

طراحی تفنگ الکترونی ۵۰ میلی آمپری برای استفاده در یک شتاب‌دهنده دینامیترون

معصومه غلامی اکبرآباد*^۱، محمدرضا قاسمی^۲، علی اصغر شکری^۱، علیرضا گرایلی^۲

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۵۳۳۳۵۱۱، تهران - ایران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۱۰

چکیده: این مقاله طراحی تفنگ الکترونی گرمایونی با دو هندسه‌ی متفاوت، کاتد مسطح و کاتد کروی را ارائه می‌دهد. هدف از انجام این پژوهش، پاسخ به این پرسش است که چه نوع تفنگ الکترونی برای شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیک صنعتی مناسب‌اند. در طراحی تفنگ‌های مورد نظر از نرم‌افزار سی اس تی استودیو استفاده شده است. مشخصه‌های مورد نظر در طراحی تفنگ گرمایونی مناسب، حداکثر جریان 50 mA و ولتاژ 5 تا 10 kV است که برای به‌کارگیری در شتاب‌دهنده‌ی دینامیترون انتخاب شده است. جریان باریکه، شعاع کمر باریکه، مکان کمر باریکه و نفوذ تفنگ با کاتد مسطح و تفنگ با کاتد کروی به ترتیب 49 و 49.8 mA ، 3.2 و 0.45 mm ، 36 و 24.3 mm ، 0.138 و $0.0498 \mu\text{perv}$ به دست آمد. از آنجایی که تفنگ‌های الکترونی که در صنایع به کار می‌روند، نفوذ بین 0.1 تا $1 \mu\text{perv}$ دارند بنابراین تفنگ الکترونی با کاتد مسطح با نفوذ $0.138 \mu\text{perv}$ مناسب‌تر است. از طرف دیگر ساخت آن آسان‌تر و کم هزینه‌تر است به همین دلیل تفنگ با کاتد مسطح انتخاب و ابعاد نهایی آن ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: تفنگ الکترونی، شتاب‌دهنده‌ی دینامیترون، نرم‌افزار سی اس تی استودیو

Design of electron gun with a current of 50 mA for use in a dynamitron accelerator

M. Gholami Akbarabad*¹, M. Ghasemi², A. Shokri¹, A. Grayli²

1. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.Box: 1953633511, Tehran - Iran

2. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Abstract: This paper presents the design of a thermionic electron gun with two different geometries, flat cathode and spherical cathode. The purpose of this research is to answer the question of which type of electron gun is suitable for industrial electrostatic accelerators. CST Studio software was used to design the guns. The desired specification in the design of a suitable thermionic gun, the maximum current of 50 milliamper and the voltage 5 to 10 kilovolt, is selected for use in the dynamitron accelerator. The beam current, the waist beam radius, the waist beam position and the perveance of a flat cathode gun and spherical cathode gun were 49 and 49.8 mA, 3.2 and 0.45 mm, 36 and 24.3mm, 0.138 and 0.0498 μperv , respectively. Since the electron guns used in the industry have a perveance between 0.1 to 1 μperv therefore, an electron gun with a flat cathode with 0.138 μperv is more suitable. On the other hand, it is easier and less costly to make it. That is why the gun with a flat cathode was chosen and its final dimensions are presented.

Keywords: Electron gun, Dynamitron accelerator, CST studio software

*Email: gholami219@gmail.com

۱. مقدمه

قادر به جمع‌آوری تمام بار منفی تولید شده نباشد، از این‌رو یک بار فضایی منفی ناشی از وجود الکترون‌ها در جلوی سطح کاتد تشکیل می‌شود که این بار فضایی از گسیل بیشتر الکترون از سطح کاتد جلوگیری می‌کند. حال اگر هم‌چنان دمای کاتد افزایش یابد، تأثیری روی میزان جریان گسیل شده از سطح کاتد نخواهد داشت. به عبارت دیگر، کارکرد تفنگ از طریقه‌ی دمایی وارد طریقه‌ی بار فضایی محدود می‌شود. از این به بعد تنها با تغییر دادن اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد می‌توان جریان تفنگ را کنترل کرد. دمایی که در آن طریقه‌ی کارکرد تفنگ عوض می‌شود دمای بحرانی نامیده می‌شود. در طریقه‌ی بار فضایی، چگالی جریان خروجی از تفنگ از رابطه‌ی ریچاردسون- داشمن پیروی نمی‌کند بلکه رابطه‌ی چایلد- لانگمویر تعیین‌کننده‌ی چگالی جریان است [۴]:

$$J = \frac{4 \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V^{3/2}}{x^2} = 2,33 \times 10^{-6} \frac{V^{3/2}}{x^2} \quad (2)$$

در این جا l ، بار الکترون، m جرم الکترون، V پتانسیل بین آند و کاتد و x فاصله‌ی بین آند و کاتد است. در طریقه‌ی بارفضایی محدود، یکی از کمیت‌های مهم در تفنگ‌های الکترونی، کمیت نفوذ^۱ است. این کمیت یک ثابت عددی است که جریان و ولتاژ را در دیودهای با بار فضایی محدود به هم مرتبط می‌سازد و از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۴، ۵]:

$$P = \frac{I}{V^{3/2}} \quad (3)$$

این کمیت بسیار وابسته به هندسه‌ی سیستم دیود و نوع ذره است. در شرایطی که ولتاژ به کار رفته در این رابطه، ولتاژ کاتد- آند باشد این رابطه کمیت نفوذ تفنگ و در حالتی که این ولتاژ بین کاتد و مدار باشد، کمیت نفوذ باریکه نامیده می‌شود. این کمیت اهمیت ویژه‌ای در طراحی و انتخاب تفنگ‌های الکترونی ایفا می‌کند و واحد آن μperv است. برای دیودی با فاصله‌ی کاتد- آند، $x = d$ و مساحت سطح A و با توجه به رابطه‌ی ۲ کمیت نفوذ چنین تعریف می‌شود [۶].

$$P = \frac{4 \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{A}{x^2} = 2,33 \times 10^{-6} \frac{A}{d^2} \quad (4)$$

شتاب‌دهنده‌های الکتروستاتیک الکترون از یک مولد ولتاژ بالای متصل به یک لوله‌ی شتاب‌دهنده‌ی 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 [۱].

چشمه‌ی الکترون (تفنگ الکترونی) یک کاتد با یونش گرمایی است که در آن معمولاً یک قطعه سیم از جنس تنگستن گسیل الکترون را به‌عهده دارد. البته از مواد دیگری چون سیم تانتالوم یا دانه‌های لیتیم هگزافلورید نیز برای «تولید» الکترون استفاده می‌شود [۲، ۳]. گسیل الکترون با تغییر دمای کاتد حاصل از تغییر جریان رشته (فیلامان) و تغییر ولتاژ بین الکتروود و شبکه، کنترل می‌شود. الکترون‌های گسیل شده، استخراج و پس از کانونی شدن شتاب می‌گیرند. این عمل به کمک میدان الکتریکی داخلی که به وسیله‌ی مجموعه‌ای از الکتروودها و دینودهای دارای پتانسیل‌های متوسط ایجاد شده است، انجام می‌شود. در شتاب‌دهنده‌های صنعتی الکترون، از تفنگ‌های الکترونی گرما یونی در دو طریقه‌ی دمایی و بارفضایی استفاده می‌شود. هنگامی که تفنگ در طریقه‌ی دمایی کار می‌کند جریان گسیل شده از رابطه‌ی ریچاردسون- داشمن تبعیت می‌کند [۲]. بر طبق این رابطه چگالی جریان گسیل شده از تفنگ تنها به دما و تابع کار کاتد بستگی دارد.

$$J = AT^2 e^{(-w/kT)} \quad (1)$$

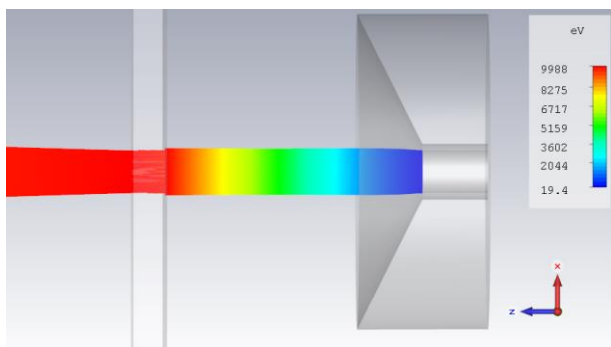
که در آن T دمای کاتد برحسب کلونین، $k = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ ثابت بولتزمن، w تابع کار کاتد و A ثابتی برابر با $1,2 \times 10^6 \text{ Am}^{-2} \text{ K}^{-2}$ است. با توجه به این رابطه مشاهده می‌شود که چگالی جریان گسیل شده، با افزایش دما و کاهش تابع کار افزایش می‌یابد. بنابراین برای داشتن چگالی جریان بالا باید از فلزهایی با تابع کار کوچک و دمای ذوب بالا استفاده کرد.

با افزایش دمای کاتد، جریان گسیل شده از آن افزایش خواهد یافت. افزایش بیش‌تر دما و به تبع آن افزایش تعداد الکترون‌ها، موجب می‌شود که اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد

1. Perveance

در چگالی جریان گسیل شده از رشته (کاتد) تنها جنس رشته یعنی تابع کار و دمای آن اهمیت دارد و شکل کاتد فاقد اهمیت است. البته در عمل، شکل رشته تأثیرگذار است ولی در فرمول ریچاردسون شکل کاتد وارد نشده است. براساس جریانی که از رشته شارش می‌یابد می‌توان از رابطه‌ی رشته $T = 735 + 178 \cdot I$ دمای رشته را محاسبه کرد. البته این رابطه تنها در مورد رشته‌ی تنگستن صادق است [۹]. مقاومت پایین تنگستن باعث شده است با عبور جریان کمی از آن، دما بالا رود و جریان مناسبی تولید شود، از طرف دیگر در دسترس‌ترین و ارزان‌ترین نوع رشته است و به همین دلیل تنگستن برای جنس کاتد تفنگ الکترونی این مقاله در نظر گرفته شد. تابع کار این فلز 4.5 eV و چگالی جریان تولید شده به وسیله‌ی آن 0.3 A cm^{-2} در دمای 2200 K است. به منظور افزایش عمر کاتد، باید دمای کار آن را کم‌تر از 2200 K انتخاب نمود. البته، کاهش دمای کاتد موجب کاهش چگالی جریان خواهد شد. فرض می‌کنیم دمای کاتد تا جایی کم شود که چگالی جریان آن به 0.15 A cm^{-2} برسد، با استفاده از رابطه‌ی چگالی جریان (J)، مساحت سطح کاتد (A)، 0.33 cm^2 و شعاع کاتد (r)، 3.25 mm به دست می‌آید. قطر دهانه‌ی آند 7 mm و ضخامت آن 5 mm است.

از آنجایی که در بیش‌تر تفنگ‌های الکترونی صنعتی، ولتاژ کاتد 10 kV است، در طراحی اولیه، ولتاژ کاتد مسطح 10 kV در نظر گرفته شد و فاصله‌ی کاتد-آند، 39.4 mm به دست آمد. اما در این طراحی الکترون‌ها به سطح آند برخورد کرده و منحنی مسیر باریکه واگرا به دست آمد. شکل ۱ منحنی مسیر باریکه را در طراحی اولیه نشان می‌دهد.



شکل ۱. منحنی مسیر باریکه در طراحی اولیه.

مطابق این رابطه کمیت نفوذ تابعی از هندسه‌ی دیود است. برای کاتدهای کروی و استوانه‌ای، این کمیت از رابطه‌ی ۳ پیروی می‌کند [۶].

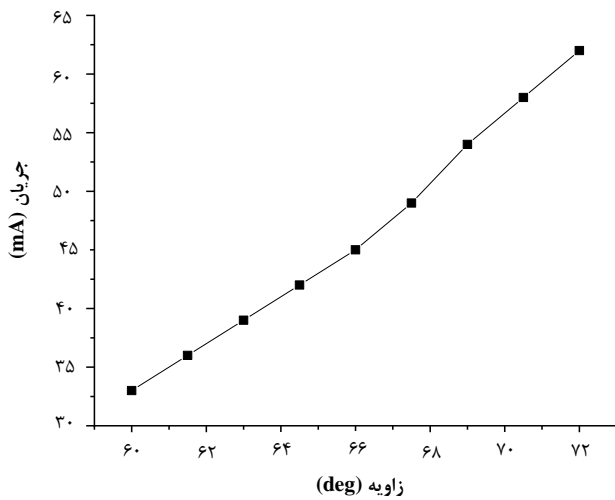
یک شتاب‌دهنده‌ی صنعتی انرژی- پایین با توان متوسط، کاربرد گسترده‌ای در صنعت پلی‌مر، لاستیک‌سازی، کابل‌سازی و ... دارد. این شتاب‌دهنده‌ها انواع مختلفی دارند که دینامیترتون پرکاربردترین آن‌ها است. ساخت یک شتاب‌دهنده‌ی دینامیترتون از پروژه‌های جدی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای است. در این پروژه مقرر است ضمن طراحی و ساخت مولد ولتاژ بالای مناسب این شتاب‌دهنده، طراحی‌های لازم برای لوله‌ی شتابدهی آن نیز انجام شود. این مقاله طراحی یک تفنگ الکترونی مناسب برای این شتاب‌دهنده را ارائه می‌دهد.

شتاب‌دهنده‌ی مورد نظر در این پژوهش یک شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیک صنعتی از نوع دینامیترتون با انرژی 500 keV و جریان باریکه‌ی 50 mA است. تفنگ الکترونی مورد نیاز برای این شتاب‌دهنده باید بتواند باریکه‌ای پیوسته با نفوذ بین 0.1 تا $1 \mu\text{perv}$ تولید کند. برای دستیابی به باریکه‌ای با اتلاف اندک، مکان کمر باریکه باید در فضای پشت آند قرار بگیرد. هم‌چنین برای پرتودهی مناسب و یکنواخت، شعاع کمر باریکه در این نوع شتاب‌دهنده‌ها باید بین 2 تا 4 mm باشد [۷، ۸].

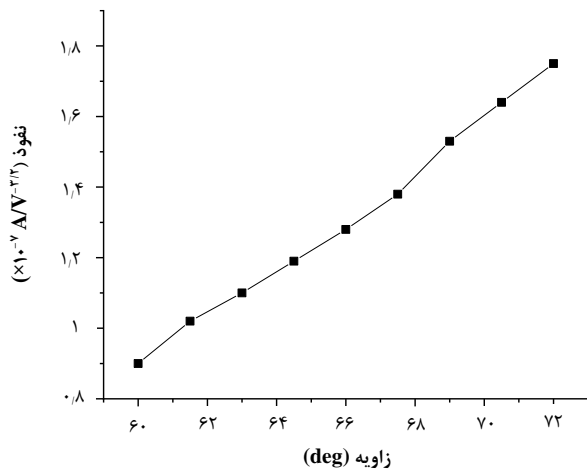
به منظور بررسی تفنگ مناسب برای شتاب‌دهنده‌ی دینامیترتون مورد نظر، دو تفنگ الکترونی با کاتد مسطح و با کاتد کروی با حداکثر جریان 50 mA و ولتاژ 5 تا 10 kV طراحی شده‌اند که در ادامه ارائه می‌شوند.

۲. تفنگ الکترونی با کاتد مسطح

کاتدهای گرمایونی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم گرم می‌شوند. در کاتدهایی که به روش مستقیم گرم می‌شوند رشته نقش گسیلنده را نیز بر عهده دارد یعنی هم‌زمان با عبور جریان از رشته و گرم شدن آن، الکترون نیز گسیل می‌شود بنابراین در نتیجه‌ی تغییر جریان گرم‌کننده، تغییرات ولتاژی در سراسر سطح کاتد به وجود می‌آید که مطلوب نیستند. در کاتدهایی که به روش غیرمستقیم گرم می‌شوند، گرم‌کننده و سطح گسیلنده از یکدیگر مجزا بوده و در نتیجه سطح کاتد در پتانسیل کاملاً یکنواختی قرار می‌گیرد.



شکل ۳. رابطه‌ی بین جریان و زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده.

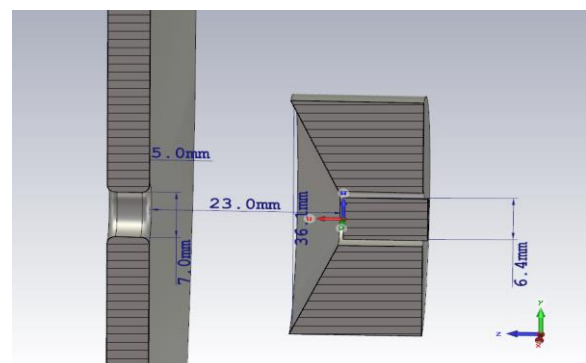


شکل ۴. رابطه‌ی بین نفوذ و زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده.

از آنجایی که پتانسیل کاتد در مختصات قطبی،

$$V(r, \theta) = A |r|^{4/3} \cos \frac{4}{3} \theta$$
 است با افزایش زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده بین 60° تا 72° ، مقدار کسینوس زاویه کاهش و در نتیجه پتانسیل کاهش می‌یابد [۳]. با کاهش مقدار پتانسیل، جریان باریکه و نفوذ افزایش پیدا می‌کند که با نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی مطابقت دارد (شکل‌های ۳ و ۴). نقطه‌ای که در آن باریکه کم‌ترین شعاع مربوط خود را دارد و بعد از آن دچار واگرایی می‌شود کم‌باریکه است. افزایش زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد موجب افزایش جریان، نفوذ و شعاع کم‌باریکه خواهد شد. شکل ۵ نمایه‌ی ذره‌های خروجی از تفنگ را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل منحنی مسیر و کانونی نبودن باریکه، طراحی کاتد مسطح مجدد انجام شد. در طراحی مجدد ولتاژ کاتد ۵ kV در نظر گرفته شد. با این ولتاژ فاصله‌ی کاتد- آند (d) از رابطه‌ی چایلد- لانگمویر، ۲۳ mm به دست آمد. به منظور حصول باریکه‌ی الکترونی همگرا، یک الکتروود متمرکزکننده^۱ طراحی شد که کاتد را احاطه کرده و هم‌پتانسیل با آن بود [۱۰]. این الکتروود باید به گونه‌ای طراحی می‌شد که در نبود الکترون، خطوط هم‌پتانسیل به سمت کاتد انحنای می‌یافتند، 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 می‌شد. مطابق شکل ۲، الکتروود همگراکننده در نزدیکی کاتد قرار گرفته و نوک آن به سمت آند انحنای یافته است. فاصله‌ی این الکتروود با کاتد ۱ mm است. تفنگ الکترونی با کاتد مسطح در شکل ۲ آورده شده است. در شبیه‌سازی انجام شده با نرم‌افزار سی اس تی استودیو، فاصله‌ی کاتد- آند و زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح افقی آن قدر تغییر داده شد تا جریان باریکه حدود ۵۰ mA و مسیر باریکه در فاصله‌ی کاتد- آند همگرا و پس از عبور از آند واگرا شود. مهم‌ترین پارامتر در مقدار جریان باریکه، فاصله‌ی آند از کاتد، و مهم‌ترین پارامتر در منحنی مسیر باریکه، زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به کاتد است. زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده با سطح کاتد بین 60° تا 72° تغییر داده شد. تغییرات جریان باریکه و تغییرات نفوذ با تغییر زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

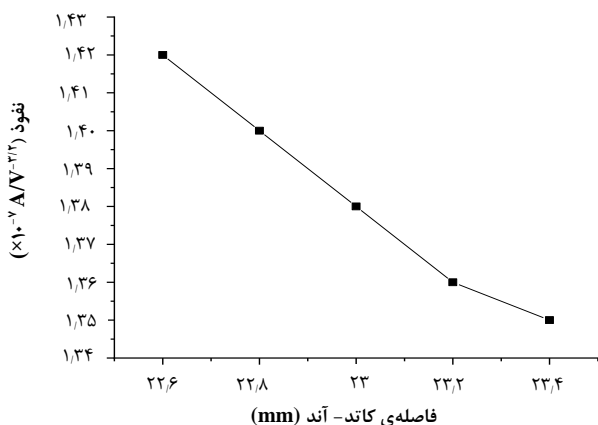


شکل ۲. ابعاد تفنگ با کاتد مسطح.

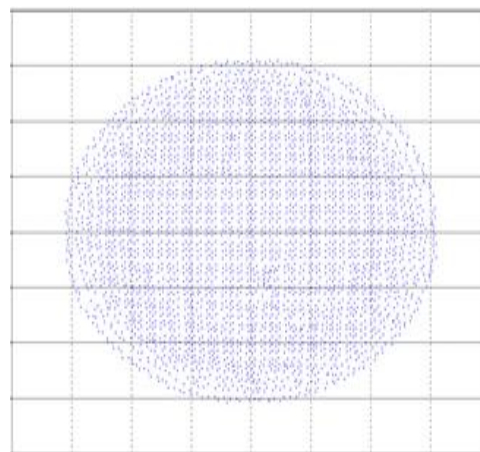
1. Pierce

تغییرات جریان با تغییر فاصله‌ی بین کاتد و آند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله، جریان کاهش می‌یابد.

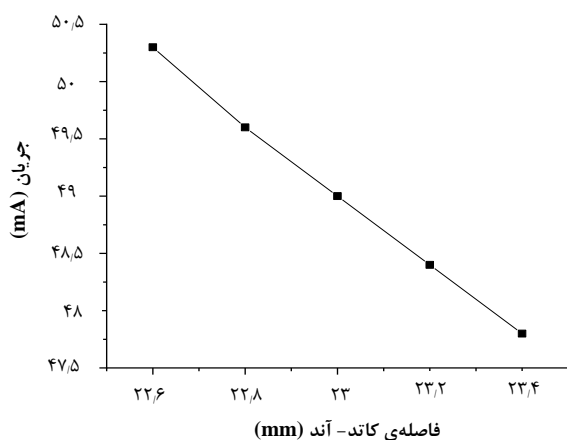
در این شبیه‌سازی‌ها d (فاصله‌ی کاتد تا آند) و θ (زاویه الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد) بارها تغییر داده شد و بهترین منحنی مسیر باریکه، در فاصله‌ی 23 mm از کاتد-آند و زاویه‌ی $67/5^\circ$ به دست آمد. شکل ۸، شبیه‌سازی منحنی مسیر باریکه را نشان می‌دهد.



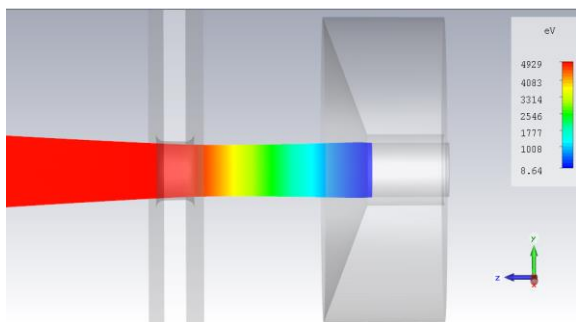
شکل ۵. نمایه‌ی ذره‌های خروجی از تفنگ الکترونی با کاتد مسطح.



شکل ۶. رابطه‌ی بین نفوذ و فاصله‌ی کاتد-آند.



شکل ۷. تغییرات جریان با تغییر فاصله‌ی بین کاتد و آند.



شکل ۸. منحنی مسیر باریکه.

نمایه‌ی ذره‌های خروجی از تفنگ کاملاً گاوسی است. منظور از گاوسی بودن، تمرکز بیشتر ذره‌ها در مرکز نمایه است. شعاع کمر باریکه در فاصله‌ی 36 mm از سطح کاتد حدود $3/2\text{ mm}$ است که این مقدار در واقع شعاع نمایه‌ی ذره‌های خروجی است. حالت بهینه در زاویه‌ی $67/5^\circ$ درجه با جریان 49 mA و نفوذ $1.38 \times 10^{-7} A V^{-3/2}$ به دست آمد.

منظور از بهترین باریکه (حالت بهینه) شرایطی است که زاویه‌ی θ مطابق با رابطه‌های نظری ارایه شده در مرجع [۳] در مقدار بهینه‌ی خود یعنی $67/5^\circ$ و فاصله‌ی آند تا کاتد 23 mm باشد. در چنین شرایطی نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با نتیجه‌های به دست آمده از رابطه‌های نظری کاملاً هم‌خوانی خواهند داشت و باریکه‌ی خروجی از تفنگ به اصطلاح شکلی لمینار یا لایه‌ای خواهد داشت.

پارامتر دیگری که در طراحی تفنگ الکترونی از اهمیت زیادی برخوردار است فاصله‌ی بین آند-کاتد است. برای بررسی این پارامتر فاصله‌ی بین آند و کاتد (d) در گستره‌ی $22/6$ تا $23/4\text{ mm}$ تغییر داده شد و تغییرات نفوذ به صورت نمودار شکل ۶ به دست آمد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود اگر فاصله آند-کاتد به مقدار بسیار ناچیز ($0/2\text{ mm}$) تغییر کند، نفوذ تغییرات بسیار زیادی خواهد داشت. در واقع نفوذ متناسب با عکس مجذور فاصله‌ی بین کاتد و آند است (رابطه‌ی ۴)، پس با افزایش d نفوذ کاهش می‌یابد و از آنجایی که جریان و نفوذ رابطه‌ی مستقیم با یکدیگر دارند (رابطه‌ی ۳) در نتیجه جریان کاهش خواهد داشت. بنابراین در ساخت تفنگ الکترونی، باید با دقت بالا فاصله‌ی بین کاتد و آند اندازه‌گیری شود. شکل ۷

۳. تفنگ الکترونی با کاتد کروی

تفنگ با هندسه‌ی کروی مزیت‌هایی نسبت به تفنگ مسطح دارد، از جمله مزیت‌های آن می‌توان به امکان ایجاد جریان‌های بالا از چشمه‌ای با چگالی جریان محدود اشاره نمود. علت این امر بزرگ‌تر بودن سطح کاتد نسبت به تفنگ‌های مسطح است. شکل خاص در نظر گرفته شده برای الکترودهای این نوع کاتدها، غلبه بر اثر لنز منفی و ایجاد باریکه‌ی الکترونی همگرا را ممکن می‌سازند، در نتیجه باریکه‌ی خروجی در دهانه‌ی آند، شعاع بسیار کوچکی خواهد داشت که این مسأله موجب کوچک شدن دهانه‌ی آند نسبت به ساختار مسطح می‌شود.

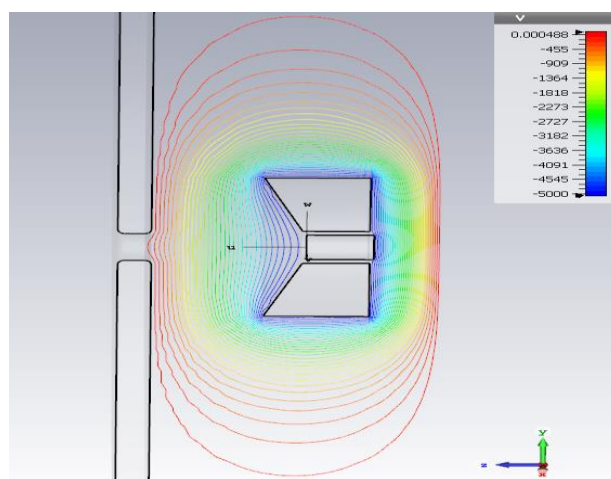
تفنگ با کاتد کروی به سه ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه‌ی اول کاتد است که شکل آن به صورت کروی فرض شده است. به منظور ایجاد سطح‌های هم‌پتانسیل تقریباً کروی با مرکز انحنا یکی‌سان الکتروده همگراکننده‌ای همانند کاتد در نظر گرفته می‌شود به نحوی که الکترون‌ها به سمت مرکز انحنا کاتد، جریان یابند. به دلیل حفره‌ی موجود در سطح آند، سطح‌های هم‌پتانسیل به داخل دهانه‌ی آند خم می‌شوند. در دیوده‌های کروی، سطح داخلی کره‌ی خارجی، کاتد و کره‌ی داخلی آند است. پیکربندی اولیه‌ی این نوع کاتد در شکل ۱۰ آورده شده است.

روش به کار رفته در تجزیه و تحلیل دیود کروی شبیه به دیود مسطح است. تنها تفاوت آن‌ها در این است که دیودهای کروی محاسبه‌های اندکی پیچیده‌تر دارند. برای جلوگیری از تمرکز بیش از حد باریکه‌ی الکترونی، شعاع تقعر کاتد بسیار بزرگ در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای سهولت در آزمون تفنگ، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد این تفنگ، ۱۰ kV انتخاب شد. جریان الکترونی موردنیاز برای شتاب‌دهنده‌ی دینامیترن مربوطه، جریان باریکه‌ای در حدود ۵۰ mA است. همانند کاتد مسطح، کاتد از جنس تنگستن، با تابع کار حدود ۴٫۵ eV و چگالی جریان گسیل‌شده‌ی 0.3 A cm^{-2} (در دمای ۲۲۰۰ K) در نظر گرفته شده است. برای طراحی تفنگ کروی باید پارامترهای به کار رفته در تجزیه و تحلیل دهانه‌ی آند را به‌دست آورد [۳، ۴]. این کمیت‌ها در شکل ۱۱ آورده شده‌اند.

مطابق شکل ۹، خطوط میدان به شکل منحنی‌های مماس بر سطح کاتد شکل گرفته‌اند. هم‌چنین خطوط هم‌پتانسیل، در سطح کاتد دارای انحنا لازم برای همگرا کردن الکترون‌های گسیل‌شده از سطح کاتد هستند.

نکته‌ای که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نفوذ خطوط هم‌پتانسیل به داخل حفره‌ی آند است. این پدیده سبب واگرایی باریکه‌ی الکترونی، در هنگام ورود به درون آند می‌شود. چنانچه حفره‌ی آند را کوچک‌تر در نظر بگیریم میزان انحنا این خطوط کم‌تر و در نتیجه باریکه پس از خروج از آند همگرایی بیشتری خواهد داشت. اما نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که کوچک بودن حفره‌ی آند باعث افزایش احتمال برخورد ذره‌ها به بدنه‌ی آند خواهد شد.

از دیگر نکات مهم، جلوگیری از ایجاد لبه‌های نوک تیز در اجزای مختلف تفنگ است. چگالی میدان الکتریکی در نقطه‌های تیز به شدت افزایش یافته و در نتیجه باعث ایجاد تخلیه‌ی الکتریکی و آسیب دیدن اجزای داخلی تفنگ می‌شود. در طراحی تفنگ موردنظر سعی شده است که تمام نقطه‌های نوک تیز تا حد امکان گرد شوند این امر سبب افزایش اطمینان از عملکرد ایمن تفنگ خواهد شد. این تفنگ برای تولید یک باریکه‌ی الکترونی با بیشینه جریان ۵۰ mA طراحی شده است. اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد تفنگ طراحی شده ۵ kV است.



شکل ۹. خطوط میدان الکتریکی.

در این جا، γ یک عدد ثابت است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{d}{R_c}} \right) \quad (7)$$

که در آن d فاصله‌ی کاتد تا آند و R_c شعاع انحنای کاتد است [۱۰، ۳]. با توجه به رابطه‌ی چگالی جریان مذکور، نفوذ برای این نوع تفنگ‌ها عبارت است از:

$$P = 14.67 \times 10^{-6} \frac{(1 - \cos \theta)}{(-\alpha)^2} \quad (8)$$

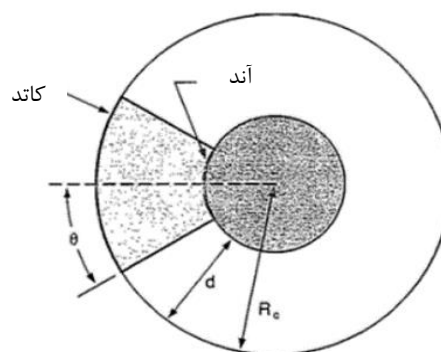
شکل ۱۲ مقدارهای نفوذ را به صورت تابعی از نیم‌زاویه‌ی مخروط و نسبت فاصله‌ی بین کاتد و آند به شعاع انحنای کاتد، نشان می‌دهد.

از آنجایی که نسبت d/R_c برای تفنگ‌های صنعتی بین ۰٫۶ تا ۰٫۷ است [۱۰]، این نسبت را ۰٫۶ در نظر می‌گیریم و ابعاد تفنگ با کاتد کروی را مطابق با جدول ۱ به دست می‌آوریم.

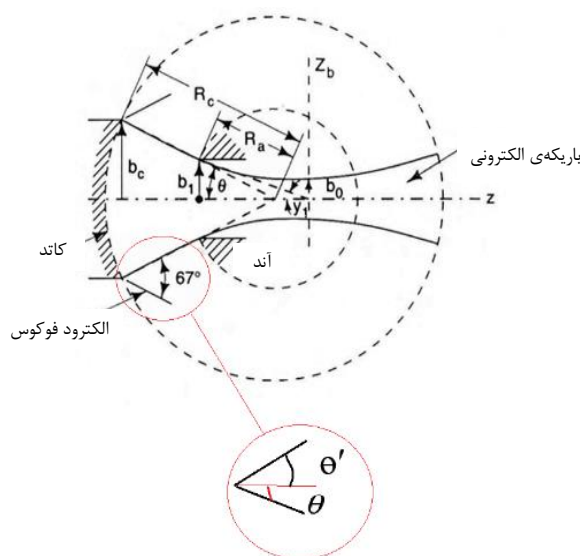
شکل ۱۳ تفنگ الکترونی با کاتد کروی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

به منظور دستیابی به بهترین حالت ممکن، زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد (θ'') از 60° تا 72° تغییر داده شد و تغییر جریان و تغییر نفوذ نسبت به تغییرات زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد به دست آمد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد، جریان افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه، مقدار کسینوس زاویه کاهش و در نهایت با توجه به رابطه‌ی ۵ مقدار جریان افزایش می‌یابد. از آنجایی که هدف از شبیه‌سازی، طراحی تفنگی با جریان ۵۰ mA است بنابراین، بهترین زاویه برای این تفنگ، 67.5° با جریان ۴۹٫۸ mA است که این زاویه با رابطه‌ی پیرس [۱۱] مطابقت دارد.

با توجه به رابطه‌ی ۸، با افزایش زاویه از 60° تا 72° ، مقدار کسینوس کاهش و نفوذ افزایش یافته است. تغییرات جریان و نفوذ با فاصله‌ی بین کاتد و آند، در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. پیکربندی اولیه‌ی کاتد کروی [۱۰، ۳].



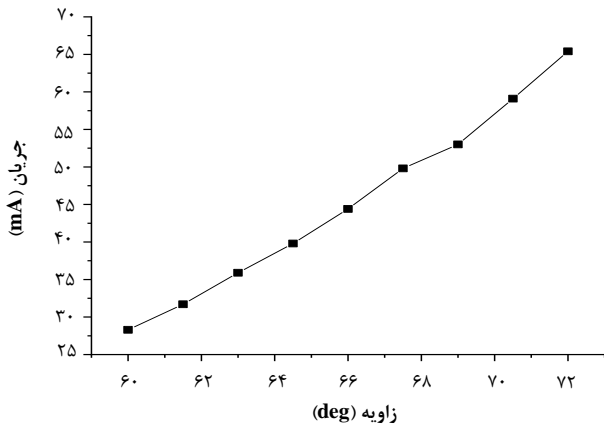
شکل ۱۱. پارامترهای به کار رفته در تجزیه و تحلیل دهانه‌ی آند [۱۰].

اگر نیم زاویه‌ی مخروط نشان داده شده θ باشد، در این صورت جریان گسیلیده از تفنگ کروی در شیوه‌ی بارفضایی محدود از رابطه زیر به دست می‌آید [۴]:

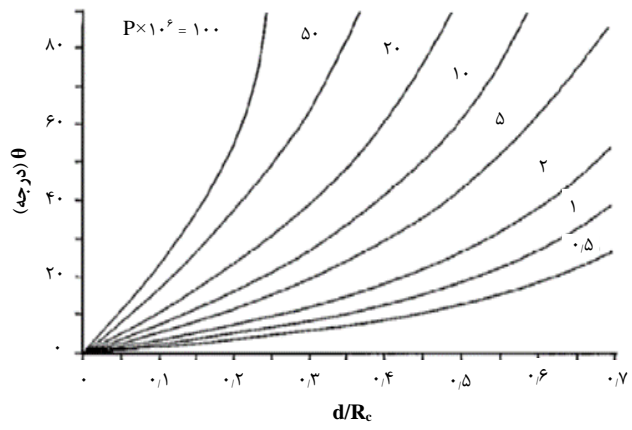
$$I = 14.67 \times 10^{-6} \frac{(1 - \cos \theta)}{(-\alpha)^2} V^{3/2} \quad (5)$$

که در آن V اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد بوده و α چنین به دست می‌آید:

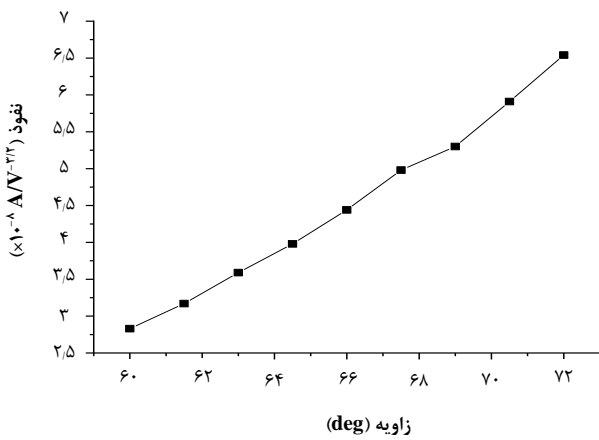
$$-\alpha = \gamma + 0.3\gamma^2 + 0.075\gamma^3 + 0.01432\gamma^4 + 0.00216\gamma^5 + 0.00035\gamma^6 \quad (6)$$



شکل ۱۴. تغییرات جریان با تغییر زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده.



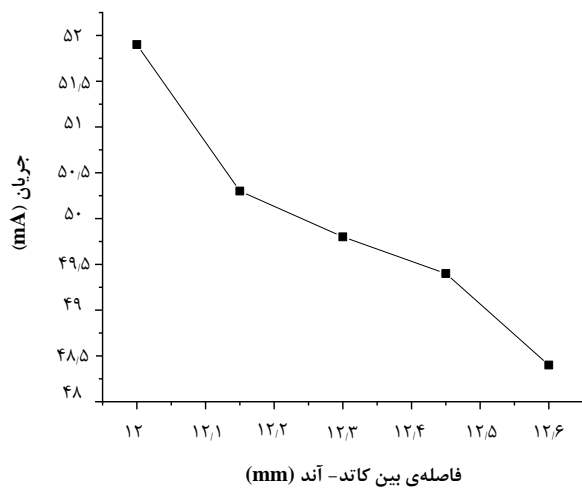
شکل ۱۲. نفوذ به صورت تابعی از نیم‌زاویه θ و نسبت d/R_c [۴].



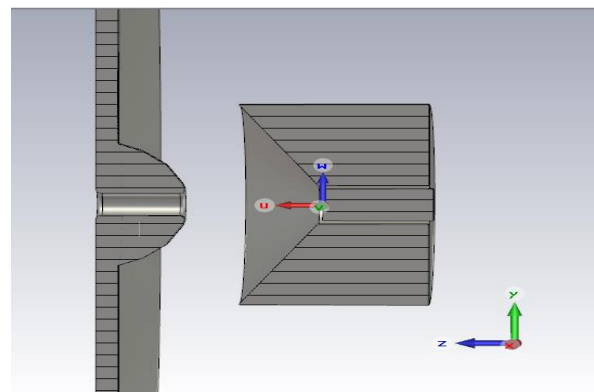
شکل ۱۵. تغییرات نفوذ با تغییر زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده.

جدول ۱. مشخصه‌های تفنگ با کاتد کروی طراحی شده

مقدار	متغیر
۵۰ mA	I
۱۰ kV	V
۲۰٫۶ mm	R_c
۲٫۱ mm	r_c
۸٫۲ mm	R_a
۱٫۵ mm	r_a
۱۲٫۳ mm	d
6°	θ
61.5°	θ'
67.5°	$\theta'' = \theta + \theta'$
۰٫۹۱۶	γ
۱٫۲۳۷	α



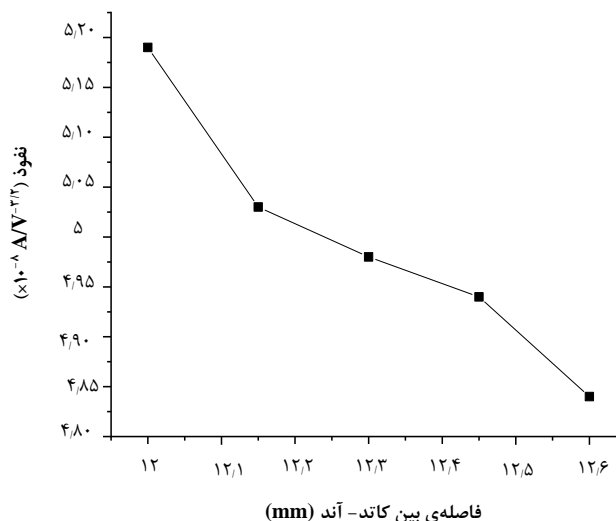
شکل ۱۶. تغییرات جریان برحسب فاصله‌ی بین کاتد و آند.



شکل ۱۳. پیکربندی تفنگ کروی.

۴. نتیجه گیری

تفنگ الکترونی موردنیاز برای یک شتابدهنده الکترونی که کاربرد صنعتی در گستره انرژی‌های بالا و جریان‌های پایین دارد با تفنگ موردنیاز برای یک شتابدهنده صنعتی با گستره انرژی پایین و جریان بالا تفاوت دارد. تفنگ‌های الکترونی دارای ساختارهای مختلف، توانایی‌های متفاوت، طول عمرهای مختلف، کاربردهای گوناگون و قیمت‌های متفاوتی هستند.

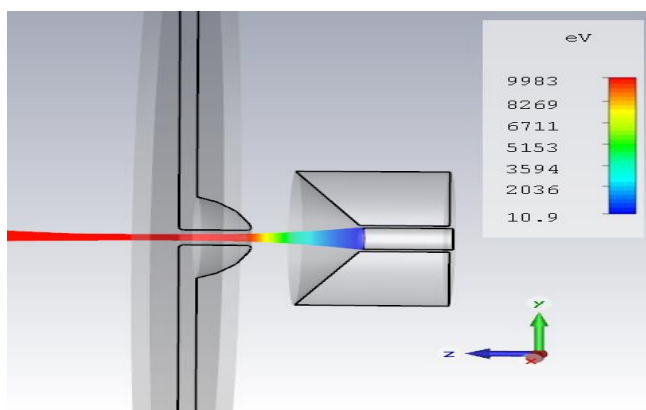


شکل ۱۷. تغییرات نفوذ برحسب فاصله‌ی بین کاتد و آند.

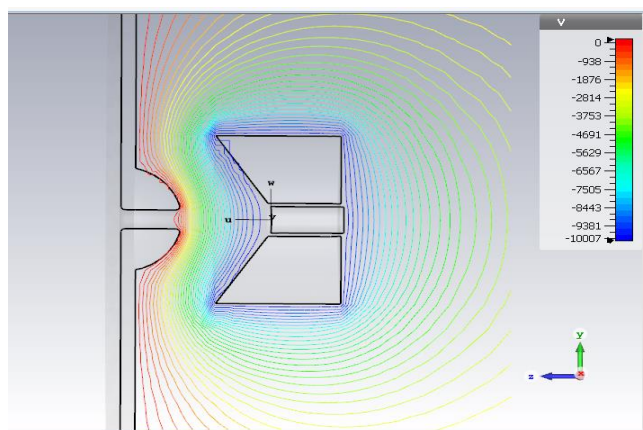
مطابق با رابطه‌ی ۷ با افزایش فاصله‌ی بین آند و کاتد (d)، مقدار γ و α و در نتیجه جریان و نفوذ نیز کاهش می‌یابد که این نتیجه با شکل‌های ۱۶ و ۱۷ که از شبیه‌سازی به‌دست آمده‌اند، مطابقت دارد. مسیر باریکه‌ی جریان و خطوط میدان الکتریکی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است.

شکل ۱۹ خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در فاصله‌ی بین آند و کاتد را ترسیم می‌کند. همان‌طور که از این شکل مشخص است خطوط هم‌پتانسیل، در سطح کاتد دارای انحنای لازم برای همگرا کردن الکترون‌های گسیلیده از سطح کاتد هستند.

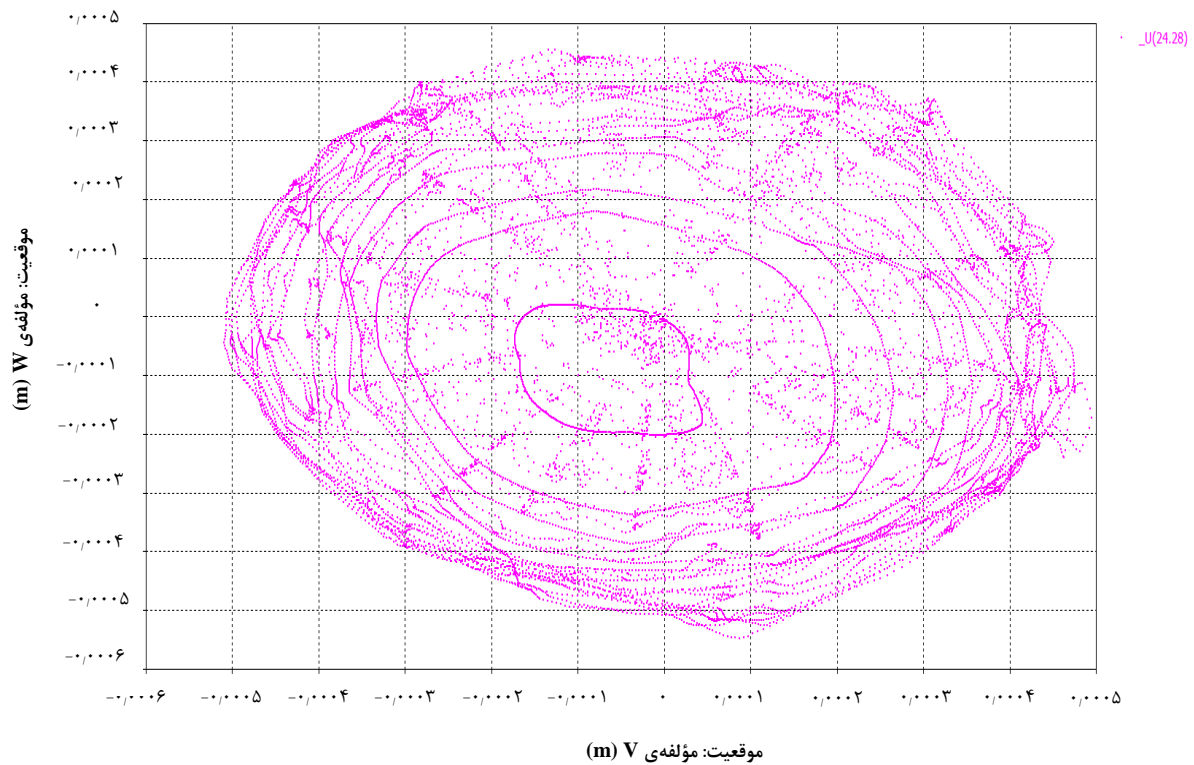
در تفنگ با کاتد کروی، زاویه‌ی بهینه‌ی الکتروود پیرس با سطح کاتد 67.5° و قطر باریکه‌ی این تفنگ در فاصله‌ی 24.3 mm از سطح کاتد 0.9 mm و نفوذ آن $4.98 \times 10^{-8} \text{ A/V}^{-3/2}$ است. شکل ۲۰ نمایه‌ی ذره‌های خروجی از تفنگ را نشان می‌دهد. نمایه‌ی ذره‌های خروجی از تفنگ کاملاً گوسی است یعنی تمرکز بیش‌تر ذره‌ها در مرکز نمایه می‌باشد.



شکل ۱۸. مسیر باریکه.



شکل ۱۹. خطوط میدان الکتریکی.



شکل ۲۰. نمایه‌ی ذرات خروجی.

مسطح نفوذ مناسبی برای این منظور دارد و از همه مهم‌تر ساخت و تغییر پارامترهای آن بسیار آسان‌تر و کم هزینه‌تر است بنابراین این تفنگ الکترونی می‌تواند برای استفاده در شتاب‌دهنده‌ی الکترونی دینامیترن انتخاب شود.

در این مقاله هدف طراحی تفنگ الکترونی با جریانی بیشینه‌ی ۵۰ mA و ولتاژ ۵ تا ۱۰ kV برای استفاده در شتاب‌دهنده‌ی الکترونی دینامیترن بود. برای این منظور دو تفنگ با کاتد مسطح و کاتد کروی طراحی شد. در جدول ۲ نتیجه‌های حاصل برای این دو نوع تفنگ الکترونی مقایسه شده است.

جدول ۲. مقایسه‌ی تفنگ الکترونی با کاتدهای مسطح و کروی

تفنگ با کاتد کروی	تفنگ با کاتد مسطح	پارامتر
۶۷٫۵	۶۷٫۵	زاویه‌ی الکتروود متمرکزکننده نسبت به سطح کاتد (deg)
۴۹٫۸	۴۹	جریان (mA)
۰٫۰۴۹۸	۰٫۱۳۸	نفوذ (μperv)
۰٫۴۵	۳٫۲	شعاع کمر باریکه (mm)
۲۴٫۳	۳۶	مکان کمر باریکه (mm)

به طور کلی کاتدهای کروی دارای باریکه‌ای متمرکزتر هستند و در شتاب‌دهنده‌های خطی رادیوسامدی که دارای پری‌بانچر و بانچر هستند گزینه‌ای مناسب از لحاظ کم بودن اتلاف باریکه هستند. اما با توجه به این‌که شتاب‌دهنده‌ی موردنظر در این‌جا یک شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیک با باریکه‌ی پیوسته است، داشتن باریکه‌ای بسیار متمرکز یک مزیت به حساب نمی‌آید [۸]. از طرف دیگر تفنگ‌های الکترونی که در صنایع به کار می‌روند نفوذ بین ۰٫۱ و ۱ μperv دارند [۱۲]. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که تفنگ با کاتد

مراجع

1. S. Ahmadiannamin, F. Abbasi Davani, et all in: *5th International Particle Accelerator*, Simulation Study of Electron Gun for Six MeV Linac for X-Ray cargo Inspection, 3847-3849 (JACoW, Dresden, Germany, IPAC2014),.
2. L. Marton, *Methodes of experimental physics*, (Academic press, new York, 1967).
3. S. Ahmadian, M.Sc. thesis, Faculty of Nuclear Engineering, (2011) (in Persian).
4. A. Gilmour, *principal traveling wave tubes*, (Artech House. Inc, Norwood, 1941).
5. M. Moghbelalhossein, E. Bazvand, et all, *Simulation of a Low Energy Electron Gun*, Nucl Sci. and Tech, (2014) (in Persian).
6. S. Humpheries, *Charged particle beam*, (Dover Publications, New York, 2013).
7. M. Nazari, F. Abassi Davani, et all, in: *Proceedings of IPAC*, Design and Simulation of a Thermionic Electron Gun for a 1MeV Parallel Feed Cockcroft-Walton Industrial Accelerator, 1976-1978 (Busan, Korea, 2016).
8. D. Bhattacharjee, et al, *Development of electron guns for linacs and dc accelerator*, <https://www.researchgate.net/publication/265107167>.
9. H. Yazdanfar, M. Elahi, et all, in: *New Materials National*, Designing of Tungsten Filament as an Electron Source for Applying in Electron Gun (University of Tarbiat Modarres, Tehran, 2008) (in Persian).
10. J. Pierce, *Traveling-Wave Tubes*, 3 edition, 390-460 (D. Van Nostrand Company, Inc, 1950).
11. C. Karzmark, *Medical electron accelerators*, (McGRAW Hill, New York, 1993).
12. H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics*, 4th edit, (Springer, 2015).