

ترابرد باریکه ذرات داخل شتابدهنده‌ی الکترواستاتیک ۲۰۰ کیلوولت با

استفاده از کد Geant4

محمدجواد خداشناس^{۱*}، زعفر ریازی^۲، داریوش رضایی^۱

۱. دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران-ایران
۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

چکیده:

محاسبه‌ی میدان الکتریکی در ستون شتابدهنده‌ی ذرات و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مسیر حرکت باریکه‌ی ذرات به منظور دستیابی به بیشینه‌ی جریان باریکه روی هدف و کاهش تابش‌های ثانویه‌ی اطراف آن، یکی از مهم‌ترین مسائل در شتابدهنده‌های ذرات است. در این مقاله یک بسته‌ی نرم‌افزاری بر پایه کد Geant4 توسعه داده شده است که به‌طور همزمان محاسبات مربوط به میدان الکتریکی استخراج شده از کامسول و برهم‌کنش‌های هسته‌ای ذرات با الکترودها و فضای داخل ستون شتابدهی را مدل‌سازی می‌کند. توسعه‌ی این بسته‌ی نرم‌افزاری، محاسبات تلفات جریان باریکه و تشعشعات اطراف شتابدهنده را برای طراحی حفاظ به آزمایشات واقعی نزدیک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: شتابدهنده، طراحی حفاظ، تابش ثانویه، کامسول، Geant4

Particle Beam Transport Inside a 200 kV Electrostatic Accelerator Using Geant4 Code

M. J. Khodashenas^{1*}, Z. Riazi², D. Rezaei¹

1. Energy Engineering and Physics Faculty, Amirkabir University of Technology, P.O.BOX: 15875-4413, Tehran-Iran
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, P.O.BOX: 11365-3486, Tehran-Iran

Abstract:

Calculating electric field of an accelerator column and studying beam dynamics in order to changing and optimizing the effective parameters to get the highest beam current on the target and decrease the secondary radiations around the machine is one of the most important things in accelerators studies. In this article, a software package based on Geant4 code is developed which is calculating the extracted electric field from COMSOL and modeling the nuclear interactions between the electrodes and the inner space of the accelerator column. Developing this package is approximating the calculations of beam current losses and radiations around the accelerator to the real experiments for shield design.

Keywords: Accelerators, Shield Design, Secondary Radiation, COMSOL, Geant4.



۱. مقدمه

در شتابدهنده‌های الکترواستاتیک از یک میدان الکتریکی یکنواخت (مستقل از زمان) - که در اثر ایجاد یک اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایانه‌ی ولتاژ بالا و زمین ایجاد می‌شود- برای انرژی دادن به ذرات باردار استفاده می‌گردد. یون‌های مثبت پس از استخراج از مولد یونی رادیوفرکانسی تحت اثر لنزهای الکترواستاتیکی که در ابتدای تیوب شتابدهی قرار دارند بصورت یک باریکه‌ی پیرامحور درآمده و تحت اثر میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. [۱].

شتابدهنده‌ی الکترواستاتیک ۲۰۰ کیلوولتی سازمان انرژی اتمی ایران از یک چشمه‌ی یونی رادیوفرکانسی، الکتروود استخراج‌کننده، الکتروود کانونی‌کننده و ستون شتابدهی شامل ۱۰ الکتروود شیپوری و ۱۴ حلقه‌ی سرامیکی عایق تشکیل شده است. پیش از این، بررسی مسیر باریکه در شتابدهنده و پارامترهای موثر روی آن توسط برنامه‌ی شبیه‌سازی سیمیون^۱ انجام گرفته است [۲،۳].

اگرچه برنامه‌هایی نظیر کامسول و سیمیون و CST برای ردیابی ذره بسیار قدرتمند هستند اما هیچ یک قادر به محاسبه و نمایش همزمان اثر میدان الکتریکی بر روی باریکه و اندرکنش باریکه با محیط و هوای داخل تیوب شتابدهی نیستند [۴]. بنابراین به تنهایی برای مطالعه‌ی واقعی مسیر ذره در داخل شتابدهنده کارآمد نیستند [۵]. در این کار تحقیقی یک بسته‌ی نرم‌افزاری با کمک کامسول و Geant4 توسعه داده شد که امکان ترابرد هسته‌ای ذرات را همزمان با حل معادلات دینامیک آنها در حضور میدان‌های الکترومغناطیسی فراهم می‌سازد. ساختار هندسی پیچیده‌ی شتابدهنده‌ی الکترواستاتیک ۲۰۰ kV به صورت فایل GDML^۲ و توزیع میدان الکتریکی بدست آمده توسط کامسول به صورت فایل متنی وارد کد می‌شود و ذرات خارج شده از چشمه‌ی یونی به سمت هدف شتاب داده می‌شوند. در ادامه روش کار و نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه خواهند شد.

۲. روش کار

شتابدهنده‌ی الکترواستاتیک ۲۰۰ کیلوولتی سازمان انرژی اتمی ایران از الکتروود استخراج‌کننده، الکتروود کانونی‌کننده، الکتروود حفاظ و ستون شتابدهی شامل ۱۰ الکتروود شیپوری و ۱۴ حلقه‌ی سرامیکی عایق تشکیل شده است که طول کل تیوب شتابدهی حدود ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد و جنس تمامی الکتروودها باتوجه به ویژگی‌های الکترومغناطیسی مورد نیاز سیستم و همچنین ملاحظات مربوط به هزینه‌ی ساخت و در دسترس بودن مواد، آلومینیوم در نظر گرفته شده‌است. پس از واردکردن هندسه‌ی طراحی شده در سالیدورکز^۳ به کامسول بصورت فایل STEP^۴، مقادیر مرزی مسئله و پتانسیل‌های مربوط به هر الکتروود باتوجه به بیشینه‌ی

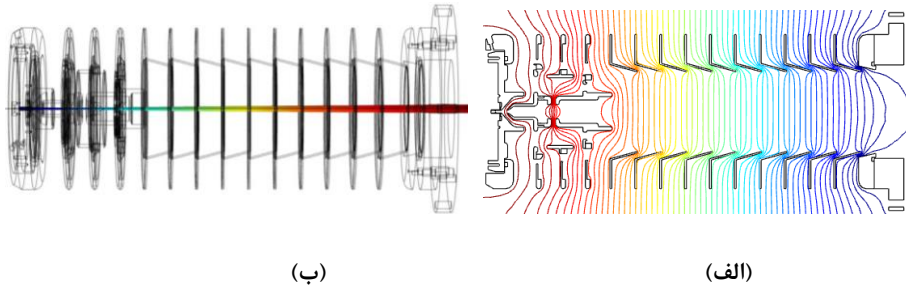
¹ Simion 7.0

² Geometry Description Markup Language

³ SOLIDWORKS

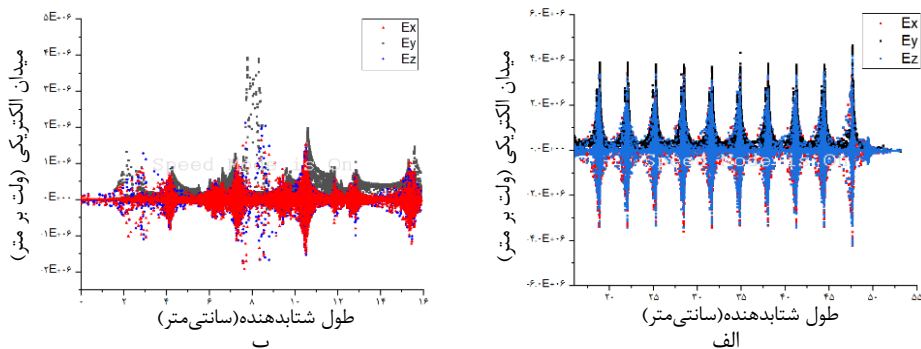
⁴ Standard for the Exchange of Product Model Data

ولتاژ تولیدشده توسط پایانه‌ی ولتاژبالا- که در این پروژه ۱۵۰ کیلوولت در نظر گرفته شده است- اعمال می‌شوند. در شکل ۱ نمایی از ساختار الکترودهای شتابدهنده، توزیع سطوح هم پتانسیل شکل ۱-الف و مسیر باریکه‌ی دوترون با انرژی اولیه‌ی ۲.۵ کیلوالکترون‌ولت و تغییرات انرژی آن در میدان الکتریکی شکل ۱-ب نشان داده شده است.



شکل ۱- الف) ستون شتابدهنده‌ی ۲۰۰ کیلوولتی (ب) مسیر ذره در تیوب شتابدهی در کامسول

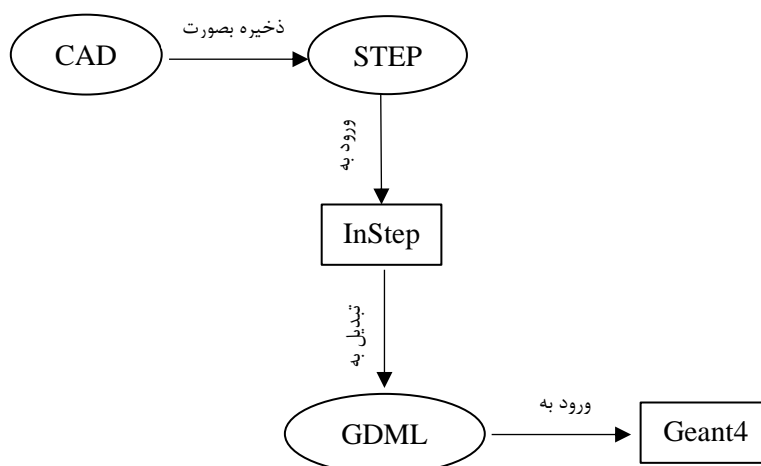
میدان الکتریکی تولید شده در تیوب شتابدهی دارای سه مؤلفه است، که مؤلفه‌ی محوری آن که در این شبیه‌سازی E_y در نظر گرفته شده است سبب شتاب گرفتن ذره و دو مؤلفه‌ی دیگر میدان نیز باعث انحراف باریکه از محور اصلی خود می‌گردند. در شکل ۲ توزیع این میدان‌ها به وضوح قابل مشاهده هستند. در هر دو شکل مؤلفه‌ی محوری با رنگ مشکی و مؤلفه‌های شعاعی E_x و E_z بترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی نمایش داده شده‌اند. در شکل ۲-الف مؤلفه‌ی محوری میدان (E_y) تغییرات و رفتار مشابهی را پس از عبور از هر الکترودهای خود نشان می‌دهد و مقادیر آن در ستون شتابدهی تماماً مثبت هستند، برخلاف دو مؤلفه‌ی دیگر که تقریباً میدانی متقارن نسبت به راستای شتابدهنده ایجاد می‌کنند. چنین رفتاری برای شکل ۲-ب که میدان‌ها را در الکترودهای استخراج کننده، حفاظ و متمرکز کننده نمایش می‌دهد نیز متصور است.



شکل ۲- نحوه‌ی توزیع میدان‌های الکتریکی در طول شتابدهنده

نقاط قرمز و آبی رنگ نمایانگر میدان‌های شعاعی و نقاط مشکی رنگ نمایانگر میدان محوری هستند (الف- توزیع میدان ستون شتابدهی و ب- توزیع میدان الکترودهای استخراج کننده، حفاظ و متمرکز کننده)

اساساً طراحی هندسه و یا ورود آن به هر برنامه و یا کد محاسباتی اولین و مهمترین گام برای حل هر مسئله است، اما از آنجائیکه ورود هندسه با فرمت‌های رایج مربوط به آن مانند CAD⁵ به کد محاسباتی Geant4 ممکن نیست، هندسه‌ی طراحی شده، می‌بایست توسط نرم‌افزارهای واسطه به صورت فرمت قابل پذیرش برای مسئله درآیند. اگرچه کد محاسباتی Geant4 توسط کلاس CADMesh قابلیت ورود مستقیم هندسه با فرمت STL⁶ را داراست اما از آنجائیکه هندسه‌ی وارد شده از این روش خواص فیزیکی و نوع ماده مورد استفاده را نمایش نمی‌دهد برای مسئله مورد نظر ما قابل قبول نیست [۶]. نرم‌افزارهای واسطه‌ی زیادی برای تبدیل هندسه وجود دارند [۷،۸]، پس از آزمون و خطا توسط هر کدام از این برنامه‌ها، بدلیل پیچیدگی هندسه در ابتدای تیوب و الکترودهای متمرکزکننده، خنک‌کننده و حفاظ، برخی از این برنامه‌ها قادر به تبدیل جزئیات نبودند. از اینرو از برنامه‌ی InStep، که برای مدتی محدود روی هر سیستم به صورت رایگان در دسترس است، برای تبدیل فایل به فرمت GDML که قابل خوانش توسط Geant4 است استفاده گردید. شماتیک روند تبدیل هندسه در شکل ۳ نمونه شده است. چنانچه فایل طراحی شده بصورت CAD باشد، در ابتدا باید به فرمت STEP درآمده و سپس فایل ایجاد شده با این فرمت را وارد ابزار تبدیل هندسه می‌شود.



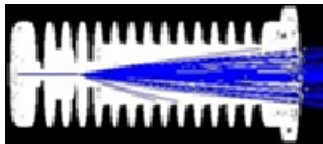
شکل ۳- مراحل تبدیل هندسه به فرمت قابل خوانش برای Geant4

فایل نهایی ایجاد شده در فرایند ذکر شده در شکل ۳ حاوی اطلاعات ارزشمندی همچون جنس و خواص فیزیکی مواد به کار رفته در طراحی هریک از المان‌ها و موقعیت دقیق آن‌ها می‌باشد که این مطلب یکی از ویژگی‌های کلیدی این روش است. باتوجه به اینکه فایل تولیدشده نیز قابلیت ویرایش دستی را داراست، می‌توان با سهولت پارامترها و خواص فیزیکی را بدون ورود دستورات اضافی در Geant4 و پیچیده کردن کد برنامه، بر روی هریک از المان‌ها بطور جداگانه اعمال و نتایج را بررسی نمود.

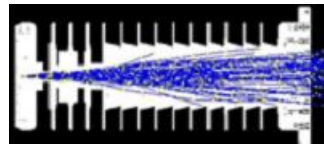
⁵ Computer Aided Design

⁶ Stereo Lithography

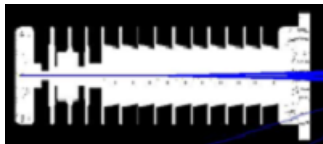
میدان‌های استخراج‌شده از کامسول پس از ویرایش مختصر بصورت یک فایل متنی قابل قرائت برای کد Geant4 درآمده و پس از نوشتن دستورات و استفاده از کتابخانه‌های مورد نیاز برای پردازش آن، همچنین استفاده از فیزیک لیست مرجع QGSP_BIC_EMZ که از فیزیک الکترومغناطیسی انرژی پایین G4EmStandardPhysics_option4 برای مدل‌سازی دقیق‌تر برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی الکترون، فوتون و یون برخوردداراست، ردیابی مسیر یون دوتریوم در میدان‌های الکتریکی و اندرکنش باریکه با مولکول‌های داخل ستون شتابدهی در شرایط مختلف فشار و نوع گاز مورد استفاده، که در ابتدا گاز داخل تیوب، هیدروژن با مقادیر چگالی مختلف و سپس گاز داخل آن به اکسیژن با چگالی یکسانی نسبت به یکی از حالت‌های قبل در نظر گرفته شد، بطور همزمان در شرایط دمایی یکسان (۲۷۳ کلوین) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.



$$\rho_H = 10^{-7} \frac{g}{cm^3} \text{ - ب}$$



$$\rho_H = 10^{-6} \frac{g}{cm^3} \text{ - الف}$$



$$\rho_{O_2} = 10^{-7} \frac{g}{cm^3} \text{ - د}$$



$$\rho_H = 10^{-8} \frac{g}{cm^3} \text{ - ج}$$

شکل ۴- مسیر باریکه و اندرکنش‌های داخل ستون شتابدهنده در Geant4 برای مقادیر متفاوت چگالی و نوع گاز درون تیوب شتابدهی

در شکل ۴- الف تیوب شتابدهی حاوی هیدروژن با چگالی از مرتبه 10^{-6} گرم بر سانتی‌متر مکعب است که خلاء مناسبی برای این گاز به منظور استفاده در این شتابدهنده به شمار نمی‌آید چراکه واکنش‌های یونیزاسیون باریکه با محیط پیرامون خود بسیار زیاد است و سبب ایجاد الکترون ثانویه و همچنین اتلاف باریکه خواهد شد، در شکل ۴- ب چگالی به مرتبه 10^{-7} گرم بر سانتی‌متر مکعب رسید که خلاء به مراتب بهتری نسبت به حالت قبل است ولی در عین حال با توجه به وقوع واکنش‌های یونیزاسیون متفاوت، گزینه‌ی مناسب سیستم نیست و در شکل ۴- ج چگالی از مرتبه 10^{-8} گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است که با توجه به شکل مشخص است که به خلاء ایده‌آل سیستم نزدیک شده‌ایم چراکه هیچ واکنشی درون تیوب شتابدهی رخ نمی‌دهد. شکل ۴- د تیوب شتابدهی حاوی اکسیژن دارای چگالی از مرتبه 10^{-7} گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که همانطور که در شکل نیز مشخص است، هیچ‌گونه واکنش یونیزاسیونی در سیستم رخ نداده است. نقاط زرد رنگ داخل اشکال بیانگر محل وقوع واکنش‌های یونیزاسیون هستند.

۵. نتیجه‌گیری

باتوجه به شکل ۲ تغییرات میدان‌های شعاعی به نحو‌یست که انحراف ذره نسبت به راستای حرکت خود بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

بررسی بعضی از شرایط فیزیکی مختلف در شکل ۴-الف، شکل ۴-ب و شکل ۴-ج نشان می‌دهد تغییرات فشار و چگالی باعث تغییر طول پویش آزاد میانگین یون‌ها داخل ستون شتابدهی می‌شود. بعبارت دیگر، با افزایش چگالی گاز درون تیوب شتابدهی و در نتیجه افزایش فشار آن، واکنش‌های یونیزاسیون داخل ستون افزایش یافته و در نتیجه باریکه پس از انحراف از مسیر اولیه با الکترودهای شتابدهی برخورد کرده و سبب تابش پرتوی ایکس با انرژی‌های مختلف خواهد شد که این مطلب مهم در بحث حفاظ‌سازی شتابدهنده بایستی مورد توجه قرار گیرد. بدیهی است وقوع واکنش‌های متوالی باعث از دست رفتن انرژی باریکه و در نتیجه کمتر شدن جریان باریکه روی هدف خواهد شد.

نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌ی شکل ۴-د و شکل ۴-ب نشان می‌دهد که تغییر گاز درون تیوب شتابدهی با توجه به افزایش جرم مولی و تغییر سایر خواص فیزیکی آن نیز اثر مهمی روی مسیر باریکه دارد. به نظر می‌رسد در شرایط فیزیکی یکسان، خواص اکسیژن که نزدیکترین ماده به هوای معمولی است به نحوی است که در مقایسه با گاز هیدروژن احتمال وقوع واکنش در آن کمتر بوده و می‌توان صرفاً فشار هوای درون تیوب شتابدهنده را تا حد مورد نیاز کاهش داد که این موضوع باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های مورد نیاز برای سیستم خلاء شتابدهنده خواهد شد. بنابراین شرایط خلاء سیستم با توجه به گاز مورد استفاده‌ی درون آن و همچنین ذره‌ی تولیدشده توسط چشمه‌ی یونی تعیین شده و متغیر خواهد بود.

انجام مراحل فوق می‌تواند گام مهمی در طراحی حفاظ برای پرسنل و افراد پرتوکار و همچنین حفاظ‌سازی محیطی که شتابدهنده درون آن قرار دارد باشد. بدیهی است طراحی مناسب حفاظ زمانی است که با کمترین هزینه، بیشترین کارایی را در کاهش تابش‌های رسیده به افراد و محیط پیرامون خود رقم بزند.

۶. مراجع

1. M. Nazmabadi et al. *Optimizing 200kV Electrostatics Accelerator*, Iranian J. of Phy. Research. 15,129(2014) (In Persian)
2. J. Rahighi et al. *Construction of Electrostatic Accelerator with a Maximum Energy of 200keV*, J. of Nuclear Sci. and Tech. 63,81(2013) (In Persian)
3. S. M. Sadati, M.Sc. thesis, Arak University, 1386(In Persian)
4. KARADENİZ, H. *Design, Construction and Results of a Low Energy DC Ion Accelerator*. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(1), 345-352.
5. J. Hunt et al. *3D Tracking Methods in a GEANT4 Environment Through Electrostatic Beamlines*, in 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29-May 4, 2018, 2018, pp. 2979-2982.
6. C. M. Poole et al. *A cad interface for geant4*. Australasian physical & engineering sciences in medicine, 35(3), 329-334.
7. J. E. Bakkali et al. *Visual GDML, an open-source software for building and visualizing Geant4 geometry based on the GDML markup*.
8. S. T. Boogert et al. (2019, May). *Pyg4ometry: A Tool to Create Geometries for Geant4, BDSIM, G4Beamline and FLUKA for Particle Loss and Energy Deposit Studies*. In 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia.