



طراحی اولیه حفاظ برای شتاب‌دهنده صنعتی در حال ساخت با انرژی ۸۰۰ keV

احسان الماسی^۱، غلامرضا رئیس‌علی^{۲*}، فرشاد قاسمی^۳، فریدون عباسی دوانی^۱

۱. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران - ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

۳. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

چکیده:

در یک شتاب‌دهنده صنعتی هنگام برخورد باریکه الکترونی شتاب گرفته به متوقف‌کننده باریکه، تابش ترمزی تولید می‌شود. یکی از مسائل مهم در استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترونی حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده به منظور جلوگیری از آثار مخاطره آمیز ناشی از آن است. در کار حاضر با استفاده از کد MCNPX طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی ناشی از برخورد باریکه الکترونی با انرژی ۸۰۰ keV و جریان ۵۰ mA به متوقف‌کننده باریکه به دست آمد و جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها از داده‌های نظری و برنامه ESTAR استفاده شد. همچنین بر مبنای نتایج شبیه‌سازی ضخامت سرب لازم جهت کاهش آهنگ دز تا حد آهنگ دز زمینه ۰/۱ میکروسیورت بر ساعت برابر، ۲۲ سانتی‌متر به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده صنعتی، متوقف‌کننده باریکه، تابش ترمزی، MCNPX، حفاظ

Preliminary Shield Design for an Under-Construction 800 keV Industrial Accelerator

Almasi, Ehsan¹; Raisali, Gholamreza^{2*}; Ghasemi, Farshad³; Abbasi-Davani, Fereydoon¹

1. Radiation Application Department, College of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, 1983969411, Tehran, Iran.

2. Radiation Applications Research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran

3. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran

Abstract:

In an industrial dynamitron accelerator bremsstrahlung radiation is generated when accelerated electron beam hits the beam dump. One of the most important issues in using electron accelerators is the shielding of the accelerator in order to prevent its dangerous effects. In the present work, using MCNPX code, energy spectrum and angular distribution of bremsstrahlung radiation due to the collision of the 800 keV and 50 mA electron beam with an aluminium beam dump were obtained and theoretical data and ESTAR program were used to validate the simulations. Then, based on the simulation results, the thickness of the lead shield required to reduce the dose rate to the background level of 0.1 micro Sievert per hour has been obtained as 22 centimetres.

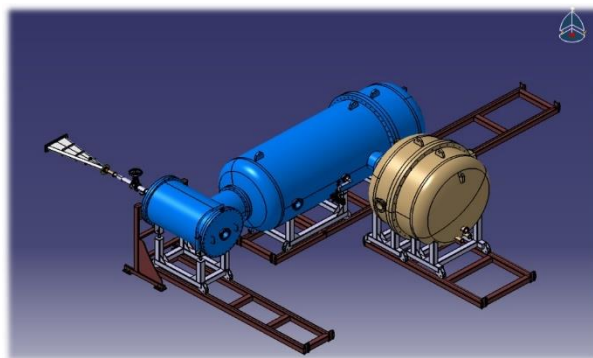
Keywords: Industrial Accelerator, Beam Dump, Bremsstrahlung, MCNPX, Shielding

Email: graisali@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

در استفاده از شتاب‌دهنده‌های ذرات باید توجه بسیاری به استانداردهای حفاظت در برابر پرتو داشت. امروزه شتاب‌دهنده‌های الکترونی با انرژی متوسط جهت اصلاح پلیمرها، استریلیزاسیون محصولات و تجهیزات پزشکی و بهداشتی، پرتو دهی مواد غذایی و افزایش مدت ماندگاری، پرتو دهی در صنایع کشاورزی و بسیاری از کاربردهای دیگر در صنعت به کار گرفته می‌شوند [۱ و ۲]. با توجه به کاربردهای ذکر شده و کمبود سیستم های پرتو دهی در کشور و نیاز روزافزون کشور به سامانه‌های پرتو دهی، ساخت یک شتاب‌دهنده الکترونی با انرژی متوسط مورد توجه قرار گرفته و در این راستا طی چندسال اخیر به ساخت شتاب‌دهنده صنعتی با انرژی ۸۰۰ keV و توان ۴۰ kW پرداخته شده است [۳]. به طور کلی یک شتاب‌دهنده صنعتی شامل بخش‌های مختلفی مانند ستون افزایشنده، تیوب شتاب‌دهی، بخش انتقال باریکه و حفاظ است. بخش انتقال باریکه، خود از قسمت‌های متفاوتی شامل مغناطیس^۱ اسکن کننده، مغناطیس متمرکز کننده، پمپ خلأ، هورن، سیستم خنک کننده و متوقف کننده باریکه^۲ می‌باشد. در این شتاب‌دهنده باریکه الکترونی شتاب گرفته در انتهای مسیر وارد یک مغناطیس جاروب کننده می‌شود، که این مغناطیس باریکه را با فرکانسی مشخص در راستای افقی جاروب می‌کند. در نهایت باریکه الکترونی جاروب شده از پنجره خروجی هورن عبور کرده و به هدف در حال حرکت یا متوقف کننده باریکه برخورد می‌کند [۳]. در شکل ۱ طرحواره‌ای از شتاب‌دهنده صنعتی در حال ساخت آورده شده است.

باریکه الکترونی با برخورد به هدف و متوقف کننده باریکه، براساس تولید تابش ترمزی یا براساس یونش و برانگیزش اتمی با تولید الکترون‌های برگشتی، الکترون‌های ثانویه و گسیل پرتو ایکس، انرژی خود را از دست می‌دهد. اصولاً بخش اعظم و اصلی پرتو ایکس با برخورد باریکه به متوقف کننده باریکه (که معمولاً از جنس آلومینیوم است) تولید می‌شود، پرتو ایکس تولیدی در همه جهات گسیل می‌شود. بنابراین ایجاد حفاظ در برابر تابش‌های ایکس، امری اجتناب ناپذیر است [۴]. با توجه به پارامترهای باریکه شتاب‌دهنده (نوع ذره، انرژی و شدت آن) و حد دز قابل قبول در بیرون از حفاظ، جنس و ضخامت حفاظ تعیین می‌شود. به هنگام طراحی حفاظ می‌توان نواحی را که (مانند بخش پشتی متوقف کننده باریکه) شدت پرتو ایکس گسیلی در آنها بسیار بالاست، که نیاز به حفاظ با ضخامت بیشتری دارد به صورت جداگانه بررسی کرد [۵].



شکل ۱. طرحواره شتاب‌دهنده صنعتی در حال ساخت.

در این کار با استفاده از کد MCNPX طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای پرتوهای ایکس تولید شده به دست آمد. سپس جهت اطمینان

^۱ Coil

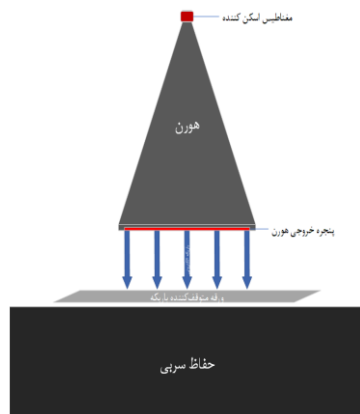
^۲ Beam Dump

حاصل کردن از درستی داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از روابط نظری و داده‌های موجود، مقدار افت انرژی ناشی از تابش ترمزی و نسبت آن با افت انرژی ناشی از یونش و برانگیزش محاسبه شد و با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین شبیه‌سازی حفاظ شتاب‌دهنده انجام شد و ضخامت حفاظ به‌دست آمد.

۲. روش کار

در این مقاله با استفاده از کد MCNPX، که بر اساس روش مونت کارلو برای تراپرد ذرات مختلف از جمله الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]، شبیه‌سازی طیف انرژی تابش ترمزی، توزیع زاویه‌ای، توان توقف تابشی، توان توقف برخوردی، آهنگ دز پرتوایکس تابش ترمزی در عمق‌های مختلف حفاظ و حفاظ شتاب‌دهنده صنعتی انجام شده است. همانطور که گفته شد باریکه الکترونی شتاب گرفته با عبور از یک مغناطیس جاروب کننده، در راستای محور افقی روبش شده و باریکه به صورت پهن شده به متوقف‌کننده باریکه برخورد می‌کند. بنابراین در این پژوهش جهت شبیه‌سازی باریکه خروجی از هورن، چشمه‌ای به شکل مستطیل با ابعاد پنجره خروجی هورن برابر $40 \times 2 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شد که به‌طور مستقیم در راستای محور Z تابش‌دهی می‌کند. در فاصله تقریبی 50 cm از چشمه متوقف‌کننده باریکه که ورقه‌ای از جنس آلومینیوم با ضخامت 3 mm و ابعاد $100 \times 30 \text{ cm}^2$ شبیه‌سازی شد. ضخامت ورقه آلومینیوم برابر با برد الکترون‌های با انرژی 800 keV در نظر گرفته شده است، به‌طوری که الکترون‌ها نتوانند از آن عبور کنند. هندسه پیشنهادی در شکل ۲ قابل مشاهده است.

با استفاده از کد MCNPX، طیف انرژی تابش ترمزی تولیدی از برخورد باریکه الکترونی با انرژی و جریان ثابت 800 keV و mA



شکل ۲. طرحواره‌ای از هندسه پیشنهادی.

50 به ورقه آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفت. از تالی $f2$ مقدار شار سطحی بر روی سطح یک کره در نظر گرفته شده در اطراف هندسه برحسب cm^{-2} به‌دست آمد. همچنین توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی با استفاده از تالی $f1$ و کارت C1 به‌دست آمد. در این کار جهت اعتبارسنجی و اطمینان از درستی داده‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی، با استفاده از کد MCNPX توان توقف برخوردی و توان توقف تابشی ناشی از اندرکنش باریکه الکترونی با ورقه آلومینیومی تعیین شد. با محاسبه نسبت توان توقف تابشی به توان توقف برخوردی، می‌توان کسری از انرژی باریکه الکترونی که به صورت تابش ترمزی نمایان شده را به دست آورد. کسری از انرژی الکترون‌های تک انرژی که به صورت فوتون تابش ترمزی ظاهر می‌شود، از رابطه 1 که Z عدد اتمی محیط، T انرژی جنبشی الکترون بر حسب MeV است [۷].

$$f = 1 \times 10^{-3} ZT \quad (1)$$

علاوه بر این مقادیر توان توقف برخوردی و توان توقف تابشی الکترون با انرژی 800 keV در آلومینیوم با استفاده از برنامه ESTAR،

که برنامه‌ای براساس پایگاه داده‌ها NIST است مورد تایید ICRU نیز می‌باشد، به دست آمد و کسر فوتون تابش ترمزی نمایان شده محاسبه شد [۸]. درصد انحراف داده‌های شبیه‌سازی و نظری محاسبه شد کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. دلیل اختلاف داده‌ها را می‌توان تقریبی بودن رابطه ۱ و فیزیکی که کد MCNPX در ترابرد ذرات الکترون و فوتون، برای اندرکنش ذرات با ماده و تولید ذرات ثانویه در نظر می‌گیرد دانست. همچنین نمودارهای به‌دست آمده برای طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی با کار سایرین مقایسه شد [۹، ۱۰].

اساساً در کدهایی مانند MCNPX که براساس روش مونت کارلو به ترابرد ذرات می‌پردازند، به منظور کاهش خطای ناشی از محاسبات روش‌های متفاوتی ارائه شده است [۱۱]. در تعیین ضخامت مناسب حفاظ از روش کاهش واریانس رولت روسی و انشقاق^۳ استفاده شده که در این روش هندسه حفاظ به ضخامت‌های مناسب تقسیم‌بندی شده و اهمیت ذرات افزایش داده می‌شود تا خطای آماری کمتری در مدت زمان مناسب‌تر حاصل شود. به این منظور مقدار حداکثر ضخامت حفاظ برابر با ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که به لایه‌های ۱ سانتی‌متری تقسیم شد و اهمیت لایه‌ها در جهت عمق نفوذ پرتو افزایش داده شد. سپس با محاسبه تالی f4 (مقدار شار حجمی) در لایه‌های تقسیم شده و استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز آهنگ دز فوتون‌های تابش ترمزی ناشی از برخورد باریکه الکترونی به ورقه آلومینیومی، در عمق‌های مختلف سرب به دست آمد.

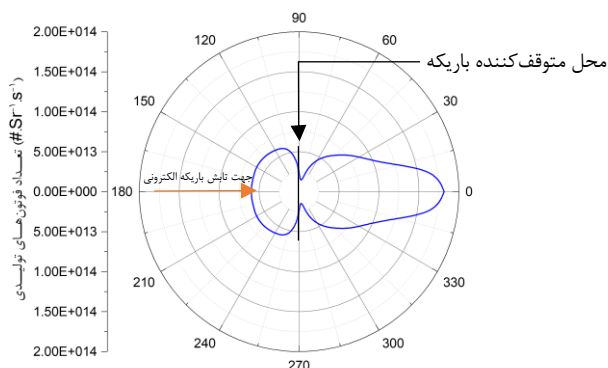
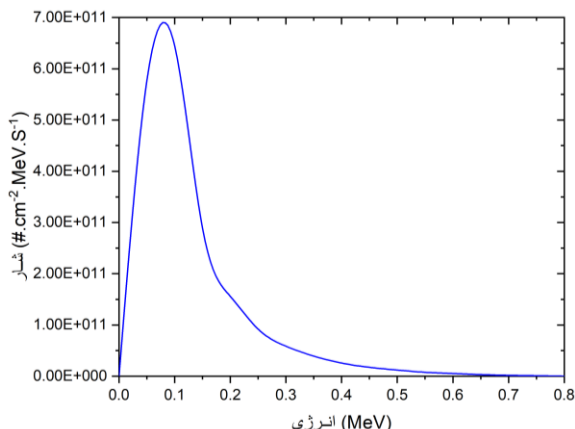
۳. نتایج

طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی تولیدی:

با استفاده از کد MCNPX برای الکترون با انرژی ۸۰۰ keV، طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی تولیدی ناشی از برخورد الکترون و اندرکنش آن با ورقه آلومینیومی (با خطای کمتر از ۵٪) به دست آمد سپس مقادیر برای باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA به‌نجار شد. با استفاده از رابطه $I = \frac{ne}{t}$ ، تعداد الکترون‌های عبوری در هر ثانیه به ازای جریان ۵۰ mA برابر $3/12 \times 10^{17}$ می‌باشد. با ضرب این عدد در مقادیر به دست آمده از تالی f2 طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی برای باریکه الکترونی با جریان ۵۰ mA محاسبه می‌شود. در کل ۳ نمودار طیف انرژی و نمودار قطبی توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی به‌دست آمده، آورده شده است

در نمودار طیف انرژی تابش ترمزی دیده می‌شود که مقدار شار فوتون‌های کم انرژی بسیار بیشتر است، اما این فوتون‌ها از آنجا که کم انرژی هستند با حفاظی کم ضخامت از طیف حذف می‌شوند و بخش انتهایی که مقدار شار آن کمتر است باقی می‌ماند و نیاز به حفاظی با ضخامت بیشتر دارد. از نمودار توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی، می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین مقدار توزیع تابش ترمزی در زوایای مربوط به پشت متوقف‌کننده باریکه می‌باشد، لذا در این نواحی نیاز به حفاظ با ضخامت بیشتری است. با توجه به این موضوع در این مقاله ضخامت حفاظ در نواحی پشت متوقف‌کننده باریکه به‌دست می‌آید و به دنبال آن می‌توان ضخامت حفاظ را در زوایای دیگر برابر با ضخامت حفاظ در پشت متوقف‌کننده باریکه در نظر گرفت.

^۳ Russian Roulette and Splitting



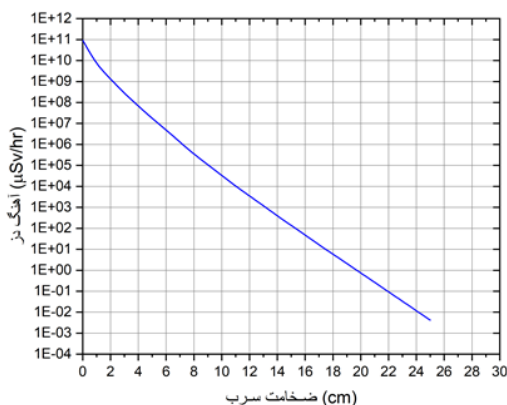
شکل ۳. بالا) نمودار طیف انرژی تابش ترمزی تولید شده از برخورد باریکه الکترونی با انرژی ۸۰۰ keV و جریان ۵۰ mA به ورقه آلومینیومی. پایین) نمودار قطبی توزیع زاویه‌ای آن.

آهنگ دز پرتوایکس تابش ترمزی و تعیین ضخامت حفاظ:

اساساً جهت حفاظ‌گذاری در برابر پرتوایکس بهتر است از موادی با عدد اتمی بالا مانند سرب استفاده شود [۱۲]. در کار حاضر از سرب به عنوان ماده حفاظ استفاده شد. برای تعیین ضخامت مناسب حفاظ، کاهش آهنگ دز پشت حفاظ به میزان $0.1 \mu\text{Sv/hr}$ (آهنگ دز زمینه) در نظر گرفته شد [۱۳]. بدین ترتیب با به کارگیری کد MCNPX و ضرایب تبدیل شار به دز در آن [۱۴] و با بهنجار نمودن مقادیر به دست آمده برای جریان ۵۰ mA، آهنگ دز فوتون‌های تابش ترمزی ناشی از برخورد باریکه الکترونی ۸۰۰ keV با جریان ثابت ۵۰ mA به ورقه آلومینیومی، در عمق‌های مختلف سرب (با خطای کمتر از ۵٪) به دست آمد. نمودار حاصل از محاسبه آهنگ دز فوتون در ضخامت‌های مختلف در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. نمودار روند کاهش آهنگ دز را در ضخامت‌های مختلف حفاظ در نتیجه تضعیف پرتوها نشان می‌دهد. همانطور که از نتیجه شبیه‌سازی برمی‌آید، سرب به ضخامت ۲۲ سانتی‌متر برای کاهش آهنگ دز تا حد آهنگ دز زمینه $0.1 \mu\text{Sv/hr}$ کافی خواهد بود. همچنین مقدار لایه یک‌دهم کننده^۴ (TVL) برابر ۲ سانتی‌متر

^۴ Tenth Value Layer

به دست آمد.



شکل ۴. نمودار آهنگ دز فوتون‌های تابش ترمزی تولیدی برحسب ضخامت سرب.

۴. نتیجه‌گیری

در این کار برای شتاب‌دهنده صنعتی الکترونی در حال ساخت با استفاده از کد MCNPX، ابتدا طیف انرژی و توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی تولیدی از برخورد باریکه الکترونی به متوقف‌کننده باریکه به دست آمد. نتایج حاکی از آن بود که در قسمت پشت متوقف‌کننده باریکه نیاز به حفاظ با ضخامت بیشتری است و با توجه به آن ضخامت حفاظ این قسمت محاسبه شد. جنس حفاظ سرب در نظر گرفته شد و ضخامت حفاظ مورد نیاز در پشت متوقف‌کننده باریکه برابر ۲۲ سانتی‌متر به دست آمد.

مراجع

1. R Hellborg, *Electrostatic Accelerators: Fundamentals and Applications*, (Springer, 2005).
2. M.R. Cleland, *Industrial Applications of Electron Accelerators, Ion Beam Applications*, Edgewood, NY 11717, USA (2006)
3. Mohammad Nazari, *Elementary Design of an Electrostatic Accelerator from Dynamitron type*, Shahid Beheshti University (2017)
4. Masafurni OCHI, *Low Voltage electron beam Accelerators*, Iwasaki Electric Co., Ltd, JAERI-Conf (2002)
5. Sayed H. Rokni et al. *Radiation Shielding at High-Energy Electron and Proton Accelerators*, Proceedings of the Health Physics Society (2008)
6. D.B. Pelowitz, *MCNPX USER'S MANUAL (Version 2.6.0, April 2008. LA-CP-07-1473)*
7. H. Cember, *Introduction to health physics, fourth edition*, McGraw-Hill medical
8. M.J. Berger et al. *ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (July 2017)*
9. Figueroa Saavedra R. et al. *Main Features for a New Radiotherapy Device Based on a Single Convergent Beam of Photons (RTHC)*, Rev. latinoam. fís. méd. (2015)
10. Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement, Forth Edition (WILEY, 2010)*
11. J.K. Shultis and R.E. Faw, *An MCNP primer*, (2006)
12. J.K. Shultis and R.E. Faw, *radiation shielding*, American nuclear society
13. International Atomic Energy Agency, *Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*, 1992.
14. ICRU and ICRP Draft Joint Report Operational Quantities for External Radiation Exposure, ICRP 103