



## طراحی تفنگ الکترونی با جریان ۱۰ آمپر برای استفاده در شتابگر خطی الکترون توان بالا

پژمان یوسف‌پور لالمی<sup>۱</sup>، شاهین صنایع حجری<sup>۲\*</sup>، سارا زارعی<sup>۲</sup>، فرشاد قاسمی<sup>۲</sup>، فریدون عباسی دوانی<sup>۱</sup>  
۱. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران  
۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

\*Email: shsanaye@aeoi.org.ir

### مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۲۱

### چکیده

گسترش روزافزون کاربردهای باریکه الکترونی انگیزه مضاعفی برای پژوهش در حوزه طراحی و ساخت تفنگ‌های الکترونی ایجاد کرده است. علاوه بر انرژی و جریان، کیفیت باریکه (گسیلندگی عرضی) نیز در تعیین گسترده‌ی کاربردی تفنگ نقش بسزایی دارد. در این مقاله، طراحی تفنگ الکترونی با جریان بزرگ و کیفیت مطلوب به منظور استفاده در شتابگر خطی الکترون پرتوان به عنوان چشمه ذرات ارائه شده است. در این طراحی تلاش شده است با درک فیزیک عوامل مؤثر بر کیفیت باریکه تصحیحاتی به هندسه پیرس به صورت مرحله به مرحله اعمال شود. به طور خاص اثرات نیروهای عرضی غیرخطی و بار فضایی و ابیراهی کروی مورد بررسی قرار گرفته است. تصحیحات اعمال شده کیفیت باریکه را که توسط گسیلندگی عرضی سنجیده می‌شود تا سه برابر نسبت به هندسه پیرس بهبود داده است.

**کلیدواژه‌ها:** تفنگ الکترونی جریان بالا، کیفیت باریکه، رشد گسیلندگی، شتابگر خطی الکترون توان بالا

## 10 A beam current electron gun design for a high-power electron linac

P. Yousefpour Lalemi<sup>1</sup>, Sh. Sanaye Hajari<sup>2\*</sup>, S. Zarei<sup>2</sup>, F. Ghasemi<sup>2</sup>, F. Abbasi Davani<sup>1</sup>

1. Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O. Box: 1983963113, Tehran – Iran  
2. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:11365-8486, Tehran-Iran

### Technical Paper

Received 29.11.2022, Accepted 10.4.2023

### Abstract

The development of electron beam applications motivates electron gun research. In addition to the beam energy and current, its quality also plays a significant role in the spread of electron guns. Herein, we present the design of an electron gun for use as an electron source in a linear accelerator with high beam current and quality. In this design, starting with the Pierce geometry, a stay-by-stay optimization based on the physics governed by the beam behavior has been carried out to control the emittance growth and get a beam of outstanding quality. In particular, non-linear transverse force, space charge effect, and spherical aberration are considered. This resulted in a threefold improvement in the beam quality as measured by the beam emittance.

**Keywords:** High current e-Gun, Beam quality, Emittance growth, High power electron linear accelerator



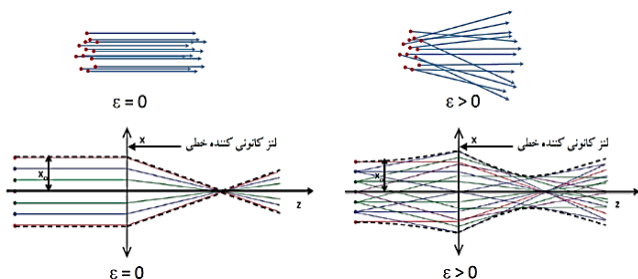
## ۱. مقدمه

تلاش‌ها می‌توان به پژوهش انجام شده در سرن سوئیس اشاره کرد که در آن روشی مبتنی بر استفاده از معادله پوش برای طراحی تفنگی با کیفیت بالا استفاده شده است [۸]. در مورد دیگر، جهت کاهش اثر بار فضایی و حفظ کیفیت باریکه در اسپرینگر-۸ ژاپن ولتاژ تفنگ تا ۵۰۰ kV بالا برده شده است [۹].

روش‌های مختلفی به منظور بهینه‌سازی تفنگ الکترونی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این جمله می‌توان به تغییر پارامترهای هندسی (جاروب کردن یا آزمون و خطا) [۱۰] و نیز استفاده از الگوریتم‌های ریاضی اشاره کرد [۱۱]. در این مقاله ابتدا مفهوم کیفیت باریکه و مبانی نظری طراحی تفنگ‌های الکترونی به‌طور کلی آورده شده است و سپس روند طراحی یک تفنگ الکترونی با جریان ۱۰ آمپر و ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت ارائه خواهد شد. در این طراحی تلاش خواهد شد با شناخت عوامل مؤثر در رشد گسیلندگی و اعمال آن به هندسه تفنگ کیفیت باریکه خروجی را تا حد ممکن بهبود داد. به عبارت دیگر روش کار در این مقاله توجه به دینامیک باریکه و فیزیک حاکم بر رفتار تفنگ الکترونی به منظور یافتن هندسه بهینه است. معیار اصلی در این بهینه‌سازی، بهبود کیفیت باریکه با حفظ جریان مدنظر خواهد بود.

## ۲. مبانی نظری مسأله

گسیلندگی،  $\varepsilon$ ، معیاری کمی از کیفیت باریکه است. مطابق شکل ۱، در یک باریکه‌ی ایده‌آل (شکل ۱-چپ)، با ذرات کاملاً هم‌جهت، گسیلندگی صفر می‌باشد. در یک باریکه‌ی واقعی، سرعت ذرات با راستای حرکت زاویه‌ای تصادفی می‌سازد. هرچه این زاویه تصادفی به طور متوسط بزرگ‌تر باشد گسیلندگی بزرگ‌تر و کیفیت باریکه کم‌تر خواهد بود.



شکل ۱. مفهوم گسیلندگی.

گسترش کاربرد باریکه الکترونی در بسیاری از زمینه‌ها از جمله میکروسکوپ‌های الکترونی، لیزرهای الکترون آزاد، آزمون‌های غیرمخرب، سامانه‌های پرتودهی صنعتی، مولدهای نوترون و رادیوایزوتوپ‌ها، لامپ‌های ماکروویو انگیزه مضاعفی برای پژوهش در حوزه طراحی و ساخت تفنگ‌های الکترونی ایجاد کرده است.

علاوه بر انرژی و جریان، کیفیت باریکه (گسیلندگی عرضی) نیز در تعیین گستره‌ی کاربردی تفنگ نقش بسزایی دارد. هدف در این پژوهش طراحی تفنگ الکترونی با جریان بزرگ و کیفیت مطلوب به منظور استفاده در شتابگر خطی الکترون پرتوان به عنوان چشمه ذرات است [۱]. با توجه به مشخصات این شتابگر خطی جریان ۱۰ A و گسیلندگی عرضی بهنجار کوچک‌تر از ۲۰ mm-mrad برای باریکه خروجی تفنگ الکترونی هدف‌گذاری شده است. چنین باریکه با کیفیتی امکان استفاده از شتابگر خطی پرتوان را حتی به عنوان چشمه نور نسل چهارم (لیزر الکترون آزاد) فراهم می‌کند [۲]. از مهم‌ترین عوامل محدودکننده کیفیت باریکه، در تفنگ‌های الکترونی، نیروهای عرضی غیرخطی ناشی از بار فضایی است [۳]. به صورت کمی قدرت بار فضایی با کمیت پروینس تعمیم یافته،  $K$ ، تعیین می‌شود. مطابق رابطه (۱) این کمیت با افزایش جریان و کاهش انرژی افزایش می‌یابد [۴].

$$K = \frac{I}{I_0} \frac{\gamma^2}{\beta^3} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $I$  جریان باریکه،  $\beta$  سرعت بهنجار باریکه،  $\gamma$  فاکتور نسبیتی و  $I_0$  جریان مشخصه است. این کمیت برای الکترون حدود ۱۷۰۰۰ آمپر می‌باشد. در نتیجه چالش اصلی در طراحی این تفنگ حفظ کیفیت باریکه در حضور بار فضایی می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱) به منظور کاهش قدرت نیروهای بارفضایی انرژی تفنگ الکترونی مد نظر بزرگ و برابر ۱۰۰ keV در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، این انرژی بزرگ برای باریکه خروجی از تفنگ الکترونی، طراحی بخش خوشه‌ساز شتابگر خطی را نیز تسهیل خواهد کرد.

علی‌رغم این‌که مسأله طراحی تفنگ الکترونی با جریان بالا از زمان ارائه مدل پیرس در سال ۱۹۵۴ [۵] و کارهای تکمیلی توسط وان [۶] و تیواری [۷] کاملاً شناخته شده است. تلاش برای بهبود کیفیت باریکه در تفنگ‌های ترمیونی هم‌چنان مسأله‌ای باز و مورد توجه محافل علمی معتبر است. از جمله این

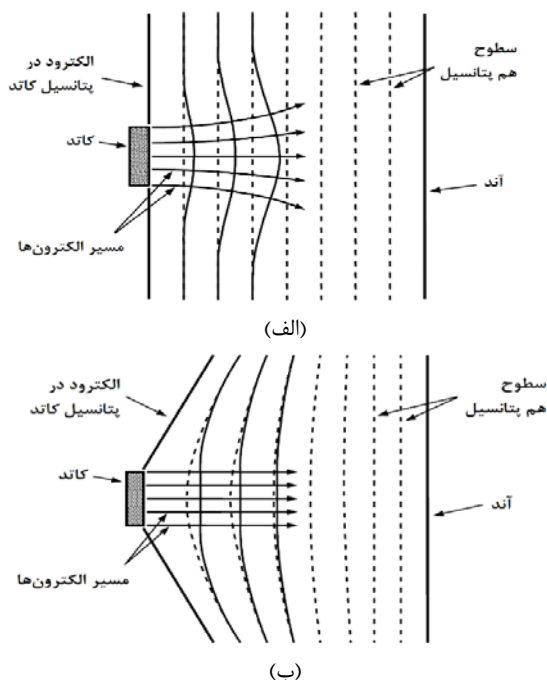


مد گسیل محدود شده توسط بار فضایی کمیت پروینس که به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود یک ثابت هندسی خواهد بود.

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

مسأله افزایش جریان و بهبود کیفیت باریکه (کاهش ابعاد عرضی در کمر باریکه) در تفنگ‌های الکترونی را در بسیاری از موارد می‌توان معادل طراحی تفنگی با چگالی جریان بالا دانست. در این تفنگ‌ها چگالی جریان مورد نیاز برای باریکه‌ی الکترونی به طور معمول بیش‌تر از چگالی جریانی است که کاتد در یک دما و طول عمر معقول می‌تواند تأمین کند [۱۲]. راه حل این چالش در مدلی توسط پیرس<sup>۴</sup> ارائه شده است [۵]. در ادامه به طور مختصر این مدل شرح داده خواهد شد.

در یک تفنگ دیودی تخت، اگر هیچ الکترونی در فضای بین کاتد و آند قرار نگرفته باشد، خطوط هم‌پتانسیل به صورت موازی و با فواصل مساوی از یک‌دیگر قرار می‌گیرند. مطابق شکل ۲ با حضور الکترون‌ها در فضای بین کاتد و آند، خطوط هم‌پتانسیل به سمت آند خمیده می‌شوند. این امر سبب واگرایی باریکه خواهد شد. به منظور ایجاد نیروی کانونی‌کننده لازم است الکترون‌ها در اطراف کاتد قرار گیرد تا خطوط هم‌پتانسیل به فرم قبلی بازگرداند. در این صورت مسیر حرکت الکترون‌ها به صورت موازی باقی خواهد ماند.



شکل ۲. تأثیر حضور الکترون‌ها بر خطوط هم‌پتانسیل (الف) کاهش اثر حضور الکترون‌ها بر خطوط هم‌پتانسیل با الکترون‌ها کانونی‌کننده (ب). خط‌چین‌ها نشان‌دهنده خطوط هم‌پتانسیل در غیاب الکترون‌ها هستند و خطوط پر رنگ در حضور آن‌ها [۱۲].

به صورت دقیق، گسیلندگی مؤثر بهنجار باریکه در راستای افقی توسط رابطه ۲ داده می‌شود [۴].

$$\epsilon_{n,m,s} = \gamma\beta \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2} \quad (2)$$

در این رابطه  $x$  مکان افقی ذرات و  $x'$  مشتق آن نسبت به مختصه طولی (راستای حرکت باریکه) است. به طور کلی هرچه گسیلندگی کوچک‌تر باشد امکان دستیابی به ابعاد عرضی کوچک برای باریکه ساده‌تر خواهد بود. به لحاظ کاربردی هرکجا نیاز به باریکه‌ای با ابعاد عرضی کوچک باشد توجه به گسیلندگی ضروری می‌شود. به طور مثال گسیلندگی کوچک در یک چشمه نور منجر به افزایش توان تابشی و همدوسی نور، در یک برخورد دهنده ذرات باعث افزایش درخشندگی<sup>۱</sup>، در شتابگرهای پرتوان منجر به کاهش تلفات (به دلیل کاهش ابعاد عرضی باریکه)، در یک سیستم اندازه‌گیری غیرمخرب<sup>۲</sup> باعث افزایش وضوح تصویر و در یک دستگاه جوش الکترونی باعث بهبود کیفیت جوش خواهد شود. عوامل متعددی در شتابگرهای ذرات منجر به رشد گسیلندگی باریکه (به صورت برگشت‌ناپذیر) می‌شوند [۳، ۴]. این عوامل عبارتند از؛ وجود نیروهای ناپاستار نظیر نیروهای عرضی فرکانس رادیویی در کاواک‌ها، وجود نیروهای غیرخطی نظیر نیروی ناشی از بار فضایی، وجود پهنای انرژی به ویژه هنگام کانونی‌سازی، وجود عدم انطباق اپتیکی در المان‌های کانونی‌سازی، تغییر در ابعاد باریکه با نیروی بار فضایی قوی. یکی از مهم‌ترین اهداف در طراحی بیش‌تر شتابگرهای ذرات شناسایی عوامل مؤثر در رشد گسیلندگی و محدود کردن آن‌ها تا حد ممکن است.

از مفاهیم تأثیرگذار در طراحی تفنگ‌های الکترونی مد گسیل کاتد است [۱۲، ۱۳]. در مد گرمایی جریان تفنگ با دمای کاتد و طبق رابطه ریچاردسن-داچمن<sup>۳</sup> تعیین می‌شود [۱۴]. در طرف دیگر، در مد گسیل محدود شده توسط بار فضایی جریان توسط اختلاف پتانسیل آند و کاتد و به بیان دقیق‌تر میدان الکتریکی روی سطح کاتد تعیین خواهد شد. هر الکترون در سطح کاتد برای اضافه شدن به باریکه باید تحت تأثیر دو نیرو رقابت‌کننده قرار گیرد. این دو نیرو عبارتند از نیروی الکتریکی حاصل از اختلاف پتانسیل آند و کاتد و نیروی بار فضایی حاصل از باریکه مقابل کاتد. تنها در صورت غلبه نیروی خارجی الکترون جدید اجازه اضافه شدن به باریکه را خواهد یافت. از ویژگی‌های این مد گسیل پایداری جریان تفنگ و عدم وابستگی آن به افت و خیزهای گرمایی کاتد است. به همین منظور در این طراحی از این مد استفاده خواهد شد. در

1. Luminosity
2. Non-Destructive Test (NDT)
3. Richardson-Dushman



همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود برای کاتدهای با زاویه مخروطی بزرگ خطوط هم‌پتانسیل به صورت کروی کامل نیستند در این صورت مسیر حرکت الکترون‌ها که از کاتد گسیل شده‌اند به سمت مرکز انحنا کاتد متمرکز نخواهد شد. هم‌چنین از آن‌جایی که چگالی جریان به بزرگی میدان در سطح کاتد وابسته است، تغییرات آن در سطح کاتد باعث گسیل غیریکنواخت خواهد شد. همان‌گونه که در ادامه اشاره خواهد شد گسیل غیریکنواخت یکی از عوامل مهم رشد گسیلندگی می‌باشد.

### ۳. طراحی تفنگ

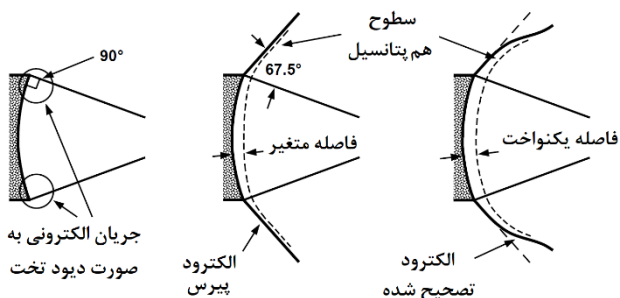
#### ۱.۳ محاسبات اولیه

طرح‌واره‌ی هندسه کروی و متغیرهای مختلف آن به صورت دو کروی تو در تو در شکل ۵ نشان داده شده است. در این پیکربندی داخل کروی بیرونی و بیرون کروی داخلی، به ترتیب نقش کاتد و آند را ایفا می‌کنند. هم‌چنین با توجه به تأثیر منفی گرید بر روی کیفیت باریکه [۱۶] هندسه دیودی برای این تفنگ انتخاب شده است.

از جمله متغیرهای مهم تعیین‌کننده کیفیت باریکه چگالی جریان کاتد است. این کمیت تعیین‌کننده شعاع کاتد می‌باشد. شعاع کاتد به طور مستقیم طبق رابطه‌ی ۵،

$$\varepsilon_{n,ms} = 2r_c \sqrt{\frac{k_B T}{mc^2}} \quad (5)$$

تعیین‌کننده گسیلندگی گرمایی (اولیه) خواهد بود. با پیشرفت تکنولوژی ساخت کاتد در دنیا امروزه کاتدهایی با چگالی جریان  $100 \text{ A}/\text{cm}^2$  موجود می‌باشد [۱۲]. برای طراحی فعلی با در نظر گرفتن سهولت تهیه کاتد، چگالی جریان  $10 \text{ A}/\text{cm}^2$  برای کاتد در نظر گرفته شده است.

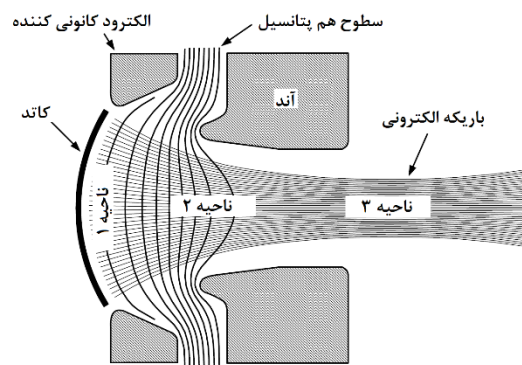


شکل ۴. تأثیر کروی بودن کاتد بر خطوط هم‌پتانسیل [۱۲].

اهمیت هندسه سطوح هم‌پتانسیل در آن است که این سطوح تعیین‌کننده هندسه کاتد، آند و الکتروود کانونی‌کننده هستند. برای یافتن این سطوح لازم است تابع پتانسیل الکترواستاتیک را در فضای تفنگ در اختیار داشت. با حل معادله پواسون در فضای بین آند و کاتد برای هندسه تخت نامتناهی، پتانسیل در مختصات قطبی ( $\rho$  و  $\theta$ ) مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\frac{\Phi}{V_a} = \left(\frac{\rho}{d}\right)^{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{4\theta}{3}\right) \quad (4)$$

با توجه به رابطه فوق، در پتانسیل الکتروود کانونی‌کننده،  $\Phi = 0$ ،  $\theta$  برابر  $67.5^\circ$  درجه خواهد بود. به این زاویه، زاویه‌ی پیرس گفته می‌شود. در رابطه فوق  $V_a$  اختلاف پتانسیل آند و کاتد است. در هندسه تخت، الکتروود پیرس تنها مانع واگرایی باریکه می‌شود. به منظور کانونی‌سازی باریکه و افزایش چگالی جریان، هندسه کروی با کاتد مقعر مناسب‌تر است. در این صورت مطابق شکل ۳ فضای تفنگ الکترونی به سه ناحیه سطح کاتد (۱)، روزنه آند (۲) و فضای بدون میدان (۳) تقسیم می‌شود. میدانی الکترونیکی یکنواخت در ناحیه اول به منظور تضمین گسیل یکنواخت از کاتد ضروری است. در ناحیه دوم به دلیل وجود روزنه آند، سطوح هم‌پتانسیل به سمت داخل دهانه آند خمیده می‌شوند. این سطوح در نزدیکی دهانه آند همانند یک لنز الکترواستاتیک رفتار کرده و باعث واگرایی باریکه خواهند شد. این امر با توجه به این نکته که خطوط میدان بر سطوح هم‌پتانسیل عموداند قابل درک می‌باشد. در ناحیه سوم ذرات از منطقه شتاب‌گیری خارج شده و فقط تحت تأثیر نیروی بار فضایی به حرکت خود ادامه می‌دهند.



شکل ۳. نواحی تفنگ الکترونی پیرس [۱۲].



جدول ۱. مقادیر تابع لانگمویر به ازای نسبت‌های مختلف شعاع انحنای آند به

کاتد [۱۵]

$\rho_a/\rho_c$	$a^2$
۱/۰۰۰	۰۰/۰۰۰
۰/۹۰۹۱	۰/۰۰۹۶
۰/۸۰۰۰	۰/۰۵۷۱
۰/۷۱۴۳	۰/۱۳۹۶
۰/۶۲۵۰	۰/۲۹۶۸
۰/۵۰۰۰	۰/۷۵۰۰
۰/۴۰۰۰	۱/۵۳۱
۰/۳۱۲۵	۲/۹۵۴
۰/۲۰۰۰	۷/۹۷۶

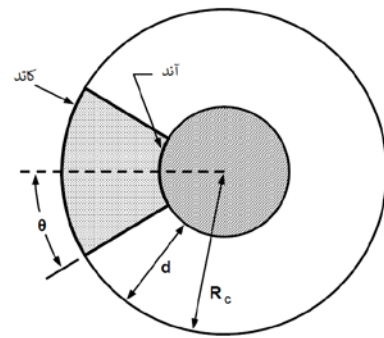
### ۳.۲ شبیه‌سازی الکترومغناطیسی در CST

به ازای ولتاژ ۱۰۰ keV و جریان ۱۰ A مقدار پروینس برابر  $۰/۳۱ \times ۱۰^{-۶}$  محاسبه می‌شود. هم‌چنین با فرض چگالی جریان  $۱۰ A/mc^2$  مساحت کاتد،  $A_c$ ، خواهد بود. با در نظر گرفتن مقدار یک سوم برای نسبت شعاع انحنای آند به کاتد (پارامتر آزاد طراحی) با استفاده از روابط (۶) و (۷) مطابق شکل ۷ نیم‌زاویه کاتد، شعاع انحنای کاتد و آند به ترتیب ۱۸/۷ درجه، ۱۷/۵ mm، ۵/۷۸ mm خواهد بود. از این هندسه به عنوان نقطه شروع طراحی استفاده خواهد شد.

شبیه‌سازی میدان الکتریکی در فضای بین آند و کاتد و نیز ردیابی ذرات تحت تأثیر این میدان و نیز بار فضایی به ترتیب توسط ماژول‌های EM Studio و Particle Studio از مجموعه نرم‌افزاری CST Studio Suite انجام شده است [۱۷]. این نرم‌افزار یک بستری کامل از ابزارهای محاسباتی است که به منظور آنالیز و طراحی الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. به منظور انتخاب و بهینه‌سازی مش‌بندی مناسب، کمیت‌های مختلف نظیر پروینس و گسیلندگی به صورت تابعی از ابعاد مش در مش‌بندی‌های مختلف بررسی می‌شود. محدوده‌ای انتخاب می‌شود که کمیت‌های مورد نظر مستقل از ابعاد مش باشند.

نتیجه شبیه‌سازی هندسه شکل ۷ در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الکتروده همگراکننده به میزان کافی از عهده‌ی کانونی‌سازی بر نمی‌آیند. علت این امر آن است که مقدار زاویه پیرس به طور دقیق برای دیوده‌های تخت محاسبه شده است و این مقدار به طور تقریبی برای دیوده‌های کروی به کار می‌رود. در عمل در هندسه کروی این زاویه مقدار کوچک‌تری خواهد داشت. تصحیح زاویه باید به گونه‌ای صورت گیرد که تمام ذرات از روزنه آند عبور کنند.

شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی مسیر حرکت ذرات در تفنگ بعد از تصحیح زاویه الکتروده‌کننده از ۶۷/۵ درجه به ۵۵ درجه است. نتایج شبیه‌سازی پس از تصحیح زاویه الکتروده‌کننده در جدول ۲ فهرست شده است.



شکل ۵. طرح‌واره‌ی ساختار کروی تفنگ.

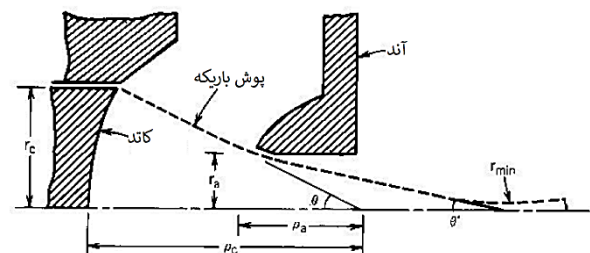
مطابق شکل ۶ برای طراحی تفنگ، متغیرهایی نظیر نیم‌زاویه کاتد،  $\theta$ ، شعاع انحنای کاتد،  $\rho_c$ ، شعاع انحنای آند،  $\rho_a$ ، شعاع روزنه آند،  $r_a$  باید انتخاب شوند. پروینس تفنگ با هندسه کروی به صورت رابطه ۶ قابل محاسبه است [۱۵]:

$$\rho = \frac{I}{V^{2/3}} = 29.4 \times 10^{-6} \frac{\sin^2 \theta}{\left[ a \left( \frac{\rho_a}{\rho_c} \right) \right]^2} \quad (6)$$

در این رابطه  $a$  تابع لانگمویر می‌باشد. برخی از مقادیر این تابع که به صورت عددی محاسبه شده است در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. هم‌چنین مساحت کاتد که تعیین‌کننده چگالی جریان است به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$A_c = 4\pi\rho_c^2 \sin^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (7)$$

متغیرهای هندسی شکل ۶ به کمک روابط (۵) و (۶) به متغیرهای اصلی تفنگ نظیر جریان، چگالی جریان کاتد و ولتاژ تفنگ مربوط می‌شوند. برای شروع طراحی، نسبت شعاع انحنای آند به کاتد را به صورت متغیر آزاد در نظر گرفته می‌گیریم. با خواندن تابع لانگمویر برای این مقدار و قرار دادن آن در رابطه (۶)، نیم‌زاویه  $\theta$  به دست خواهد آمد. با جای‌گذاری نیم‌زاویه  $\theta$  در رابطه‌ی (۷) شعاع انحنای کاتد،  $\rho_c$ ، و متعاقباً شعاع انحنای آند  $\rho_a$ ، به دست می‌آید. با شبیه‌سازی هندسه به دست آمده در مورد انتخاب متغیر آزاد قضاوت می‌شود.

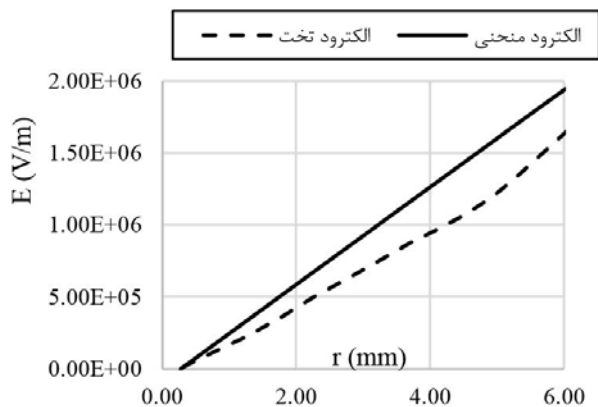


شکل ۶. طرح‌واره‌ی تفنگ الکترونی به همراه متغیرهای هندسی [۱۵].

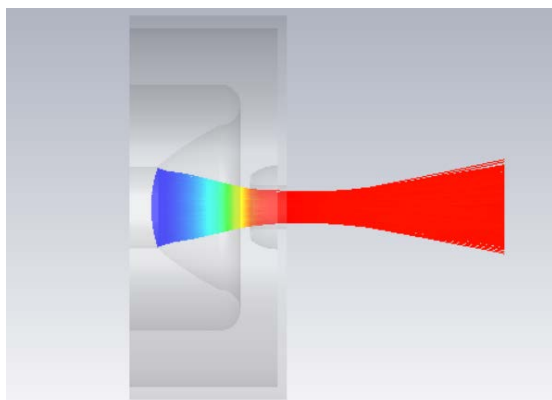


خارجی است [۴]. برای رسیدن به میدان‌های خطی (درجه یک) خطوط هم‌پتانسیل باید به صورت سهمی (درجه دو) باشند. لذا با تغییر شکل الکترودهای مخروطی به سهمی‌گون، میدان‌های عرضی به سمت خطی شدن میل خواهند کرد. برای اثبات این مدعا در شکل ۱۰ بعد از تغییر شکل الکترودها از مخروطی به سهمی‌گون میدان الکتریکی شعاعی در فاصله ۴ میلی‌متری از سطح کاتد از طریق شبیه‌سازی محاسبه و با مقدار آن با الکترودها مخروطی مقایسه شده است.

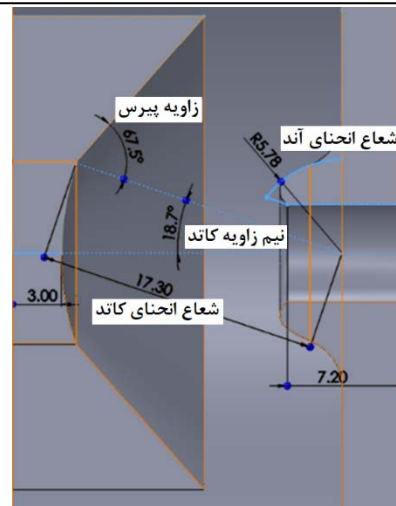
در هندسه جدید مقدار گسیلندگی حدود ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ مسیر حرکت الکترون‌ها در تفنگ الکترونی با الکترودها سهمی شکل را نشان می‌دهد. متغیرهای تفنگ پس از تصحیح شکل الکترودها در جدول ۳ فهرست شده است. تصحیح هندسه الکترودها کانونی‌کننده هم‌چنین باعث یکنواخت‌تر شدن میدان در سطح کاتد مطابق شکل ۴ می‌شود. این امر به نوبه خود باعث یکنواخت‌تر شدن گسیل خواهد شد. گسیل غیریکنواخت خود از عوامل رشد گسیلندگی می‌باشد [۳، ۱۸].



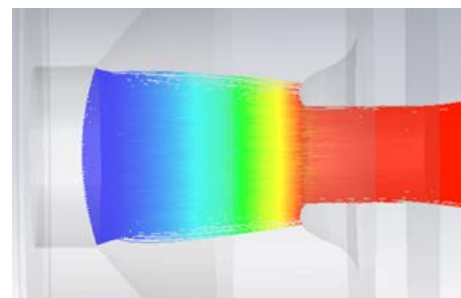
شکل ۱۰. مقایسه تغییرات میدان الکتریکی شعاعی در تفنگ الکترونی با الکترودها تخت و سهمی.



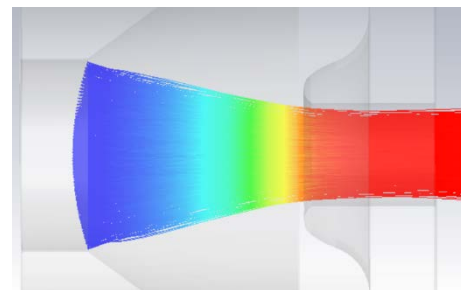
شکل ۱۱. مسیر عبور ذرات در تفنگ الکترونی با تصحیح شکل الکترودها کانونی‌کننده از مخروط به سهمی‌گون.



شکل ۷. هندسه اولیه تفنگ.



شکل ۸. برخورد ذرات با دهانه آند در صورت در نظر گرفتن زاویه پیرس برای الکترودها کانونی‌کننده.



شکل ۹. عبور ذرات از روزه آند بدون برخورد با تصحیح زاویه الکترودها کانونی‌کننده.

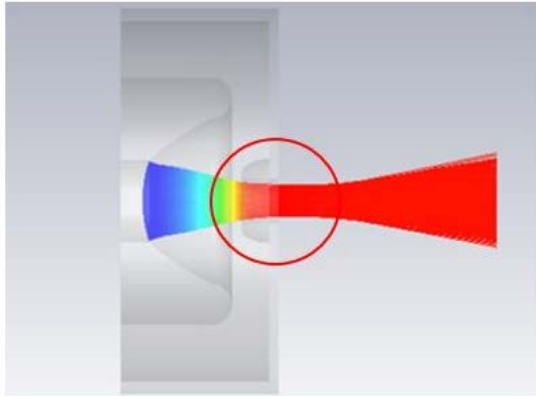
جدول ۲. متغیرهای تفنگ پس از تصحیح زاویه الکترودها کانونی‌کننده

پارامتر	مقدار
جریان	۹٫۲A
پروینس	$۰٫۲۹ \mu A/V^{3/2}$
گسیلندگی بهنجارشده	۴۸٫۲ mm-mrad

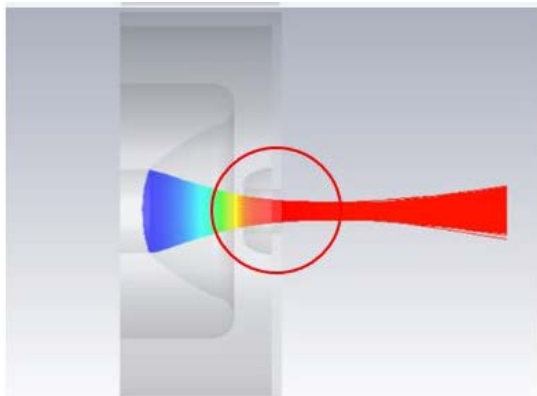
در ادامه در یک طراحی هوشمندانه تلاش خواهد شد با کنترل عوامل رشد گسیلندگی کیفیت باریکه بهبود یابد. مهم‌ترین این عوامل، نیروهای عرضی غیرخطی حاصل از میدان



(الف)



(ب)



شکل ۱۲. مقایسه مسیر حرکت ذرات در تفنگ الکترونی بدون تصحیح ابیراهی کروی (الف) و با تصحیح (ب) ابیراهی کروی. پس از تصحیح کیفیت باریکه به میزان قابل توجهی بهبود یافته و در نتیجه شعاع باریکه در کمر آن کاهش قابل توجه داشته است (دایره قرمز).

جدول ۴. مقدار بهینه شده برای نیم‌زاویه و شعاع انحنای کاتد

پارامتر	مقدار قبلی	مقدار جدید
نیم‌زاویه شعاع انحنای کاتد	۱۸٫۷ درجه	۲۰٫۴۸ درجه
شعاع انحنای کاتد	۱۷٫۳ میلی‌متر	۱۵٫۶۵ میلی‌متر

جدول ۳. متغیرهای خروجی تفنگ پس از تصحیح ابیراهی کروی

پارامتر	مقدار
جریان	۱۰ A
پروینس	$۰٫۳۱ \mu A/V^{3/2}$
گسیلندگی بهنجار شده	۱۳٫۴ mm-mrad

جدول ۳. متغیرهای خروجی تفنگ پس از تصحیح هندسه الکتروود

پارامتر	مقدار
جریان	۸٫۲ A
پروینس	$۰٫۲۵ \mu A/V^{3/2}$
گسیلندگی بهنجار شده	۳۴٫۷ mm-mrad

هرچند تصحیح هندسه الکتروود کانونی‌کننده خطی شدن میدان در بیش‌تر فضای بین آند و کاتد را تضمین می‌کند، میدان در نزدیکی سطح کاتد بیش‌تر متأثر از هندسه کاتد خواهد بود. از قضا نیروهای غیرخطی در نزدیکی سطح کاتد به دلیل انرژی کوچک باریکه تأثیر بزرگ‌تری بر رشد گسیلندگی خواهد داشت. برای نزدیک‌تر شدن به هندسه سهمیگون لازم است شعاع انحنای کاتد کاهش یابد. با کاهش شعاع انحنای کاتد،  $\rho_c$ ، به منظور حفظ شعاع قبلی کاتد،  $r_c$ ، لازم از نیم‌زاویه،  $\theta$ ، اندکی افزایش یابد. این فرایند در ادبیات تفنگ الکترونی به تصحیح ابیراهی کروی معروف است [۱۲، ۱۳]. با اصلاح دو کمیت  $\rho_c$  و  $\theta$  مطابق جدول ۴ گسیلندگی باریکه خروجی به میزان قابل توجهی (۶۱ درصد) کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ مسیر حرکت ذرات قبل و بعد از این تصحیح را نشان می‌دهد. متغیرهای اصلی تفنگ پس از تصحیح ابیراهی کروی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

### ۳.۳ بررسی مشخصات باریکه خروجی در نرم‌افزار CST

شکل ۱۳، تحول فضای رد<sup>۱</sup> برای باریکه ذرات در طول تفنگ را در گام‌های ۱۰ میلی‌متری به نمایش گذاشته است. همان‌طور که مشخص است در ناحیه ۱ ذرات در حال هم‌گرایی، در ناحیه ۲ ذرات در کم‌ترین شعاع ممکن، در ناحیه ۳ و ۴ در حال واگرایی هستند و بیش‌ترین شعاع باریکه در ناحیه ۴ است.

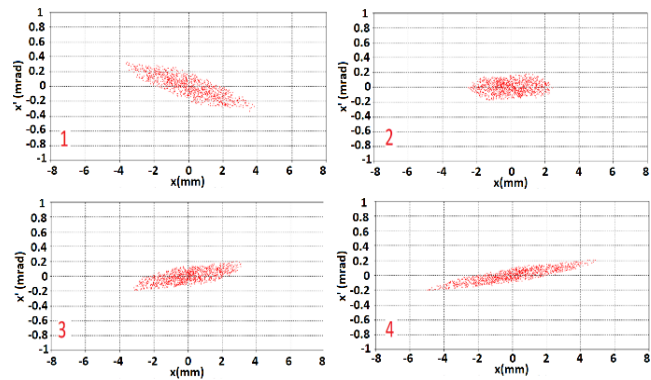
در مد گسیل محدود شده توسط بار فضایی، تغییر جریان با تنها با تغییر ولتاژ میسر است. در شکل ۱۴ و ۱۵ تغییرات ابعاد باریکه و گسیلندگی در اثر افزایش جریان (و ولتاژ) نشان داده شده است. افزایش ولتاژ به دو صورت در کیفیت باریکه اثرگذار می‌باشد. این افزایش از طرفی با افزایش انرژی منجر به کاهش اثر بار فضایی و متعاقباً کاهش گسیلندگی می‌شود. از سوی دیگر اما، به واسطه‌ی افزایش جریان منجر به بزرگ شدن اثر بار فضایی و رشد گسیلندگی خواهد شد. گسیلندگی نهایی باریکه حاصل رقابت این دو اثر خواهد بود.



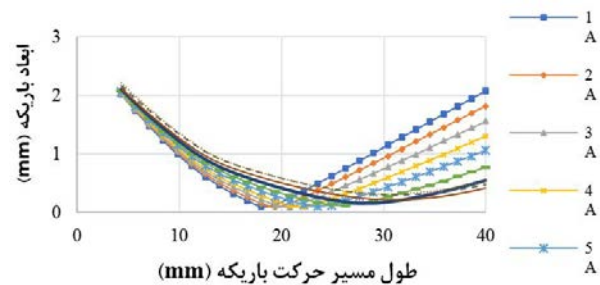
ابیراهی کروی ناشی از هندسه کاتد از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند. با تصحیحات انجام شده در این موارد مقدار گسیلندگی از  $48.2 \text{ mm-mrad}$  به  $13.6 \text{ mm-mrad}$  کاهش یافته است که حاکی از موفقیت روش ارائه شده دارد. به جهت مقایسه می‌توان اشاره کرد که کیفیت باریکه تفنگ‌های مشابه نظیر تفنگ به‌کار رفته در پروژه برخورددهنده کلیک در سرن نزدیک به کیفیت باریکه حاصل از هندسه پیرس و در حدود  $50 \text{ mm-mrad}$  است [۱۰، ۱۹]. مشخصه بارز این تفنگ کیفیت مطلوب باریکه در جریان بالاست که کاربرد آن را به عنوان چشمه الکترونی یک شتاب‌دهنده خطی الکترون توان بالا امکان‌پذیر می‌سازد.

## مراجع

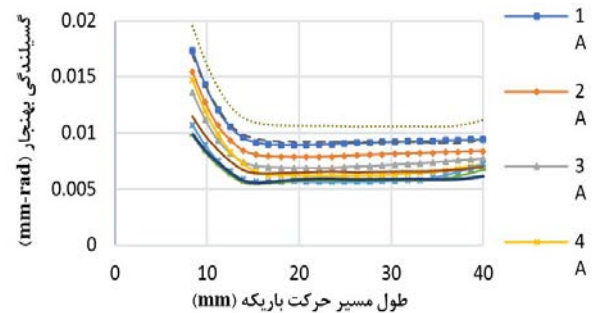
1. Yousefpour Lalami P. Simulation and optimization of thermionic electron gun with high current and quality. Iran Physics Conference. *Isfahan University of Technology*. 2021 [In Persian].
2. <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=56940>.
3. Reiser M. Theory and Design of Charge Particle Beams. 2nd edition. *Wiley-VCH*. 2008.
4. Wangler T.P, Crandall K.R, Mills R.S, Reiser M. Relation between Field Energy and RMS Emittance in Intense Particle Beams. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1985;NS-32(5):2196.
5. Pierce J.R. Theory and design of Electron Guns. 2nd ed. New York. *Van Nostrand*. 1954.
6. Vaughan J.R.M. Synthesis of the Pierce gun. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1981 January; 28(1).
7. Tiwary U, Basu B.N. Noniterative method for the synthesis of convergent pierce electron guns. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1987 May; 34(5).
8. Dayyani Kelisani M, Doebert S, Aslaninejad M. Low emittance design of the electron gun and the focusing channel of the Compact Linear Collider drive beam. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2017;20:043403.
9. Togawa K, Shintake T, Inagaki T, Onoe K, Tanaka T, Baba H, Matsumoto H. CeB<sub>6</sub> electron gun for low-emittance injector. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*. 2007;10:020703.
10. Döbert S, Cassany B, Chritin N, Pepitone K, Cadilhon B, Gardelle J. Design of a High Average Current Electron Source for the CLIC Drive Beam Injector. *Proceedings of LINAC. Geneva, Switzerland*. 2014.
11. Ribton C.N. Development of an Electron Gun Design Optimisation Methodology. *PhD thesis. Brunel University. London*. 2017.
12. Gilmour Jr.A.S. Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons. *Artech House*. 2011.



شکل ۱۳. فضای رد ذرات در طول تفنگ الکترونی طراحی شده با گام‌های ۱۰ میلی‌متری.



شکل ۱۴. تغییرات پوش باریکه نسبت به تغییرات جریان باریکه.



شکل ۱۵. تغییرات گسیلندگی نسبت به تغییرات جریان باریکه.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله مراحل طراحی یک تفنگ الکترونی با جریان بالا مناسب برای استفاده در شتابگرهای خطی پرتوان ارائه شده است. در روش پیرس برای طراحی هندسه تفنگ، به صورت پیش‌فرض باریکه لمینار (با گسیلندگی صفر) در نظر گرفته می‌شود. لذا چنین هندسه‌ای برای دستیابی به باریکه‌ای با کیفیت بالا بهینه نخواهد بود. هرچند این هندسه به منظور تأمین پروانسی و متعاقباً جریان مورد نظر بسیار کارآمد است. در این پژوهش هندسه پیرس به عنوان نقطه شروع طراحی انتخاب و با بهینه‌سازی مرحله به مرحله کیفیت باریکه با کنترل عوامل رشد گسیلندگی بهبود یافته است. به طور خاص اثر نیروهای غیرخطی حاصل از هندسه الکترودهای کانونی‌کننده و نیز

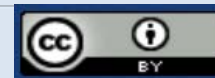




13. Carter R.G. Microwave and RF Vacuum Electronic Power Sources. [Cambridge University Press](#). 2018.
14. Crowell C.R. The Richardson constant for thermionic emission in Schottky barrier diodes. [Solid-State Electronics](#). 1965;8(4):395-399.
15. Humphries S. Charged Particle Beams. [John Wiley and Sons](#). 2002.
16. Zou Y, Li H, Reiser M, O'Shea P.G. Theoretical study of transverse emittance growth in a gridded electron gun. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A](#). 2004 21 February;519(1-2):432-441.
17. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>.
18. Sanaye Sh, Shaker H, Doebert S. Beam dynamics design of the Compact Linear Collider Drive Beam injector. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A](#). 2015 November;799(1):172-186.
19. Pepitone K, Cassany B, Doebert S, Gardelle J, Garolfi L. Operation of a high-current drive beam electron gun prototype for the Compact Linear Collider. [Rev. Sci. Instrum](#). 2020;91:093302.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

یوسف پور لالمی، پژمان، صنایع حجری، شاهین، زارعی، سارا، قاسمی، فرشاد، عباسی دوانی، فریدون. (۱۴۰۳)، طراحی تفنگ الکترونی با جریان ۱۰ آمپر برای استفاده در شتابگر خطی الکترون توان بالا. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۷(۱)، ۱۷۶-۱۸۴. DOI: [10.24200/nst.2023.1264.1823](https://doi.org/10.24200/nst.2023.1264.1823).  
 Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1562.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1562.html)

