

تحلیل تفنگ الکترونی لامپ TWT با پروهانس متوسط، مدل سازی و بهینه سازی

پارامترهای آن به کمک نرم افزار CST

سیما احمدیان*، فریدون عباسی دوانی، فرشاد قاسمی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

از جمله پارامترهای مؤثری که در انتخاب تفنگ الکترونی مناسب نقش بسزایی ایفا می کنند، می توان به جریان الکترونی، پروهانس و فاصله کانونی اشاره نمود. در این پژوهش به دلیل استفاده از روابط حاکم بر هندسه های کروی، تفنگ الکترونی لامپ TWT مناسب تشخیص داده شده و توسط نرم افزار CST شبیه سازی گردیده است. به منظور بررسی صحت اعتبار این نرم افزار، نتایج حاصل از شبیه سازی را با نتایج عملی و روابط تحلیلی موجود مورد مقایسه قرار دادیم. در پایان به کمک اطلاعات تئوری و نتایج حاصل از شبیه سازی، زاویه $(1 \pm 39)^\circ$ ، زاویه بهینه ای برای آند تشخیص داده شد که با نتایج عملی حاصل از ساخت تفنگ الکترونی این لامپ کاملاً سازگار می باشد.

کلید واژه: تفنگ الکترونی، جریان بار فضایی محدود، لامپ TWT، نرم افزار CST، پروهانس.

مقدمه:

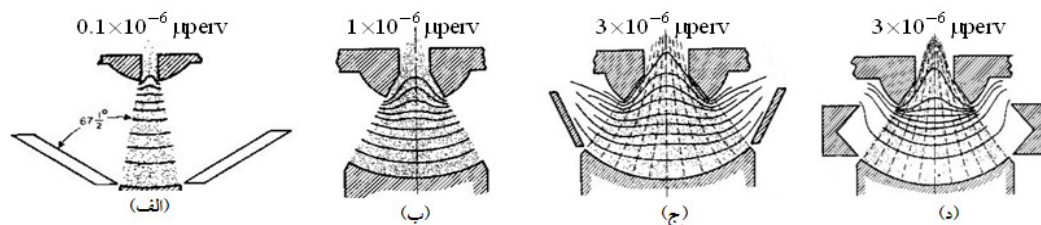
اولین مرحله در فرآیند شتابدهی ذرات باردار، استخراج ذرات کم انرژی از چشمه و شکل دهی باریکه ای حاصل از آن است. یک تزریق کننده، متشکل از چشمه ذرات باردار و هندسه ای مناسب به منظور شتابدهی اولیه به این ذرات می باشد. ساخت تفنگ های الکترونی به دلیل محدودیت های که این ابزار در عملکرد شتاب دهنده ها ایجاد می کند، نیازمند محاسبات بسیار دقیق و تکنولوژی پیچیده می باشد [۲]. از آنجا که چگالی جریان در کاتدهای ترمیونی به صورت غیر یکنواخت می باشد، تغییرات کوچکی در تابع کار، منجر به تغییرات بزرگ چگالی جریان خواهد داشت. از طرفی گسیل غیر یکنواخت معضل مهمی در ایجاد باریکه های هابی با درخشندگی بالا محسوب می شود. در نتیجه به منظور جلوگیری از این موضوع، معمولاً کاتدهای ترمیونی در مد بار فضایی محدود بکار گرفته می شوند [۱]. تفنگ هایی با هندسه کروی بدلیل مزایای که نسبت به تفنگ های مسطح دارند، ترجیح داده می شود. از جمله مزایای آن می توان به امکان ایجاد جریان های بالا از چشمه ای با چگالی جریان محدود اشاره نمود. علت این امر بزرگتر بودن پهنای باریکه الکترونی در مجاورت کاتد نسبت به تفنگ های مسطح می باشد. از طرفی بدلیل کوچک بودن چگالی باریکه در مجاورت کاتد در این ساختار، جریان بار فضایی محدود بزرگتری در دهانه آند ایجاد می شود. شکل خاص الکترودها، غلبه بر اثر لنز منفی و ایجاد باریکه الکترونی همگرا را ممکن می سازند و در نتیجه باریکه خروجی در دهانه آند، شعاع بسیار کوچکی خواهد داشت که این مسئله موجب کوچک شدن دهانه آند نسبت به ساختار مسطح می شود. از طرفی اصطلاح پروهانس^۱ که معرف میزان جریان دهی در هر هندسه می باشد، اهمیت ویژه-

^۱ perveance

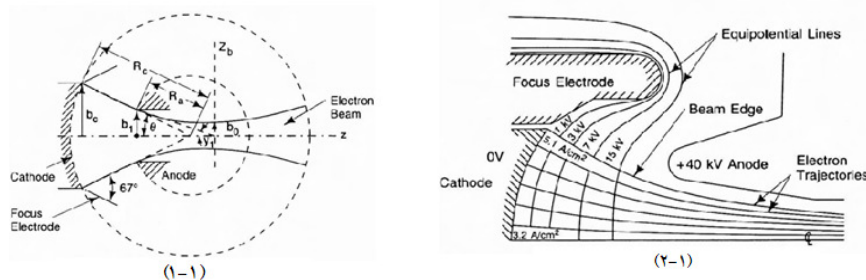
ای در طراحی و انتخاب تفنگ‌های الکترونی ایفا می‌کند. واحد این کمیت $\mu\text{perv} = \text{Amp}/(\text{Volt})^{3/2}$ می‌باشد [۵]. میدان‌های الکتریکی شعاعی آند همانند لنزهای الکترواستاتیکی با فاصله کانونی منفی عمل کرده و عامل واگرایی الکترون‌های خروجی محسوب می‌شوند. در نتیجه مطابق با شکل (۱)، در شرایطی که قطر دهانه آند در مقایسه با پهنای گپ بزرگ باشد، اختلالی که در میدان کاتد بوجود می‌آید نیز بزرگ خواهد بود که ایجاد باریکه خروجی با چگالی جریان یکنواخت، را غیر ممکن می‌سازد. اما در شرایطی که این قطر کوچکتر از پهنای گپ باشد، تغییراتی که در میدان الکتریکی کاتد بوجود می‌آید، کوچک خواهد بود.. لازم به ذکر است که تنها زمانی اثرات دهانه بسیار کوچک خواهد بود که مقدار پروانسان در حد $P = 0.6 \cdot 10^{-6}$ باشد [۱].

روش کار:

با در نظر گرفتن کمترین میزان اختلال در دهانه آند می‌توان تئوری حرکت الکترون در تفنگ الکترونی غیر نسبیتی بین کاتد و آند را با استفاده از تئوری بار فضایی محدود بین الکترودهای کروی در نظر گرفت. معادلات حاکم بر جریان ذرات باردار بین کره‌های هم محور، بدلیل کاربردهای این هندسه در فناوری باریکه و طراحی تفنگ‌های الکترونی با جریان بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۲) نشان دهنده هندسه این تفنگ و شبیه سازی حرکت الکترون‌ها در چنین سیستمی می‌باشد. که در آن شعاع چشمه، R_a شعاع آند و r موقعیت شعاعی بین کره‌های هم مرکز در نظر گرفته شده‌اند [۲].



شکل ۱: انواع طراحی تفنگ الکترونی با پروانسان‌های متفاوت. الف- تفنگ با پروانسان کوچک. ب) تفنگ با پروانسان متوسط. ج) تفنگ با پروانسان بالا. د) تفنگ با پروانسان بالا به همراه الکترودهای اصلاح شده [۱].



شکل ۲: هندسه سیستم‌های کروی. ۱-۲: هندسه تفنگ الکترونی پیرس. ۲-۲) شبیه سازی کامپیوتری حرکت الکترون در تفنگ دیود [۲].

تحلیل رفتار الکترون و خطوط میدان الکتریکی در چنین هندسه‌هایی در دو حالت؛ جریان داخلی به ازای $R_c > R_a$ و جریان خارجی به ازای $R_c < R_a$ صورت می‌پذیرد. معادله پواسون در حالت $R_c > R_a$ ، و اعمال پتانسیل صفر به چشمه و $(-V_0)$ به آند در هندسه متقارن کروی به صورت رابط (۱) بیان می‌شود. [۱]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \frac{d\phi}{dr}) = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که ρ ، چگالی بار فضایی الکترون‌ها است. با توجه به این نکته که جریان شعاعی I ، در حالت پایدار دارای مقدار ثابتی است، می‌توان چگالی بار فضایی را به صورت $\rho = I/4\pi r^2 v$ در نظر گرفت. از طرفی با توجه به قانون بقای انرژی، رابطه بین سرعت الکترون‌ها و پتانسیل الکتریکی به صورت $v = \sqrt{-2e\phi/m_e}$ بیان می‌شود. با بازنویسی معادلات به صورت ثابت بی بعدی که به صورت $R = r/R_s$, $\Phi = \phi/V_0$ بیان می‌شوند، به معادله نهایی (۲) می‌رسیم [۳].

$$\frac{d}{dR} (R^2 \frac{d\Phi}{dR}) = \sqrt{\frac{A}{\Phi}} \quad (2)$$

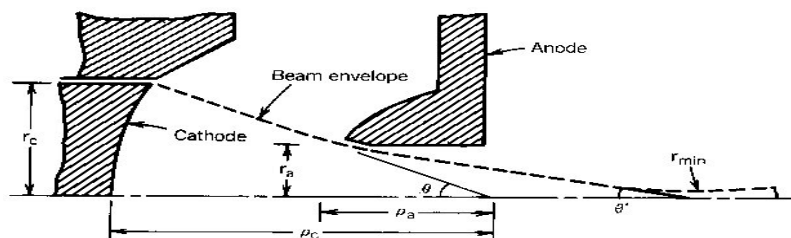
که ثابت A ، معادل $A = (I/4\pi e_0 V_0^{3/2}) \sqrt{m_0/2e}$ می‌باشد. لانگمور و بلودجت^۱ معادله (۲) را با اعمال شرایط مرزی مناسب به صورت عددی حل کرده‌اند و رابطه (۳) را پیشنهاد نمودند [۳]:

$$\Phi(R)^{3/2} = (9A/4)\alpha(R)^2 \quad (3)$$

تابع $\alpha(R)$ ، تابع لانگمور بوده که به صورت $\alpha = \gamma - 0.3\gamma^2 + 0.075\gamma^3$ بیان می‌شود. مقادیر این تابع در انواع هندسه‌ها به صورت جداولی بیان شده‌اند [۱]. در نهایت جریان کل به صورت رابطه ۴ می‌باشد [۲]:

$$I = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_0}} \frac{4pV_0^{3/2}(1 - \cos \theta)}{\alpha(R_a/R_c)^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، کمیت $I/V_0^{3/2}$ که فقط وابسته به هندسه سیستم و نوع ذره می‌باشد، معرف پروهانس می‌باشد. به ازای یک ولتاژ مشخص، رابطه مستقیمی بین مقدار پروهانس و جریان حاصل وجود دارد [۵]. به طور کلی به $P \approx 1 \mu p e r v$ ، پروهانس متوسط گفته می‌شود [۱]. تفنگ الکترونی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است در شکل (۳) نشان داده شده است. این هندسه، برای تفنگ الکترونی لامپ میکروویو TWT، بکار می‌رود. هدف از انتخاب این تفنگ، سادگی آن به جهت امکان تحلیل و ساخت برای استفاده به عنوان تفنگ شتابدهنده خطی الکترون است.



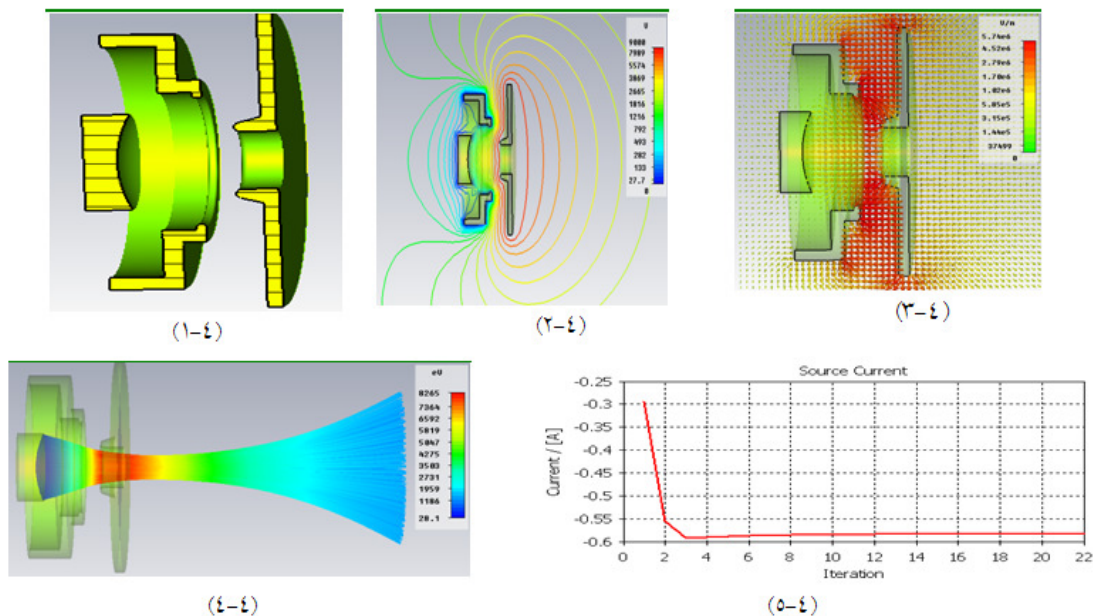
شکل (۳): تفنگ الکترونی با هندسه کانونی ساز برای باریکه‌ای با پروهانس متوسط [۱].

با وجود آنکه الکترودهای بکار رفته در این شکل به طور کامل کروی شکل نیستند، اما می‌توان با در نظر گرفتن یک سری الکترودهای خارج از حجم باریکه و ایجاد تغییرات پتانسیل در سراسر پوش باریکه از نتایج

حاصل از معادلات حاکم بر هندسه کروی استفاده نمود. در این شرایط کاتد و آند را به صورت قطعات کروی با شعاعهای ρ_a, ρ_c در نظر گرفته و کلیه شبیه سازیهای انجام شده را نیز بر مبنای این شکل صورت می پذیرد. همچنین بدلیل قرار گیری سایر المانها بعد از تفنگ الکترونی، تعیین نقطه کانونی به منظور تنظیم محل قرار گیری این المانها اهمیت ویژه ای دارد. از آنجا که میدانهای شعاعی نزدیک دهانه آند، عامل واگرایی الکترونهای خروجی هستند می توان فاصله کانونی منفی لنز، از دهانه آند را به صورت $f @ - 4(\rho_a/\rho_c)(\rho_c - \rho_a)$ بیان نمود [۴]. شبیه سازیهای لازم در این پژوهش، توسط نرم افزار CST، صورت پذیرفته که در آنالیز الکترومغناطیسی و طراحی سیستمهای الکترواستاتیکی، مگنتواستاتیکی و فرکانس پایین و بالا بسیار قوی می باشد. این نرم افزار دارای چهار محیط کاربری اصلی است. در این پژوهش از محیط Particle studio استفاده شده است که قابلیت شبیه سازی سه بعدی میدانهای الکترومغناطیسی اعمال شده بر ذرات باردار، و نیز تراورد آنها در نتیجه اعمال این میدانها را دارد [۶].

نتایج:

در شبیه سازی این لامپ، مکان کاتد، شکل دهنده باریکه و آند با دقت پیاده سازی شده اند. اختلاف پتانسیل اعمالی در این تفنگ ۹kV است که منجر به دستیابی الکترونهای ۹keV در خروجی آن می شود. شکل (۴) نتایج گرافیکی این شبیه سازی نشان داده شده است.



شکل ۴: نتایج شبیه سازی. ۱-۴: هندسه لامپ، ۲-۴: خطوط هم پتانسیل، ۳-۴: خطوط میدان الکتریکی، ۴-۵: مسیر حرکت ذرات به همراه انرژی آنها، ۴-۶: نمودار جریان استخراجی از لامپ.

در جدول ۱، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، روابط تحلیلی حاکم بر تفنگ مورد نظر و نتایج عملی آورده شده است. نتایج بدست آمده تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

جدول ۱ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج عملی و روابط تحلیلی:

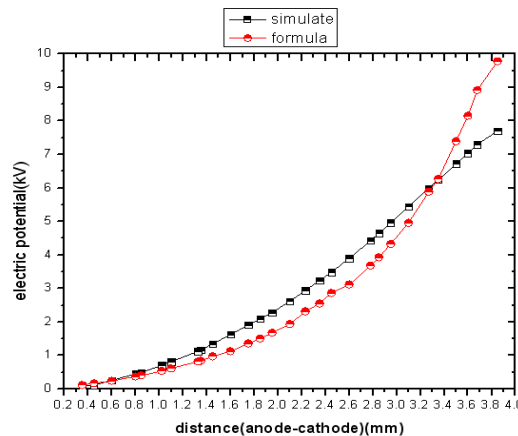
پروانه‌س (μperv)	جریان (A)	
$P = \frac{I}{V_0^{3/2}} = 0.696 \mu\text{perv}$	$I = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_0}} \frac{4pV_0^{3/2}(1-\cos\theta)}{\alpha(R_a/R_c)^2} = 0.595A$	رابطه تحلیلی:
$P = 0.683 \mu\text{perv}$	$I = 0.583A$	نتایج شبیه‌سازی:
$P = 0.690 \mu\text{perv}$	$I = 0.600A$	نتایج عملی:

با توجه به جدول ۱، اختلاف نتایج حاصل از شبیه‌سازی نسبت به عمل برای پارامترهای جریان و پروانه‌س به ترتیب ۲/۸۳۳٪ و ۱/۰۱۴٪ می‌باشند. در نتیجه با استفاده از این نرم افزار می‌توان با دقت خوبی، مقدار پارامترهای مذکور را تعیین نمود. مطابق با جدول ۲، مقدار پارامتر فاصله نقطه کانونی از کاتد در حالت شبیه‌سازی با رابطه تحلیلی مقایسه گردیده که با توجه به میزان اختلاف بین این دو، می‌توان گفت که نتیجه‌ای بسیار سازگار با رابطه تحلیلی دارد.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری فاصله نقطه کانونی از کاتد در دو حالت شبیه‌سازی و تحلیلی:

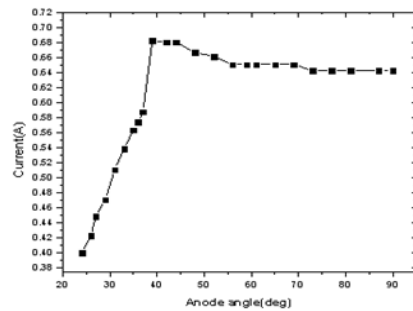
اختلاف نتیجه شبیه‌سازی نسبت به رابطه تحلیلی:	رابطه تحلیلی:	نتیجه شبیه‌سازی:	فاصله نقطه کانونی از کاتد (mm)
۳ / ۹۵٪	$F = f \left[@4 \left(\frac{\rho_a}{\rho_c} \right) (\rho_c - \rho_a) \right] + 5 / 1 = 9 / 162 \text{mm}$	$F = 8 / 8 \text{mm}$	

شکل (۶) مقایسه دقت اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی با استفاده از شبیه‌سازی و رابطه تحلیلی لانگمور را بواسطه تغییرات پتانسیل الکتریکی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود چون این پتانسیل برای سطوح کروی پیشنهاد می‌شود، در فواصل نزدیک با کاتد جواب‌ها مطابقت خوبی با هم دارند اما در نزدیکی آند کمی اختلاف بین این دو ایجاد می

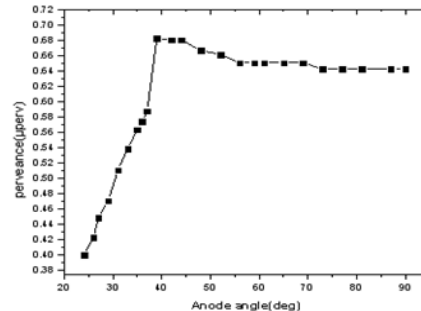


شکل ۶: مقایسه تغییرات پتانسیل در حالت تحلیلی و شبیه‌سازی.

از آنجا که آند بکار رفته در این شبیه سازی به شکل مخروطی ناقص با زاویه رأس 39° می باشد، می توان صحت اعتبار این زاویه را به کمک شبیه سازی و استناد به نتایج حاصله تأیید نمود. نمودارهای شکل (۵)، تغییرات جریان و پرووانس را به ازای تغییر زاویه آند نشان می دهد. با استفاده از این دو نمودار می توان نتیجه گرفت که به ازای زاویه $1) \pm 39^\circ$ بیشترین میزان جریان و پرووانس را مطابق با جدول (۱)، خواهیم داشت.



(۱-۵)



(۲-۵)

شکل ۵: بهینه سازی زاویه آند. ۱-۵: تغییرات جریان بر حسب تغییر زاویه آند. ۲-۵: تغییرات پرووانس بر حسب تغییر زاویه آند.

بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی، مقدار جریان برای تفنگ الکترونی بکار رفته در لامپ TWT معادل $I = 0.583A$ و مقادیر پارامترهای پرووانس و فاصله کانونی به ترتیب $P = 0.1683 \mu perv$ و $F = 1.1 mm$ بدست آمده اند. با توجه به اینکه اختلاف بین مقادیر حاصل از شبیه سازی و نتایج عملی برای پارامترهای جریان و پرووانس به ترتیب 2.1833% و 1.014% می باشند، می توان به کمک این نرم افزار مقدار پارامترهای مؤثر یک تفنگ الکترونی را با دقت بسیار بالا تعیین نمود. از طرفی با توجه به تطابق کامل بین نتیجه حاصل از بهینه سازی زاویه آند توسط این نرم افزار، $1) \pm 39^\circ$ ، و نتایج نقشه های حاصل از ساخت این لامپ، نتیجه می گیریم که با داشتن مقدار مطلوب پارامترهای مؤثر، می توان به کمک بهینه سازی هندسه بکار رفته در شبیه سازی، تفنگ الکترونی مورد نظر با ویژگی و مشخصات مورد نیاز را طراحی نمود.

مراجع:

- [1] Stanley Humphries, Jr, "Charged Particle Beams", Department of Electrical and Computer Engineering University of New Mexico Albuquerque, (New York: John Wiley & Sons, 1990, page: 49-52, 230-236, 271-278).
- [2] C.J.Karzmark-Department of Radiation Oncology Stanford University School of Medicine. Medical Electron Accelerators. McGRAW hill- New York / 1993, page: 67-69).
- [3] Gilmour, Jr, "Principale Traveling Wave Tubes", Artech House, Inc, Norwood, 1941, page:90-110
- [4] Stanley Humphries, Jr, "Principles of Charged Particle Acceleration", Department of Electrical and Computer Engineering University of New Mexico Albuquerque, (New York: John Wiley & Sons, 1990, page: 119-125).
- [5] Peter W. Hawkes & E. Kasper, "Principles of electron optics", Academic Press (April 1996)
- [6] www.cst.com/Content/Applications/Markets/ChargedParticleDynamic/November 2010.