

fabbasi@sbu.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۸/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۷/۲۰)

MATLAB
۱۰ cm mA mm
CST Studio Design ۳۰ keV

در این پژوهش یک مجموعه از الکترودهای شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی و یک لنز متمرکز کننده در انتهای آن به کمک حل عددی معادله لاپلاس در فضای خارج باریکه الکترونی و محاسبه سطوح هم پتانسیل طراحی شده است. مجموعه شتاب‌دهنده شامل دو الکتروود با پتانسیل‌های صفر و ۶۰ keV است که میدان الکتریکی مورد نیاز جهت شتاب‌گیری الکترون‌ها را تا انرژی ۶۰ keV که دو برابر مقدار مورد نظر برای انرژی باریکه نهایی است فراهم می‌کنند. الکتروود ۶۰ keV الکتروود شتاب‌دهنده نامیده می‌شود و در یک فاصله مناسب از الکتروود صفر (جهت جلوگیری از جرقه زنی بین آنها) قرار می‌گیرد. الکتروود متصل به پتانسیل صفر نیز به روزنه تابش معروف است و در اطراف کاتد تابش کننده الکترون‌ها نصب می‌شود و شکل آن منجر به کاهش واگرایی باریکه شتاب گرفته می‌شود.

تحلیل و محاسبات کامپیوتری در اپتیک باریکه‌های الکترونی و یونی اولین بار در سال ۱۹۶۹ به کار گرفته شد [۱]. در سال‌های بعد به دلیل نیاز بیشتر به انواع مختلف دستگاه‌های الکترونی و یا یونی نرم‌افزارهای کامپیوتری به تدریج توسعه بیشتری یافتند. در این میان نرم‌افزارهای شبیه‌سازی میدان‌های الکترومغناطیسی و ترابرد ذرات به یک استاندارد جهانی برای آزمایش‌های فیزیک ذرات باردار تبدیل شده‌اند. MATLAB یک نرم‌افزار محاسبات و تحلیل عددی بسیار قوی برای حل مجموعه بسیار گسترده‌ای از معادلات و CST Design Studio یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، تحلیل و محاسبات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است که توانایی شبیه‌سازی مسائل اپتیک باریکه در گستره وسیعی از کاربردها را دارا می‌باشد.

کند در حالی که روی مرز $\theta = 0$ باید برابر با مقادیر به دست آمده از معادله (۱) باشد. بدیهی است که یون‌های نزدیک لبه باریکه توسط یون‌های در عمق آن پس زده شده و بازشدگی باریکه را در ناحیه $\theta > 0$ موجب خواهند شد. با دادن یک زاویه به سطح بدون تابش کاتد در $\theta > 0$ ، این تمایل به بازشدگی خنثی شده و یک باریکه موازی ایجاد خواهد شد [۲].

جواب معادله لاپلاس که مقادیر مورد انتظار را در مرز باریکه به دست خواهند داد برابر است با:

$$V = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0} kI \right)^{\frac{1}{2}} r^{\frac{2}{3}} \cos \frac{\theta}{3}, \quad (3)$$

که در آن r و θ بردارهای مختصات قطبی در همان دستگاه مختصات قبلی هستند. در نتیجه پتانسیل نه تنها در $\theta = 0$ که در $\theta = \frac{\pi}{3}$ نیز باید صفر شود. لذا زاویه θ که زاویه سطح بدون تابش کاتد یا همان روزنه تابش است برابر خواهد بود با:

$$\theta = \frac{2\pi}{3} = 67/5 \text{ deg}$$

فرض کنیم معادله $y = Y(x)$ در صفحه xy معادله مسیر حرکت در یک مرز باریکه باشد. این طور فرض می‌شود که $\theta = 0$ نیز یک مسیر حرکت است و لبه دیگر باریکه نیز از معادله متقارن $y = -Y(x)$ به دست می‌آید. در نتیجه مسیرهای میانی از معادله $y = cY(x)$ به دست خواهند آمد. که در آن c پارامتری است که در فاصله $-1 \leq c \leq 1$ تغییر می‌کند. به علاوه، فرض می‌شود که جریان به طور مساوی در سطح مقطع باریکه پخش شده است و چگالی جریان همه جا یکنواخت است.

اگر $V(x,y)$ نمایانگر پتانسیل در باریکه با در نظر گرفتن اثرات بار فضایی باشد، معادلات حرکت برای یک یون با بار e و جرم m برابر خواهد بود با:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{e}{m} \frac{\partial V}{\partial x}, \quad (4)$$

که در آنها m بر حسب گرم، e بر حسب ایستاکولن و V بر حسب کیلوولت است.

با این حال باریکه نهایی همچنان دارای واگرایی زیادی خواهد بود که آن را برای اکثر کاربردها نامناسب می‌سازد. برای کاهش بیشتر این واگرایی لنز متمرکز کننده الکترواستاتیکی که به پتانسیل 30 kV یعنی نصف پتانسیل الکتروود شتاب‌دهنده متصل است پس از الکتروود شتاب‌دهنده نصب می‌شود و شکل خاص طراحی آن منجر به متمرکز شدن باریکه شتاب داده شده می‌شود. البته انرژی باریکه را نیز به نصف یعنی مقداری که از ابتدا برای باریکه شتاب داده شده نهایی مورد نظر ما بود کاهش می‌دهد. جزئیات دقیق‌تر این طراحی‌ها در ادامه ذکر شده‌اند. در نهایت نیز مجموعه طراحی شده در نرم افزار CST Design Studio شبیه‌سازی شده، رفتار باریکه الکترونی در آن مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات آن با فرض‌های اولیه طراحی مقایسه می‌شوند.

فرض کنیم که کاتد در صفحه $\theta = 0$ بوده و باریکه به شکل عمود بر این صفحه و در جهت x مثبت تابش می‌شود. برای سادگی محاسبات یک برش طولی دو بعدی از باریکه را در راستای صفحه $\theta = 0$ بررسی می‌کنیم. بدیهی است که این برش نسبت به محور x متقارن بوده و لذا تعمیم نتیجه به سه بعد به سادگی امکان پذیر خواهد بود. اگر باریکه کاملاً موازی حرکت کرده و هیچ واگرایی نداشته باشد، معادله پواسون برای پتانسیل محور آن برابر خواهد بود با:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = k \frac{I}{\sqrt{V}}, \quad (1)$$

که در آن V پتانسیل و I جریان در هر نقطه از باریکه و k مقداری ثابت است. پاسخ این معادله برای جریان با بار فضایی محدود ($V(0) = 0$ و $\left(\frac{dV}{dx}\right)_{x=0} = 0$) برابر خواهد بود با:

$$V = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0} kI \right)^{\frac{2}{3}} x^{\frac{4}{3}}. \quad (2)$$

اما در عمل این کاتد تا بی نهایت ادامه نداشته و دارای یک حد مشخص و محدود خواهد بود. فرض کنیم کاتد به ازای $\theta < 0$ تابش کرده ولی در $\theta > 0$ تابش نداشته باشد ($I_{y>0} = 0$) تا صفحه $\theta = 0$ یک مرز باریکه باشد ($\theta > 0$ روزنه تابش خواهد بود). در $\theta > 0$ ، پتانسیل باید در معادله لاپلاس صدق

لذا معادله پواسن برای $y = 0$ برابر خواهد شد با :

$$V_0''(x) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \frac{4I}{Y^2(x) \sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)}} \quad (16)$$

که اجازه حذف عامل $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0}$ را از معادله (۱۱) می‌دهد:

$$\begin{aligned} \sqrt{V_0(x)} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{V_0(x)} \frac{dy}{dx} \right) + \frac{1}{2} V_0''(x) y \\ = \frac{2I}{\sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)} Y^2(x)} y \end{aligned} \quad (17)$$

اینک اگر $y=Y(x)$ را به عنوان معادله مسیر مرزی باریکه در معادله فوق جایگزین کنیم، نتیجه یک معادله دیفرانسیل خواهد بود که باید معادله پتانسیل در راستای محور باریکه، $V_0(x)$ ، در آن صدق کند:

$$\begin{aligned} Y(x) V_0''(x) + Y'(x) V_0'(x) + 2Y''(x) V_0(x) \\ = \frac{4I}{Y(x) \sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)}} \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن همان طور که ذکر شد، Y بر حسب سانتیمتر، I بر حسب آمپر، e بر حسب ایستاکولن، m بر حسب گرم و V بر حسب کیلوولت است.

یک شرط اولیه برای حل این معادله، $V_0(0) = 0$ است زیرا پتانسیل در کاتد برابر صفر است. شرط اولیه دیگر شیب تغییرات پتانسیل در راستای محور باریکه در نقطه صفر است که مقدار آن پتانسیل حداکثر و در نتیجه انرژی نهایی باریکه در محل تمرکز را تعیین می‌کند و انتخاب آن بستگی به مقدار این انرژی دارد.

اینک برای به دست آوردن پتانسیل روی مرز باریکه، عبارت $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0}$ را از معادله (۱۶) در (۶) جایگذاری می‌کنیم و

$y=Y(x)$ را نیز در معادله نهایی به دست آمده قرار می‌دهیم :

$$V(x, Y(x)) = V_0(x) + \frac{1}{2} Y^2(x) \left[\frac{4I}{Y^2(x) \sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)}} - V_0''(x) \right] \quad (19)$$

اگر پتانسیل در طول محور x را $V_0(x)$ بنامیم، یعنی :

$$V(x, 0) = V_0(x) \quad (5)$$

در نتیجه، به دلیل تقارن نسبت به $y = 0$ ، در $y = 0$ خواهیم داشت: $\frac{\partial V}{\partial y} = 0$. شرط پیرامحوری به ما اجازه می‌دهد که

پتانسیل را به شکل زیر تخمین بزنیم :

$$V(x, y) = V_0(x) + \frac{1}{2} y^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0} \quad (6)$$

لذا حرکت در جهت x برابر خواهد بود با :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{e}{m} \frac{dV_0(x)}{dx} \quad (7)$$

اگر از این رابطه بر حسب x انتگرال بگیریم خواهیم داشت :

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{2e}{m} V_0(x) \quad (8)$$

و حرکت در راستای y :

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{e}{m} y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0} \quad (9)$$

با استفاده از معادله (۸)، عامل t را از معادله (۹) حذف می‌کنیم :

$$\sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)} \frac{dy}{dx} \right) = \frac{e}{m} y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0} \quad (10)$$

و یا :

$$\sqrt{V_0(x)} \frac{d}{dx} \left(\sqrt{V_0(x)} \frac{dy}{dx} \right) = \frac{1}{2} y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_{y=0} \quad (11)$$

اگر I جریان کل باریکه باشد، چگالی جریان در x برابر خواهد بود با :

$$J = \frac{I}{\pi Y^2(x)} \quad (12)$$

لذا چگالی بار در x برابر خواهد شد با :

$$\rho = - \frac{I}{\pi Y^2(x) \sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)}} \quad (13)$$

لذا معادله پواسن برای پتانسیل برابر خواهد شد با :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \frac{4I}{Y^2(x) \sqrt{\frac{2e}{m} V_0(x)}} \quad (14)$$

با استفاده از معادله (۶) برای $y = 0$ داریم :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = V_0''(x) \quad (15)$$

و یا:

$$y = \frac{4I}{Y(x)V_0''(x)\sqrt{\frac{2e}{m}V_0(x)}} \quad (27)$$

$$\pm \sqrt{\frac{\frac{m}{e}I^2}{Y^2(x)(V_0''(x))^2 V_0(x)} + \frac{2(V_0(x) - V(x,y))}{V_0''(x)}}$$

که با قرار دادن مقدار $V(x,y)$ در این معادله، سطح هم پتانسیل متناظر با آن $V(x,y)$ در صفحه $z = 0$ به دست خواهد آمد.

معادله‌های بسیاری برای مسیر مرزی یک باریکه در یک شتاب‌دهنده الکترواستاتیکی پیشنهاد شده‌اند که از میان آنها ما معادله باریکه هایپربولیک را به دلیل ساده‌تر شدن روش به کار گرفته شده در ادامه برای حل عددی معادلات به کمک نرم افزار MATLAB انتخاب می‌کنیم [۳]:

$$Y(x) = Y_m + (Y_0 - Y_m) \frac{\left(\frac{x-x_m}{x_m}\right)^2}{1 + \left(\frac{Y_0 - Y_m}{x_m}\right) \frac{x}{x_m} \cot \alpha} \quad (28)$$

که در آن Y_0 شعاع باریکه در کاتد بر حسب سانتیمتر، x_m طول محل تمرکز باریکه (محل رسیدن پتانسیل محوری به مقدار حداکثر خود) بر حسب سانتیمتر، Y_m شعاع باریکه در محل تمرکز بر حسب سانتیمتر و α زاویه دیورژانس باریکه است.

طراحی را برای یک باریکه فرضی به جریان ۲ mA و با شعاع اولیه ۴ mm، شعاع محل تمرکز ۲ mm، دیورژانس 5° و طول کمتر از ۱۰ cm برای کل مجموعه شتاب‌دهنده و متمرکز کننده انجام می‌دهیم که می‌خواهیم تا انرژی ۳۰ keV شتاب بگیرد. یک باریکه هایپربولیک با این مشخصات دارای فاصله‌ای برابر با نصف طول کل مجموعه یعنی ۵ cm بین محل تمرکز و کاتد و دو برابر انرژی باریکه خروجی یعنی ۶۰ keV در محل تمرکز خواهد بود [۳]. با جایگذاری مقادیر فوق در معادله مسیر مرزی هایپربولیک خواهیم داشت:

$$Y(x) = 0.2 + \frac{x^2 - 1.0x + 2.5}{12.5 + 11.43x}$$

و بر طبق معادله (۱۸) برای پتانسیل محور باریکه خواهیم داشت:

$$V(x,Y) = V_0(x) + \frac{4I}{\sqrt{\frac{2e}{m}V_0(x)}} - \frac{1}{2}Y^2(X)V_0''(X). \quad (20)$$

اینک معادله پتانسیل را در بیرون مرز باریکه به دست می‌آوریم. بسط سری توانی $V(x,y)$ را بر حسب توان‌های $(y-Y(x))$ بیرون $Y(x)$ تا درجه ۲ می‌نویسیم:

$$V(x,y) = V(x,Y(x)) + (y-Y(x)) \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=Y(x)} + \frac{1}{2}(y-Y(x))^2 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)_{y=Y(x)} \quad (21)$$

با جایگذاری عبارت $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)_{y=0}$ از معادله (۱۶) در معادله (۶) و سپس مشتق‌گیری از آن بر حسب y و قرار دادن $y=Y(x)$ در آن خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=Y(x)} = \frac{4I}{Y(x)\sqrt{\frac{2e}{m}V_0(x)}} - Y(x)V_0''(x). \quad (22)$$

به علاوه از معادله لاپلاس برای مرز باریکه داریم:

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)_{y=Y(x)} = -\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)_{y=Y(x)} \quad (23)$$

با تقریب خوبی می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)_{y=Y(x)} = \frac{d^2 V_0(x)}{dx^2}, \quad (24)$$

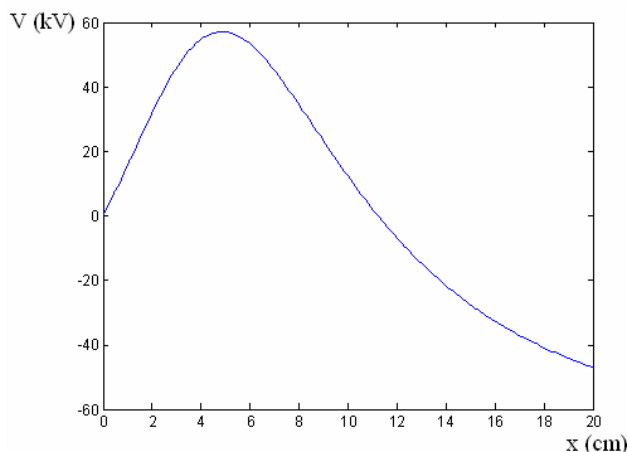
زیرا خطای این جایگذاری از مرتبه $Y^2(x)$ است که وقتی در $(y-Y(x))^2$ نیز ضرب شود کاملاً قابل نظر خواهد بود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)_{y=Y(x)} = -\frac{d^2 V_0(x)}{dx^2}. \quad (25)$$

اینک مقادیر $\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)_{y=Y(x)}$ و $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)_{y=Y(x)}$ را از روابط (۲۲) و (۲۵) در معادله (۲۱) جایگذاری می‌کنیم. در نهایت برای پتانسیل در بیرون باریکه خواهیم داشت:

$$V(x,y) = V_0(x) - \frac{1}{2}y^2 V_0''(x) + y \frac{4I}{Y(x)\sqrt{\frac{2e}{m}V_0(x)}}. \quad (26)$$

با حل معادله فوق بر حسب y خواهیم داشت:



شکل ۱. پتانسیل محور باریکه با شرایط اولیه $V_0(0) = 0$ و

$$\left. \left(\frac{dV_0(x)}{dx} \right) \right|_{x=0} = 14$$

جدول ۲. حداکثر خطای نسبی برازش بر حسب درجه منحنی.

درجه منحنی	حداکثر خطای نسبی
۳	٪۱۱/۶
۴	٪۹/۱
۵	٪۵/۸
۶	٪۱/۶
۷	٪۱/۱۵
۸	٪۰/۸

برای به دست آوردن سطوح هم پتانسیل به یک معادله تحلیلی برای $V_0(x)$ نیاز داریم. این معادله را با برازش^۱ یک منحنی چند جمله‌ای بر منحنی پتانسیل محور باریکه به کمک نرم افزار MATLAB به دست می‌آوریم. برازش را از منحنی درجه ۳ آغاز می‌کنیم و هر بار پس از افزایش درجه منحنی، حداکثر خطای نسبی برازش را محاسبه می‌کنیم. جدول ۲ نتایج این محاسبات را نشان می‌دهد.

این نتایج نشان می‌دهند که خطای نسبی برازش برای منحنی درجه ۸ به کمتر از ۱٪ رسیده است که مقدار مناسبی است. در نتیجه منحنی درجه ۸ برازش شده را به عنوان معادله تحلیلی برای پتانسیل محور باریکه انتخاب می‌کنیم. این معادله

جدول ۱. مقادیر پتانسیل حداکثر محور باریکه به ازای مقادیر مختلف

شیب اولیه پتانسیل محور باریکه.

شیب پتانسیل (kV/cm)	پتانسیل محوری حداکثر باریکه (kV)
۱	۴/۱
۲	۸/۲
۵	۲۰/۵
۱۰	۴۱
۱۲	۴۹
۱۳	۵۳
۱۴	۵۷
۱۵	۶۱
۱۶	۶۵

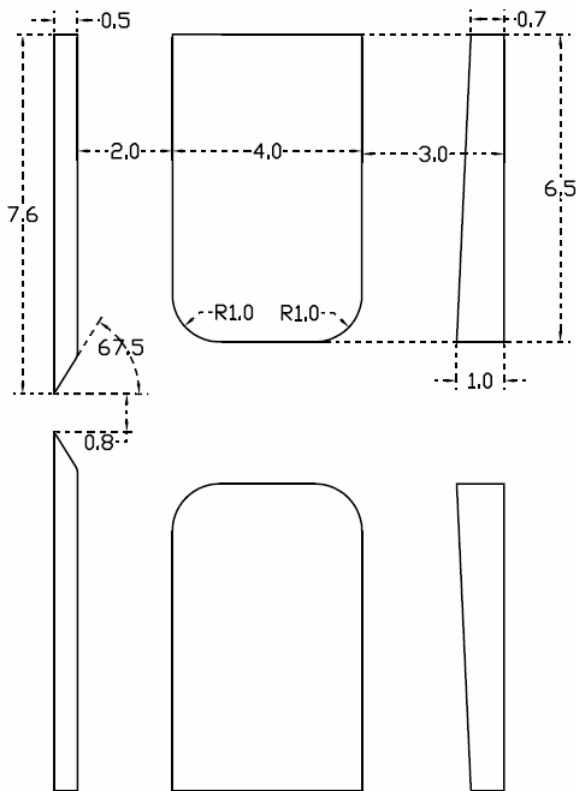
$$Y(x) V_0''(x) + Y'(x) V_0'(x) + 2Y''(x) V_0(x) = \frac{2/45 \times 10^{-11}}{Y(x) \sqrt{V_0(x)}}$$

اگر این معادله حل تحلیلی داشته باشد این حل بسیار مشکل خواهد بود. ما این معادله را به روش عددی و به کمک نرم افزار MATLAB حل می‌کنیم. می‌خواهیم باریکه الکترونی توسط الکترودهای متصل به پتانسیل ۶۰ kV شتاب بگیرد لذا لازم است تا پتانسیل حداکثر محور باریکه در محل باریکه قدری کمتر از این مقدار برسد. با داشتن یک شرط اولیه $V_0(0) = 0$ و با تغییر تدریجی شیب پتانسیل محور باریکه در نقطه $x = 0$ (شرط اولیه دوم برای حل معادله پتانسیل محوری) و محاسبه پتانسیل حداکثر محور باریکه، شیب اولیه مناسب برای پتانسیل محوری را به دست می‌آوریم. مقادیر پتانسیل حداکثر محور باریکه به ازای مقادیر مختلف شیب اولیه پتانسیل محور باریکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که پتانسیل حداکثر محور باریکه به ازای شیب اولیه ۱۴ kV/cm برابر ۵۷ kV است که مقدار مناسبی است. در نتیجه شرط اولیه دوم در حل معادله پتانسیل محور باریکه را $\left. \left(\frac{dV_0(x)}{dx} \right) \right|_{x=0} = 14$ قرار می‌دهیم. شکل ۱ پتانسیل محور باریکه الکترونی با شرایط اولیه $V_0(0) = 0$ و

$$\left. \left(\frac{dV_0(x)}{dx} \right) \right|_{x=0} = 14 \text{ را نشان می‌دهد.}$$

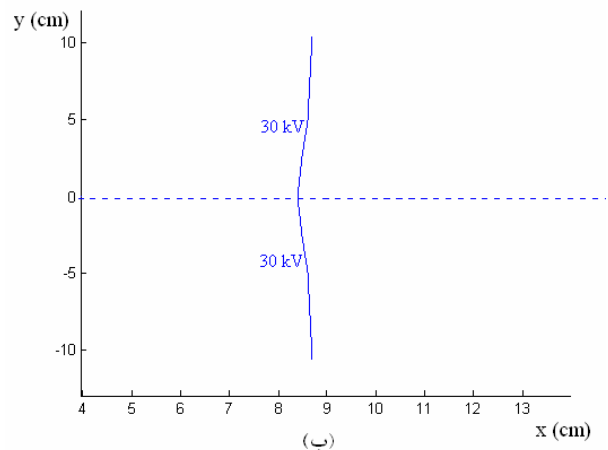
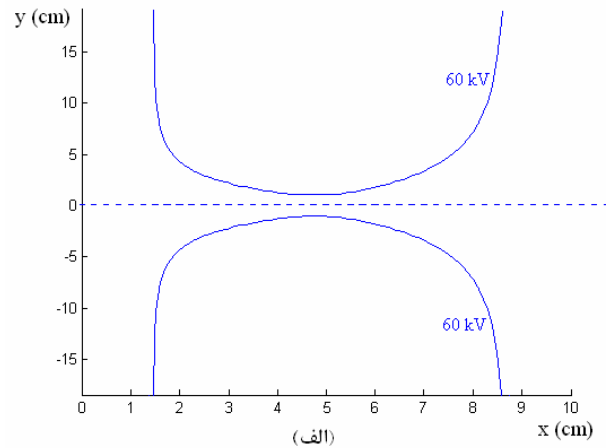
۱. Fit



شکل ۳. مجموعه روزنه تابش و الکتروود شتاب‌دهنده و لنز متمرکز کننده.

الکتروودها بر سطوح به دست آمده امکان پذیر نیست. لذا شکل نهایی الکتروودها و روزنه تابش اندکی با سطوح هم‌پتانسیل به دست آمده متفاوت خواهد شد که تأثیر این تغییرات اعمال شده در تعیین شکل این الکتروودها در ادامه و در بخش بحث و نتیجه‌گیری بررسی خواهد شد. شکل ۳ مجموعه این الکتروودها و روزنه تابش را نشان می‌دهد.

مجموعه روزنه تابش و الکتروود شتاب‌دهنده و لنز متمرکز کننده را مطابق طراحی انجام شده در نرم افزار CST Studio Design و در حالت Particle Tracking مدل می‌کنیم. شبیه‌سازی را در حالت بار فضایی محدود^۱ و برای باریکه الکترونی تابیده شده از کاتد به شعاع ۴ میلی‌متر و با فعال کردن کد E-Static Solver انجام می‌دهیم. شکل ۴ میدان الکتریکی بین الکتروودها و شکل ۵



شکل ۲. سطوح هم‌پتانسیل الف) ۶۰ kV و ب) ۳۰ kV.

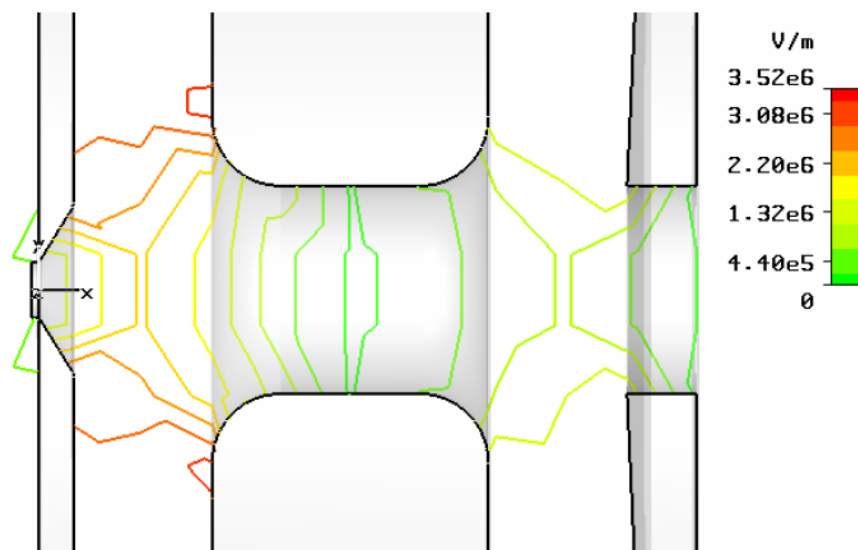
عبارت است از :

$$V_e(x) = -2/7235 \times 10^{-7} x^8 + 1/5942 \times 10^{-5} x^7 - 2/1042 \times x^6 - 0/005 \times x^5 + 0/1798 \times x^4 - 1/9075 \times x^3$$

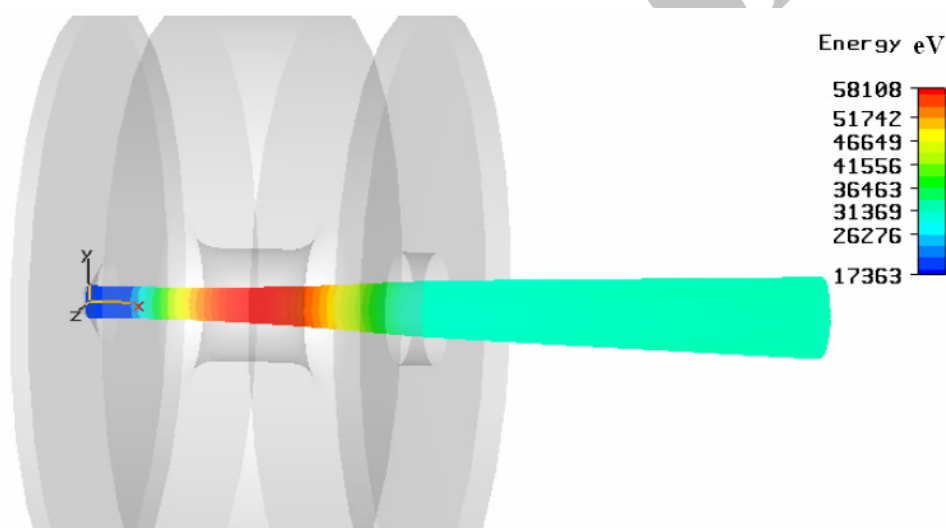
سپس با قرار دادن این معادله و مشتقات آن در معادله (۲۷) و قرار دادن $V(x,y) = 30$ و $V(x,y) = 60$ در آن، به ترتیب سطوح هم‌پتانسیل ۶۰ kV و ۳۰ kV را به دست خواهیم آورد. شکل ۲ این سطوح را نشان می‌دهد.

در نهایت روزنه تابش را با پتانسیل صفر و زاویه ۶۷/۵ درجه در اطراف کاتد قرار داده و الکتروود شتاب‌دهنده و لنز متمرکزکننده را نیز بر سطوح هم‌پتانسیل به دست آمده منطبق می‌کنیم. البته به دلیل ملاحظات عملی نظیر امکان جرقه زنی بین الکتروودها و امکان پذیر بودن ساخت آنها، تطبیق کامل

۱. Space Charge Limited



شکل ۴. میدان الکتریکی درون مجموعه شتاب‌دهنده و لنز.



شکل ۵. باریکه الکترونی شتاب گرفته در مجموعه شتاب‌دهنده و لنز.

نهایی باریکه نیز برابر $31/4 \text{ keV}$ به دست آمده که از مقدار مورد نظر یعنی 30 keV فاصله چندانی ندارد. سایر پارامترهای مشخصه باریکه نظیر x_m ، y_m و انرژی حداکثر باریکه در محل تمرکز نیز تنها مربوط به مراحل شتاب‌گیری و پیش از خروج باریکه الکترونی از مجموعه بوده و لذا مقدار آنها تنها در مرحله طراحی اهمیت دارد. لذا وقتی باریکه نهایی خارج شده از مجموعه شتاب‌دهنده و متمرکز کننده مشخصات مورد نظر را داشته باشد، اختلاف این پارامترها از فرض‌های اولیه طراحی

باریکه الکترونی شتاب گرفته در اثر این میدان را نمایش می‌دهد. مشخصات این باریکه نیز در جدول ۳ درج شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، واگرایی نهایی باریکه که کاهش مقدار آن هدف اصلی این پژوهش می‌باشد در شبیه‌سازی $3/4^\circ$ به دست آمده است که حتی از فرض اولیه طراحی یعنی 5° نیز کمتر و در نتیجه مناسب‌تر است. انرژی

جدول ۳. مشخصات باریکه الکترونی شتاب گرفته در مجموعه شتاب‌دهنده و لنز.

دیورژانس باریکه خروجی	$3/4^\circ$
Y_s	۰/۴ cm
Y_m	۰/۳۴ cm
x_m	۳ Cm
انرژی حداکثر باریکه	۵۸/۱ keV
انرژی باریکه خروجی	۳۱/۴ keV

شد، این مقادیر تأثیری بر پارامترهای باریکه خروجی نداشته و باریکه خروجی مشخصات مورد انتظار را دارد.

لذا مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی به فرض‌های اولیه در نظر گرفته شده در طراحی بسیار نزدیک است که درستی روش به کار گرفته شده در تحلیل و طراحی این مجموعه را نشان می‌دهد و اختلافات جزئی مشاهده شده نیز به دلیل تقریب‌های اعمال شده به دلیل ملاحظات عملی در انتخاب شکل الکتروود شتاب‌دهنده و لنز متمرکز کننده از روی سطوح هم‌پتانسیل ۶۰ kV و ۳۰ kV است. با بررسی تغییرات در رفتار باریکه الکترونی در پی تغییر مشخصات سیستم، می‌توان سایر پارامترهای موثر در عملکرد این مجموعه شتاب‌دهنده و متمرکز کننده را نیز مشخص کرد

دیگر اهمیتی ندارد. اختلاف به وجود آمده در این نتایج و فرض‌های اولیه طراحی همان‌طور که در بخش طراحی ذکر شد نتیجه ملاحظات عملی در نظر گرفته شده برای انتخاب شکل الکتروودهای شتاب‌دهنده است. چرا که این الکتروودها کاملاً بر سطوح هم‌پتانسیل محاسبه شده منطبق نیستند. در نتایج شبیه‌سازی انرژی حداکثر باریکه برابر ۵۸/۱ keV و بسیار نزدیک به فرض اولیه طراحی یعنی ۵۷ keV است. شعاع باریکه در محل تمرکز، Y_m ، نیز برابر ۳/۴ mm به دست آمده که البته با مقدار در نظر گرفته شده در طراحی یعنی ۲ mm فاصله نسبتاً زیادی دارد. همین‌طور فاصله محل تمرکز باریکه تا کاتد، x_m ، که در شبیه‌سازی ۳ cm به دست آمده اما مقدار فرض شده برای آن در طراحی ۵ cm است. اما همان‌طور که ذکر

(2005) 126.

3. R K Wakerling, *U.S. Naval Radiological defense laboratory*, June (1949) 234-236, 252-254.

1. M M Abdelrahman. *Journal of Nuclear and Radiation Physics*, 3 (2) (2008) 93.

2. S I Molokovsky & A D Sushkov "Intense Electron and Ion Beams", Springer Verlag Berlin Heidelberg