

طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم انتقال مغناطیسی پوزیترون برای مطالعات سطح مواد

امیدرضا نوری و مسعود مهجور شفیعی

آزمایشگاه تحقیقاتی چشمه‌ی یونی، دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، خیابان کارگر شمالی، تهران

(دریافت مقاله : ۹۰/۰۸/۱۱ - پذیرش مقاله : ۹۰/۰۹/۳۰)

چکیده

در این مقاله گزارشی از طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم انتقال مغناطیسی خم برای انتقال پوزیترون به منظور انجام طیف‌سنجی پوزیترون به روش انتقال دوپلری، توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز CST ارائه می‌شود. طیف‌سنجی پوزیترونی به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارد در مطالعه‌ی فیزیک سطح و نانوذرات بسیار پرکاربرد و مورد توجه است. سیستم ارائه شده در این مقاله باریکه را روی محیط دایره‌ای به شعاع ۱/۵ متر و به طول ۱۱۴ سانتی‌متر منتقل می‌کند. قطر باریکه روی هدف ۰/۱۶ قطر آن در لحظه‌ی استخراج می‌باشد. در ضمن این سیستم گستره‌ی انرژی بین ۲۰۰ الکترون‌ولت تا ۲۰ کیلوالکترون‌ولت را برای باریکه فراهم می‌سازد.

واژه های کلیدی: سی‌اس‌تی، باریکه‌ی پوزیترون‌کننده، شبیه‌سازی، سیستم انتقال مغناطیسی خم.

Simulation and design of a curved magnetic positron transportation system

O. R. Nouri and M. Mahjour-Shafiei

Ion source research lab, Department of Physics, University of Tehran, Tehran

(Received 2 Nov 2011, accepted 21 Dec 2011)

Abstract

We are reporting on the design and simulation of a curved positron-transportation system for Doppler-broadening positron spectroscopy purposes, with the use of CST simulation software. Positron spectroscopy is widely used in surface science and nanoscience. In the present system positrons travel 114 centimeter from the moderator to the target on a curved trajectory with the radius of 150 cm. This system is expected to deliver beams at the target with the cross section diameter 0.16 times smaller than that at the moderator. In addition, the beam energy would be ranging from 200 eV to 20 keV.

Keywords: CST (Computer Simulation Technology), Slow Positron Beam, Curved Magnetic Transportation System, Simulation

E-mail of corresponding author: omidreza.nouri@ut.ac.ir

مقدمه

نمود که حالت خمیده دارد. در این روش انتقال دو مورد مهم وجود دارد که باید در حین طراحی سیستم لحاظ گردد: الف) همسانی میدان‌های محوری، ب) جلوگیری از رانش‌های عرضی بزرگ، در طول مسیر انتقال محوری که پوزیترون حول آن مسیر حرکت سیکلوترونی دارد. مورد الف با عنایت به قید

$$\frac{\sin^2 \theta}{B} = \text{const}, \quad (1)$$

قابل اعمال است [۸]. در اینجا B ، میدان مغناطیسی است و θ به صورت

$$\tan \theta = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \quad (2)$$

تعریف می‌شود که در آن v_{\perp} و v_{\parallel} به ترتیب مولفه عمودی و موازی سرعت در راستای میدان مغناطیسی هستند. چون افزایش میدان مغناطیسی منجر به افزایش زاویه θ می‌گردد، افزایش میدان بیش از حد می‌تواند سبب بازتاب کامل ذرات شود که قطعاً مطلوب نیست. این درحالیست که افزایش میدان مغناطیسی می‌تواند در فشرده سازی قطر باریکه (قطر باریکه با جذر اندازه‌ی میدان بطور معکوس متناسب است)، مورد استفاده قرار گیرد که بسیار مطلوب است. صرفنظر از شعاع حرکت سیکلوترونی پوزیترون، تحت شرایط آدیاباتیکی (تغییرات آرام میدان طی یک چرخه‌ی حرکت سیکلوترونی)، پوزیترون به خطوط میدان می‌چسبد و خمیدگی میدان را تعقیب می‌کند. سرعت سوق مرکز سیکلوترون تقریباً به صورت

$$v_D (\text{cm/s}) = 2 \times 10^8 \frac{E_{\parallel} (\text{eV})}{R (\text{cm}) B (\text{G})}, \quad (3)$$

بیان می‌شود. در این رابطه، E_{\parallel} انرژی جنبشی ذره در راستای مماس بر مسیر حرکت ذره و R شعاع انحنای سیملوله است [۹]. سرعت سوق در واقع تمایل دارد تا ذره را از مسیر اصلی خود روی محور سیملوله منحرف کند و مانع از تعقیب خمیدگی میدان توسط ذره می‌شود، به همین دلیل هر چه کمتر

پوزیترون ذره‌ای با جرم الکترون و باری مخالف بار الکترون است که در اثر برخورد با الکترون ممکن است نابود شده و دو فوتون تولید شود. پوزیترون کاربردهای فراوانی در صنعت و پزشکی دارد که می‌توان به عکس‌برداری بوسیله‌ی پوزیترون (PET) و یا طیف‌سنجی پوزیترون که در مطالعه‌ی ویژگی‌های سطوح مواد مختلف، ساختار الکترونی و بلوری آن‌ها و به ویژه در مطالعه‌ی نانوذرات اشاره کرد. در این مقاله گزارشی از طراحی اولیه و شبیه‌سازی یک سیستم انتقال پوزیترون با کاربرد در طیف‌سنجی پوزیترونی به روش دوپلری که قرار است با همکاری دانشگاه تهران و دانشگاه سیستان و بلوچستان ساخته شود ارائه می‌گردد.

سیستم‌های انتقال پوزیترون مورد استفاده در طیف‌سنجی پوزیترون را برحسب شیوه‌ی انتقال به الکترواستاتیکی [۱] و یا مغناطیسی [۲] (دو شیوه‌ی مستقیم [۳] و خم [۴]) دسته‌بندی می‌کنند. شیوه‌ی الکترواستاتیکی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵]، اما برای ما کاربردی ندارد زیرا بیشتر برای بررسی زاویه‌ی پرنکندگی استفاده می‌شود [۶].

در اینجا گزارشی از شبیه‌سازی یک سیستم انتقال مغناطیسی خم که ساده‌ترین روش انتقال پوزیترون می‌باشد، توسط نرم‌افزار CST [۷] ارائه می‌شود. از مزایای مهم شیوه‌ی خم این است که ادوات کنترل باریکه در خارج از خلاء قرار دارند. درضمن باریکه خروجی آن برای هدف ما مناسب است.

مبانی نظری سیستم انتقال مغناطیسی خم

سیملوله‌ی مغناطیسی یک راه ساده برای انتقال پوزیترون از کندکننده به ناحیه هدف است. لازم به ذکر است که هدف نسبت به چشمه باید محافظت شود تا پرتوهای پرنانژی که موفق به فرار از کندکننده شده‌اند به هدف برخورد نکنند. برای این منظور می‌توان از یک سیملوله چند تکه استفاده

انحراف دارند اما پیش از انحراف، پیچ‌های اول هم‌محور سیملوله‌ی پنجم و پیچ‌های دوم هم‌محور سیملوله‌ی دوازدهم بوده‌اند.

قطر ۵ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند که هر کدام میدان ۵۰ گوسی در مرکز تولید می‌کنند. سیملوله‌ها هر کدام یک قوس دو درجه‌ای از دایره‌ای به شعاع ۱۵۰ سانتی‌متر را تشکیل می‌دهند.

به منظور جلوگیری از برخورد ذرات پرنرژی با صفحه‌ی هدف، سیستم به صورت خم طراحی شده است. خط پرنشان داده شده در شکل ۱، که از بالاترین نقطه‌ی چشمه شروع می‌شود و مماس بر قسمت پایینی لوله‌ی خم در شکل رسم شده است، امتدادش با سیملوله‌ی سیزدهم برخورد می‌کند. این مطلب نشان می‌دهد که اگر ذره‌ای با انرژی بالا از چشمه به سمت هدف پرتاب شود خم سیستم مانع از برخورد آن به هدف خواهد شد.

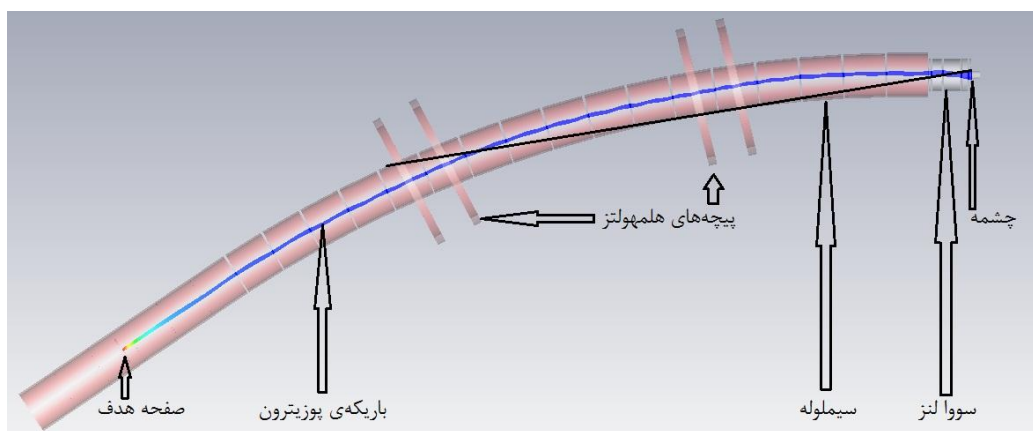
شایان ذکر است برای اطمینان بیشتر از جلوگیری از برخورد ذرات پرنرژی با صفحه‌ی هدف از سیملوله‌ی هجدهم به بعد، سیملوله‌ها مستقیم پشت سرهم چیده می‌شوند.

در شکل ۲ نرخ انتقال برحسب زاویه اولیه پرتاب نشان داده شده است. چنانچه که در شکل نشان داده شده است، نرخ انتقال با افزایش زاویه‌ی پراکندگی به سرعت کاهش می‌یابد.

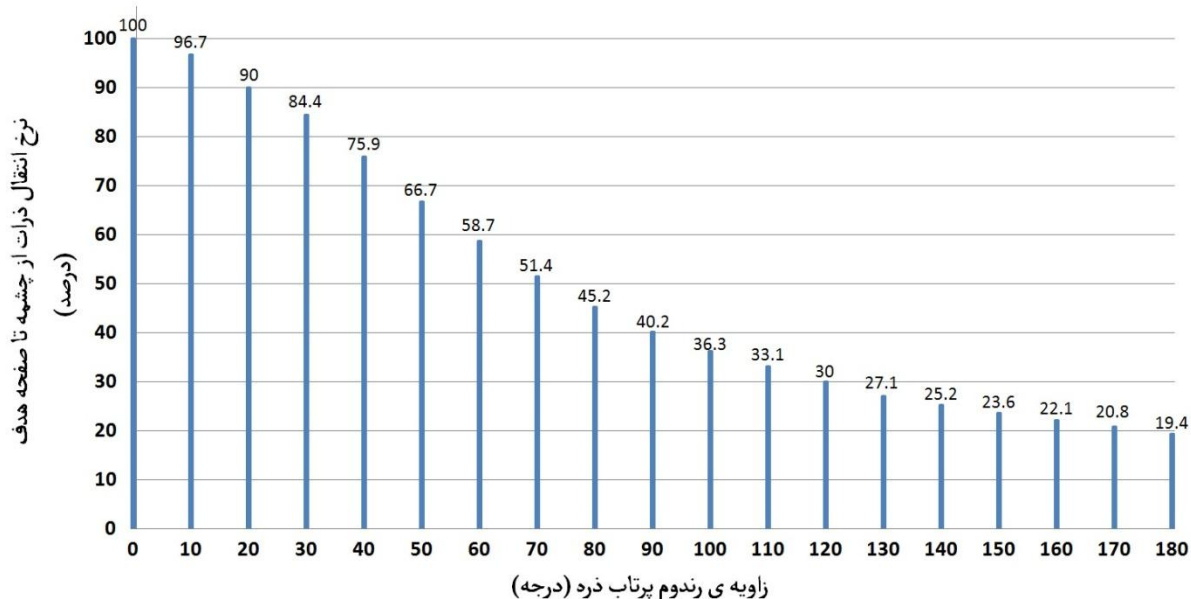
باشد حالت مطلوبتری ایجاد می‌شود و در بهترین حالت صفر است. با توجه به روابط ۱ و ۳ ملاحظه می‌شود که در رابطه‌ی ۱ تمایل برای کاهش میدان مغناطیسی وجود دارد در حالی که در رابطه‌ی ۳ تمایل به افزایش میدان مغناطیسی وجود دارد. در واقع باید به یک مصالحه بر سر مقدار میدان مغناطیسی رسید. از آنجایی که هیچ روش تحلیلی برای دستیابی به مقدار بهینه‌ی میدان مغناطیسی وجود ندارد، این کار به روش آزمون و خطا با شبیه‌سازی انجام می‌شود.

در مورد ب هم تصحیح مسیر باریکه‌ی منحرف شده، بوسیله‌ی حلقه‌های مغناطیسی خارجی یا با استفاده از صفحات الکترواستاتیکی داخلی انجام می‌شود [۱۰].

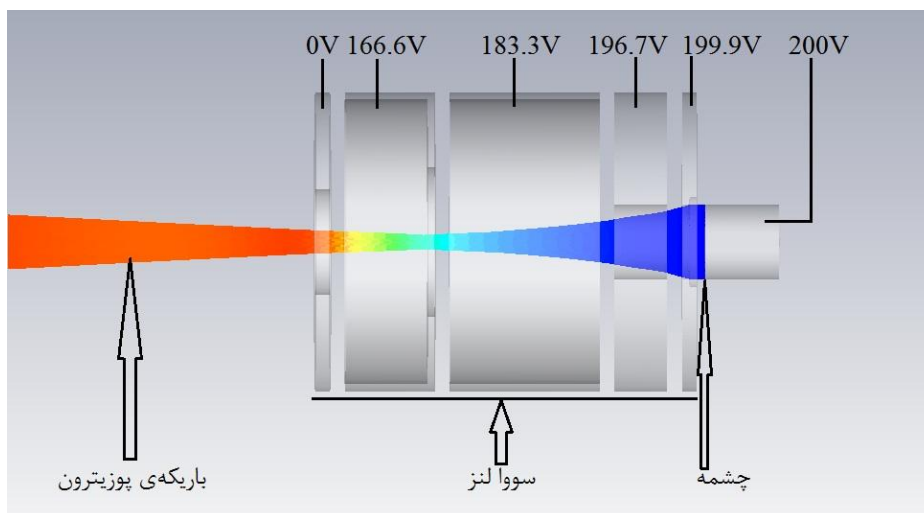
سیستم انتقال مغناطیسی خم طرح کلی از سیستمی که در سال ۱۹۸۹ در ایتالیا طراحی شد، گرفته شده است [۱۱]. طرحواره‌ی سیستم خم در شکل ۱ نشان داده شده است. در این سیستم پس از چشمه یک سووا لنز به منظور متمرکز کردن باریکه قرار گرفته است و سپس ۲۳ لنز مغناطیسی (سیملوله) به دو پیچ‌های هلمهولتز به قطر ۱۵ سانتی‌متر که فاصله‌ی سیم‌پیچ‌های آن‌ها از هم ۵ سانتی‌متر است و میدان ۳۵ گوسی تولید می‌کنند، نیز برای تصحیح مسیر ذره و برخورد باریکه به مرکز صفحه‌ی هدف استفاده شده‌اند که این دو پیچ‌ها نسبت به راستای محور لوله‌ی خم ۶ درجه



شکل ۱. طرحواره‌ی سیستم انتقال مغناطیسی خم



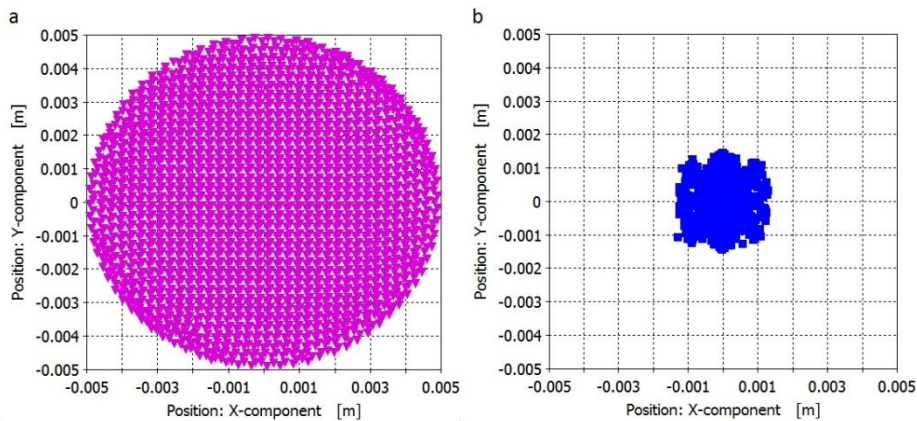
شکل ۲. نرخ انتقال پوزیترون از چشمه به صفحه‌ی هدف برای زوایای مختلف



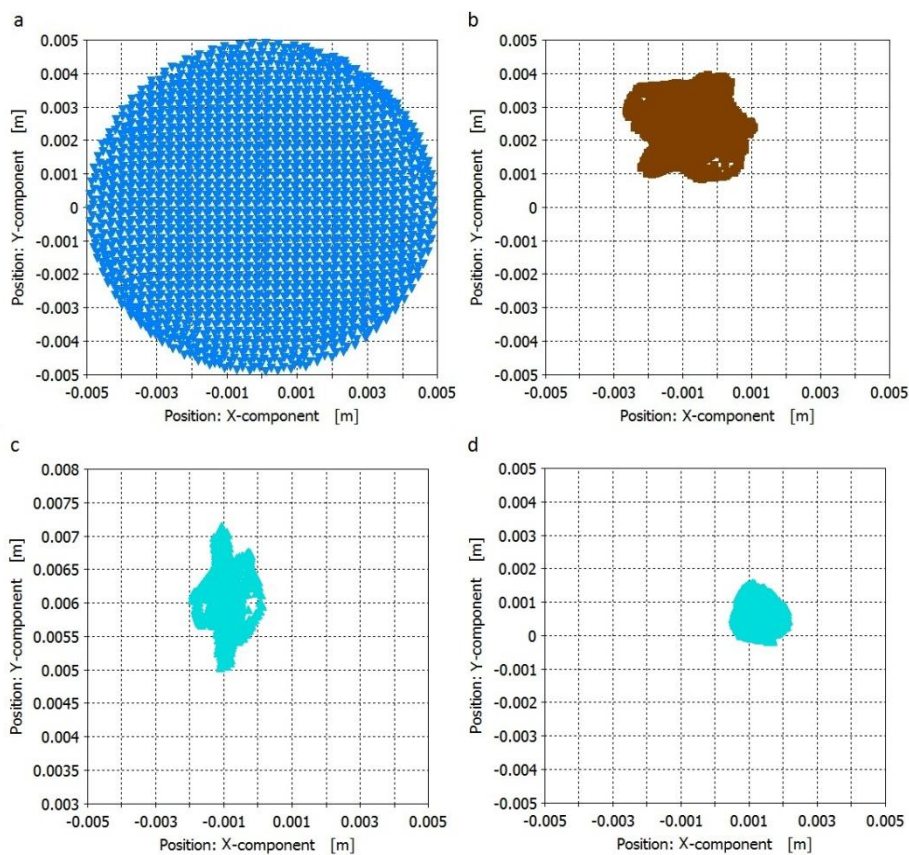
شکل ۳. طرحواره‌ی سووا لنز، پتانسیل هر قسمت لنز در بالای آن ذکر شده است

در شکل ۵ میزان تمرکز باریکه در نقاط مختلف سیستم نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد باریکه در انتها به اندازه‌ی $0/16$ حالت اولیه متمرکز شده است. لازم به ذکر است پیچیده‌های هلمهولتز نیز علاوه بر تمرکز بیشتر باریکه آنرا به اندازه‌ی $0/35$ سانتی‌متر به مرکز صفحه‌ی هدف نزدیکتر کرده است.

سووا لنز بکار رفته در این طرح، یک لنز الکترواستاتیکی است که برای تمرکز بیشتر باریکه استفاده شده است و در سیستم، بعد از چشمه قرار می‌گیرد. طول آن $5/2$ سانتی‌متر و قطر آن 4 سانتی‌متر است که به قسمت‌های مختلف آن پتانسیل‌های متفاوتی، شکل ۳، اعمال شده است و باریکه را به اندازه‌ی $0/3$ حالت اولیه متمرکز می‌کند، شکل ۴. طرح کلی این لنز از مرجع [۱۲] گرفته شده است.



شکل ۴. (a) برش عرضی باریکه‌ی پرتاب شده از چشمه پیش از ورود به لنز (b) برش عرضی باریکه‌ی پرتاب شده از چشمه پس از عبور از لنز



شکل ۴. (a) برش عرضی باریکه‌ی پرتاب شده از چشمه قبل از ورود به سیستم در لحظه‌ی پرتاب (b) پس از عبور از سووا لنز و قبل از ورود به لوله‌ی خم (c) در لحظه‌ی برخورد باریکه با صفحه‌ی هدف زمانی که هیچ میدان مصححی وارد نشده است (d) در لحظه‌ی برخورد باریکه با صفحه‌ی هدف زمانی که میدان‌های مصحح اعمال شوند

الکتریکی ناشی از پتانسیلی که به صفحه‌ی هدف اعمال می‌شود کمی مسیر باریکه تحت تاثیر قرار می‌گیرد. میدان الکتریکی برای پتانسیل‌های مختلف در جلوی یک قرص رسانا در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده

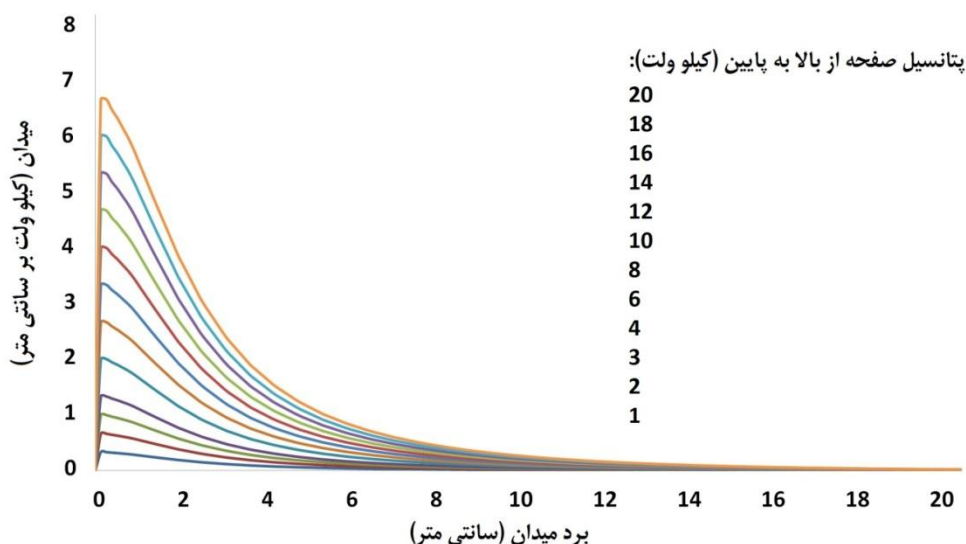
به منظور تغییر انرژی ذرات در فاصله‌ی بین چشمه و صفحه‌ی هدف و به دست آوردن باریکه با انرژی متغیر بین 20eV تا 20keV ، هدف را در پتانسیل‌های متعدد قرار دادیم تا این انرژی به باریکه داده شود. به دلیل وجود میدان

خم، برای انتقال باریکه‌ی پوزیترون انجام گردید. سیستم خم نسبت به سیستم‌های مشابه حجم کمتری دارد، همچنین به دلیل اینکه قطعات کمتری در سیستم خم در داخل خلاء قرار می‌گیرد ایجاد و حفظ خلاء در این سیستم‌ها آسانتر است. از اینرو هزینه‌ی ساخت این سیستم نیز کمتر برآورد می‌شود. سیستم گزارش شده در اینجا قادر است باریکه‌ای در بازه‌ی انرژی ۲۰۰ الکترون‌ولت تا ۲۰ کیلوالکترون‌ولت تولید کند. قطر باریکه در این سیستم برای چشمه‌ای با قطر یک سانتی‌متر به اندازه‌ی ۰/۱۶ سانتی‌متر روی صفحه‌ی هدف است. لازم به ذکر است باریکه در این سیستم، در راستای طول به اندازه‌ی ۱۱۴ سانتی‌متر منتقل می‌شود.

می‌شود برد میدان سریع میرا می‌شود و در بیشترین حالت در حدود ۱۲ سانتی‌متر است. به همین دلیل انتهای مسیر را همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود مستقیم طراحی کردیم تا پتانسیل اعمال شده به صفحه بر مسیر ذرات باردار اثر نگذارد و صفحه‌ی هدف را در فاصله‌ی ۱۴ سانتی‌متری از مرکز سیملوله‌ی هجدهم قرار دادیم.

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد پوزیترون بویژه در مطالعه‌ی نانوذرات و فیزیک سطح، طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم مغناطیسی



شکل ۶. نمودار میدان‌الکتریکی برحسب فاصله در جلوی قرص هدف، برای انرژی‌های متفاوت

منابع

1. C. V. Falub, S. W.H. Eijt, P.E. Mijnaerends, H. Schut, A. van Veen, *Magnetic focusing of an intense slow positron beam for enhanced depth-resolved analysis of thin films and interfaces*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 488 (2002) 478–492.
2. D. T. Britton, K. Uhlmann, G. Kogel; *Magnetic positron optics*, Applied Surface Science, 85(1994)158-164.
3. K. G. Lynn, B. Nielsen, J. H. Quateman; *Development and use of a thin-film transmission positron moderator*, Apply Physics Letters 47(3)(1985) 239-240.
4. E. Gramsch, J. Throwe and K. G. Lyne, *Development of transmission positron moderators* Appl.Phys.Lett, 51(22) (1987) 1862-1864.
5. C. K. Cheung , P. S. Naik , C. D. Beling , S. Fung , H. M. Weng; *Per formance of a slow positron beam using a hybrid lens design*, Applied Surface Science, 252(2006)3132–3137.
6. I. J. Rosenberg, A. H. Weiss, and K. F. Canter; *Low Energy Positron Diffraction from a Cu(III) Surface* Phys. Rev. Lett, 44 (1980) 1139.
۷. صبری. س، شبیه سازی ستون شتابدهنده و لنز همگراکننده برای باریکه‌ی ۱۰۰ کیلو الکترون ولت، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، (۱۳۸۹).

8. S. Chandrasekhar; *Plasma Physics*. Chicago University Press, Chicago, (1975) 24-25.
9. J. D. Jackson; *Classical Electrodynamics*. J. Wiley and Sons, New York, NY. (1965) 415-419.
10. K. F. Canter, A. P. Mills, JR; Slow positron beam design notes, Can. J. Phys, 60 (1983) 551.
11. R. S. Brusa, A. Dupasquier, R. Grisenti, S. Liu, S. Oss and A. Zecca, *Deep disorder in neon-implanted copper single crystals detected by variable-energy positrons*, Journal Physics. Condens. Matter, 1 (1989) 5411-5419.
12. P. Y. Kwan, S. Fung, C. D. Beling, *Submillimeter focusing of the University of Hong Kong positron beam*, Applied Surface Science, 194 (2002) 32-37.