



## طراحی تفنگ الکترونی با جریان ۳۶۰ mA و انرژی ۳۰ keV

سارا طالبی<sup>۱</sup> - سارا زارعی<sup>۲\*</sup> - فریدون عباسی دوانی<sup>۱</sup> - بهجت قاسمی<sup>۱</sup>

۱ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۲ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

### چکیده:

شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون موج ایستا، در زمینه پزشکی و بازرسی محموله‌های کامیونی کاربرد دارند. در راستای طراحی و ساخت شتاب‌دهنده خطی الکترون ۶ میلیون الکترون‌ولت در ایران، به جهت انجام تست گرم به تفنگ الکترونی مناسب با این شتاب‌دهنده نیاز است. در این مقاله تفنگ الکترونی مناسب برای این شتاب‌دهنده در نرم‌افزارهای *COMSOL* و *CST* شبیه‌سازی شد و نتایج دو نرم‌افزار باهم مقایسه شد. در هر دو شبیه‌سازی ولتاژ نهایی باریکه ۳۰ کیلو الکترون‌ولت و جریان ۳۶۰ میلی‌آمپر و شعاع باریکه در خروجی یک میلی‌متر به دست آمد.

**کلمات کلیدی:** شتاب‌دهنده خطی الکترون، تفنگ الکترونی، نرم‌افزار *CST*، نرم‌افزار *COMSOL*، دینامیک باریکه

### مقدمه:

از اواسط دهه ۱۹۴۰ طراحی و ساخت شتاب‌دهنده‌های خطی الکترون به‌طور جدی آغاز شد، به‌نحوی که انواع مختلفی از ساختارهای این شتاب‌دهنده‌ها با انرژی‌های متفاوت به‌صورت تجاری درآمده و در کاربردهایی از قبیل صنعتی، پزشکی، بازرسی محموله‌های کامیونی، پرتوهای مواد غذایی و استریل کردن تجهیزات پزشکی به کار گرفته می‌شوند. کاربردهای گسترده این شتاب‌دهنده‌ها باعث جذابیت آن‌ها به‌عنوان موضوع پژوهشی دانشگاه‌ها شده است. در ایران نیز اقداماتی به‌منظور طراحی و ساخت نمونه اولیه تیوب شتاب‌دهی شتاب‌دهنده خطی الکترون ۶ مگا الکترون‌ولت برای کاربردهای پزشکی و بازرسی محموله‌های کامیونی انجام شده است. جهت تکمیل این شتاب‌دهنده و توانایی تست گرم تیوب شتاب‌دهی احتیاج به طراحی و ساخت تفنگ الکترونی مناسب برای این شتاب‌دهنده است [۱]. مهم‌ترین وظیفه تفنگ الکترونی، تولید باریکه الکترون به‌صورت قابل‌استفاده در تیوب شتاب‌دهی است. تولید باریکه الکترونی از سطح کاتد با سازوکارهای مختلفی از جمله ترمیونی، میدانی، الکترون ثانویه و فوتوالکترونیک انجام می‌شود. الکترون‌های تولیدشده در سطح کاتد با استفاده از آند، شتاب کوچکی گرفته و از روزنه آند وارد تیوب شتاب‌دهی خواهند شد. برای شکل‌دهی به باریکه الکترونی با توجه به مشخصات باریکه خروجی از تفنگ الکترونی، امکان استفاده از الکترودهای مختلف مانند الکتروده همگرا کننده، الکتروده کنترل‌کننده و گرید وجود خواهد داشت [۲].



طراحی تفنگ الکترونی با توجه به مشخصات موردنیاز برای باریکه الکترونی جهت شتاب‌دهی در تیوب شتاب‌دهنده انجام می‌گیرد. در این مقاله طراحی تفنگ الکترونی با استفاده از نرم‌افزار CST و COMSOL انجام شد و نتایج هر دو نرم‌افزار باهم مقایسه شد.

### روش کار:

همان‌طور که اشاره شد، طراحی تفنگ الکترونی با توجه به مشخصات باریکه الکترونی موردنیاز برای شتاب‌دهی در تیوب شتاب‌دهنده انجام خواهد می‌شود. برای شتاب‌دهنده خطی ۶ مگا الکترون‌ولت موردنظر، باریکه الکترون با جریان ۳۶۰ میلی‌آمپر و انرژی ۳۰ کیلو الکترون‌ولت موردنیاز است و شعاع باریکه در خروجی تفنگ الکترونی باید کمتر از ۱/۱ میلی‌متر باشد. مشخصات باریکه موردنیاز برای تیوب شتاب‌دهی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات شتاب‌دهنده ۶ میلیون الکترون‌ولت از نوع موج ایستا.

پارامتر	مقدار
جریان باریکه	۳۶۰ میلی‌آمپر
انرژی باریکه	۳۰ کیلو الکترون‌ولت
شعاع باریکه	۱ میلی‌متر

از آنجاکه در حال حاضر

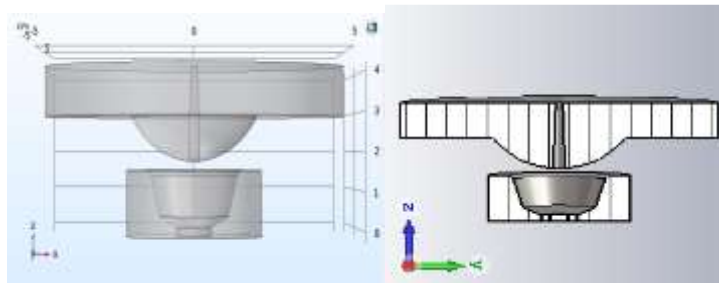
تفنگ الکترونی مشابهی برای صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی وجود ندارد، برای طراحی تفنگ الکترونی در این مقاله از دو نرم‌افزار CST و COMSOL استفاده شد. این دو نرم‌افزار در حوزه طراحی الکترومغناطیس و تراپرد ذره نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. اعمال شرایط فیزیکی یکسان به هر دو نرم‌افزار و حصول پارامترهای خروجی یکسان می‌تواند نشان‌دهنده صحت طراحی و شبیه‌سازی در این نرم‌افزارها باشد.

تفنگ الکترونی طراحی شده، یک تفنگ الکترونی ترمیونی دیودی از نوع پیرس است. در روشی که پیرس برای طراحی تفنگ الکترونی پیشنهاد داده است، حرکت ذرات در فاصله شتاب‌دهی را غیرنسبیتی در نظر گرفته و از نیروی اعمالی ناشی از میدان مغناطیسی تولیدی ذرات، صرف‌نظر کرده است. پیرس نشان داد که زاویه الکتروود همگرا کننده جهت تصحیح خطوط انحراف هم‌پتانسیل ناشی از بارفضایی الکترون، باید برابر با  $67/5^\circ$  باشد [۳].

در شبیه‌سازی ابعاد کاتد، آند و همچنین الکتروود همگرا کننده جهت همگرا سازی باریکه محاسبه شد. انتخاب کاتد با توجه به چگالی جریان موردنیاز و طول عمر کاتد صورت می‌گیرد. برای طراحی این تفنگ از کاتدهای جبرانگر تنگستن استفاده شده است که مخزن این کاتدها حاوی  $BaO, CaO, Al_2O_3$  است. این نوع کاتد در دمای حدود ۱۲۴۸ درجه کلین چگالی جریانی حدود ۱/۵ آمپر بر سانتی‌متر مربع تولید می‌کنند.

شتاب‌دهی اولیه به الکترون‌ها در فاصله کاتد تا آند به روش الکترواستاتیکی انجام می‌شود. در روش الکترواستاتیکی الکترون‌ها در میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ بالای بین آند و کاتد شتاب گرفته و از روزنه تعبیه‌شده در آند خارج می‌شوند. به جهت ایمنی معمولاً به آند پتانسیل صفر ولت اعمال می‌کنند. با توجه به اینکه انرژی موردنیاز برای باریکه خروجی ۳۰ کیلو الکترون‌ولت است و کاتد باید در پتانسیل منفی تری نسبت به آند قرار گیرد، پتانسیل کاتد ۳۰ کیلوولت در نظر گرفته شد. برای رسیدن با پارامترهای خروجی مطلوب باید ابعاد هندسی تفنگ الکترونی بهینه شود.

محاسبات در CST به روش انتگرال محدود انجام می‌شود. در این روش مسئله به عناصر کوچک تقسیم‌شده و حالت انتگرال معادلات ماکسول برای هر کدام از عناصر به صورت مجزا حل می‌شود. تقسیم‌بندی به عناصر کوچک‌تر به وسیله مش بندی انجام می‌گیرد. در حالی که در COMSOL از روش المان محدود برای حل معادلات استفاده می‌شود. در این روش هندسه به عناصر کوچک‌تر تقسیم‌شده و معادلات دیفرانسیل ماکسول برای هر کدام از عناصر به صورت جداگانه حل می‌شوند. با توجه به اینکه معادلات در هر دو نرم‌افزار برای هر کدام از مش‌ها حل می‌شود، پاسخ مسئله به اندازه مش‌ها مرتبط خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی فقط برای بازه‌ی معینی از مش‌ها همگرا می‌شود و خارج از بازه نتایج حاصل از شبیه‌سازی صحیح نخواهد بود. هندسه رسم شده برای تفنگ الکترونی در محیط دو نرم‌افزار CST و COMSOL در شکل ۱ نشان داده شده است. [۴-۵]



شکل شماره (۱) تفنگ الکترونی در CST (سمت راست) و در COMSOL (سمت چپ)

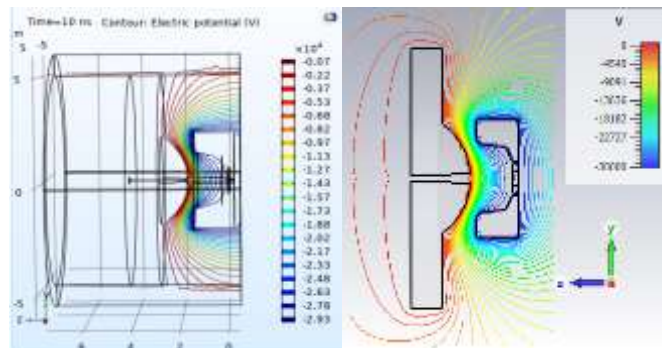
## نتایج:

همان‌طور که گفته شد، نتایج در ۲ نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. بدین صورت که ابتدا در نرم‌افزار CST با تغییر ابعاد پارامترهای خروجی بررسی شدند و با توجه به پارامترهای خروجی مطلوب، ابعاد مناسب برای تفنگ با شبیه‌سازی به دست آمد. سپس با ابعاد به دست آمده از نرم‌افزار CST، در نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی دوباره انجام شد و نتایج هر دو برنامه با هم مقایسه شد. در جدول ۲ ابعاد هندسی به دست آمده برای تفنگ الکترونی ارائه شده است. پتانسیل اعمالی به الکترون همگرا کننده باعث تغییر شکل خطوط میدان الکتریکی می‌شود. در شکل ۲ خطوط هم‌پتانسیل به دست آمده برای هر دو نرم‌افزار نشان داده شده است. میدان الکتریکی در فاصله کاتد تا آند افزایش یافته و شدت میدان الکتریکی در نزدیک آند به بیشینه مقدار می‌رسد. با توجه به این که بعد

از آند پتانسیل اعمال نشده است، با فاصله گرفتن از آند شدت میدان الکتریکی کاهش خواهد یافت. نمودار شدت میدان الکتریکی در امتداد محور Z در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول شماره (۲) ابعاد اجزای تفنگ الکترونی

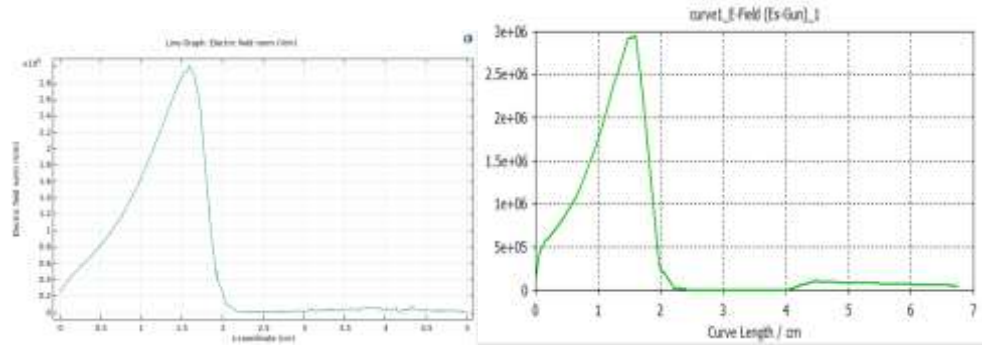
ابعاد اجزای تفنگ الکترونی	اندازه ابعاد (سانتی متر)
شعاع کاتد	۰/۲۸
شعاع انحنا کاتد	۴/۳۱
شعاع آند	۲/۴۷
مکان کمر باریکه	۴/۲۴
ارتفاع الکتروود همگرا کننده	۱/۵



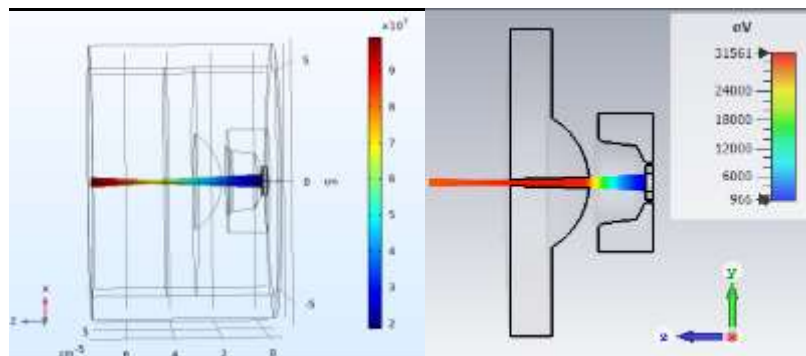
شکل شماره (۲) خطوط همپتانسیل در CST (سمت راست) و در COMSOL (سمت چپ)

با توجه به مسیر باریکه الکترون در شکل ۴ مشاهده می شود که مکان کمر باریکه برای هر دو نرم افزار نزدیک خروجی آند قرار گرفته است. مکان کمر باریکه در نرم افزار CST منطبق بر خروجی آند و در نرم افزار COMSOL، ۲ میلی متر بعد از خروجی آند قرار گرفته است.

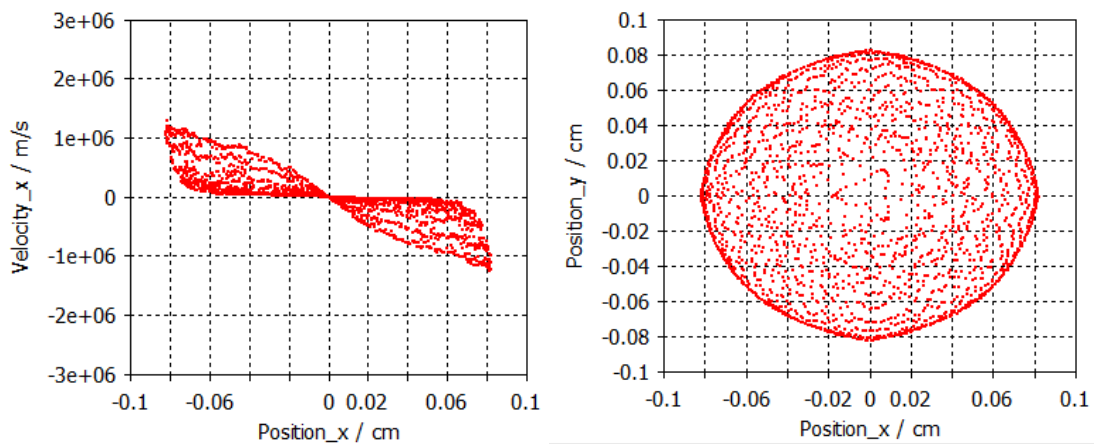
ذرات در باریکه ایده آل حرکت خطی دارند و مسیر حرکت ذرات همدیگر را قطع نمی کنند. در یک باریکه خطی تمام ذرات عبوری از یک نقطه، سرعت عرضی یکسان دارند. با همگرا سازی باریکه در اثر اعمال الکتروود همگرا کننده، امکان دارد سرعت عرضی ذرات در یک مکان برابر شوند. شکل ۵ نیم رخ عرضی باریکه و تصویر فضای فاز را در کمر باریکه نمایش می دهد. مشاهده می شود باریکه حاصل، یک باریکه خطی و تقریباً موازی با شعاع ۰/۸ میلی متر است.



شکل شماره (۳) شدت میدان الکتریکی محور Z در CST (سمت راست) و در COMSOI (سمت چپ)



شکل شماره (۴) مسیر باریکه الکترون در CST (سمت راست) و در COMSOI (سمت چپ)



شکل شماره (۵). نیم‌رخ عرضی باریکه (سمت راست) فضای فاز باریکه (سمت چپ)



### بحث و نتیجه‌گیری:

برای طراحی تفنگ الکترونی، ابتدا ابعاد هندسه با توجه به پارامترهای خروجی مطلوب، در CST محاسبه شد. بار دیگر شبیه‌سازی با این ابعاد به دست آمده در COMSOL انجام شد و نتایج حاصل از دو نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به نتایج حاصل از دو نرم‌افزار CST و COMSOL مشاهده می‌شود که خطوط هم‌پتانسیل در دو نرم‌افزار مشابه است. بیشینه میدان الکتریکی در فاصله ۱/۶ سانتی‌متری از کاتد و نزدیکی آند قرار دارد که حدوداً برابر با ۳ مگاولت بر متر است. نتایج CST، باریکه الکترونی با جریان ۳۶۱ میلی‌آمپر و انرژی ۳۰ کیلو الکترون‌ولت را در خروجی آند و نتایج حاصل از COMSOL باریکه‌ای با جریان ۳۶۰ میلی‌آمپر و انرژی ۳۰/۴ کیلو الکترون‌ولت را در همان خروجی آند نشان می‌دهد. با توجه به نزدیک بودن نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار COMSOL به نتایج حاصل از شبیه‌سازی با CST، صحت شبیه‌سازی انجام شده با CST برای محاسبه ابعاد اجزای تفنگ الکترونی را تصدیق می‌کند.

### مراجع:

[1] زارعی، سارا - "طراحی و ساخت تیوب شتاب‌دهی موج ایستا در باند S برای شتاب‌دهنده خطی الکترون ۶ مگا الکترون‌ولت" - ۱۳۹۷.

[2] A. S. K. GILMOUR JR.- Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons- ۲۰۱۱.

[3] S. Humphries - "Charged Particle Beams,"- ۲۰۰۲.

[۴] Anastasis C. Polycarpou - "Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics" ۲۰۰۶.

[۵] M. Clemens and T. Weiland - "DISCRETE ELECTROMAGNETISM WITH THE FINITE INTEGRATION TECHNIQUE"- 2001.