها ۱۳/۵ سانتی‌متر انتخاب شدند. عایق‌های طراحی شده برای این ستون‌ها نیز دارای شعاع داخلی ۸/۵ سانتی‌متر، شعاع خارجی ۱۰/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر به دست آمدند.

صنعتی، برای اصلاح این ایراد، معمولاً ولتاژ الکترودهای اولیه را متغیر در نظر می‌گیرند تا بتوانند مسیر باریکه را با تغییر ولتاژ این الکترودها تنظیم کنند. علاوه بر این، در ساخت شتاب‌دهنده‌های داینامیتر، باید مقدار  $\frac{r}{s}$  در محدوده مناسب بوده و از ۳ بیشتر نشود. نکته دیگر، در طراحی و ساخت ستون شتاب‌دهنده داینامیتر، باید شعاع الکترو فیلتر، الکترو لنز و الکترودهای شتاب‌دهی برابر باشند.

بنابر توضیحات داده شده و بررسی‌های انجام شده در ستون شتاب‌دهنده داینامیتر با ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت و با هندسه‌های a، b و c کمترین شعاع کمر باریکه در هندسه c به دست آمد.

## مراجع

10. PIERCE, J, "Traveling-Wave Tubes", D. Van Nostrand Company, Inc, (1950).
11. آصادقی پناه، ف عباسی دوانی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۲۴۳.
11. ۱ (۱۳۹۰) ۷.
11. A Sadeghipanah and F Abbasi Davani, *Iran. J. Phys. Res.* **11**, 1 (2011) 7.
12. ع محمد پورصالح، ح خلفی و س حاصل طلب، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۱۳۷.
12. A M Poursaleh and H Khalafi, *Iran. J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 137.
13. م لامعی رشتی، ف عباسی دوانی و ف قاسمی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۲۰۵.
13. M. Lamehi Rashti, F Abbasi Davani, and F Ghasemi, *Iran. J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 205.
14. پ طاهر پرور و ج رحیقی، مجله سنجش و ایمنی پرتو ۱، ۵ (۱۳۹۵) ۱.
15. M Nazari, et al., 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea (2016).
۱. ح ر مرادی و...، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۲۴۳.
1. H R Moradi and A M Aghayan, *Iran. J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 243.
۲. م نظم‌آبادی و...، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۲ (۱۳۹۴) ۱۲۹.
2. M Nazmabadi and HGhods, *Iran. J. Phys. Res.* **15**, 2 (2015) 129.
۳. س احمدیان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هسته‌ای (۱۳۹۰).
4. H Ishimaru, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **2** (1984) 1170.
۵. پ طاهر پرور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (۱۳۸۷).
6. M Irving. *New Electrostatic Accelerator, Review of Scientific Instruments* **30** (1959) 855.
7. S Ahmadiannamin, *JACoW*, (2014) 3847.
8. Marton, "Methodes of experimental physics", Vol 4, part A, Academic press, New York (1967).
9. A Septier, "focusing of charged particles", Academic Press (1967).