

شبیه‌سازی تیوب اشعه ایکس پرتو دهی پیوسته سرامیکی با کد MCNP

محمدرضا قهرمانی^{۱*} و توکل توحیدی^۱

^۱مجمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.

^{*}تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، گروه پرتو فزآوری و دزیمتری، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۵۹۳۳.

پست الکترونیکی: mhghahramani@aeoi.org.ir

چکیده

پرتوهای یونیزان در طیف وسیعی از زمینه‌ها از جمله پزشکی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. اثر تابش یونیزان با دُز پایین در حشرات و گیاهان در محدوده دُزهای ۱ میلی‌گری تا ۱۰ گری توسط بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت انجام کارهای تحقیقاتی در دُز پایین نیاز به تیوب اشعه ایکس جهت تولید اشعه ایکس به عنوان جایگزین خوب برای اشعه گاما است. بنابراین مطالعه و ساخت تیوب اشعه ایکس از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه به شبیه‌سازی تیوب اشعه ایکس پرتو دهی پیوسته از نوع سرامیکی با آند مولیبدنی در ۲ ضخامت مختلف در زاویه ۲۰ درجه پرداخته شده است. از این تیوب جهت پرتو دهی نمونه‌ها در محدوده چند میلی‌گری می‌توان استفاده کرد. بر خلاف تیوب‌های تصویربرداری که در آن سعی می‌شود قطر فوکوس بیم الکترونی کمترین باشد (جهت بالا بردن وضوح تصویر) در این تیوب بیم الکترونی به صورت پهن و به قطر ۳ cm انتخاب شد تا خنک‌کاری حرارت ایجاد شده در آند آسان‌تر باشد. طیف انرژی و دُز در پارامترهای مختلف توسط کد MCNPX شبیه‌سازی و مقایسه گردید.

کلیدواژگان: تیوب اشعه ایکس، پرتو دهی پیوسته، تیوب سرامیکی، کاتد تنگستن، آند مولیبدن، MCNP.

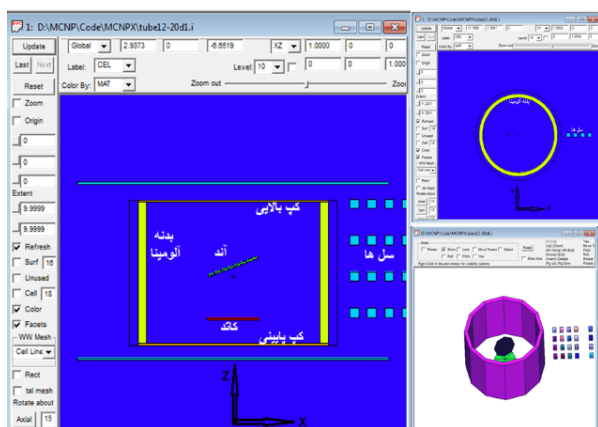
۱. مقدمه

تیوب اشعه ایکس از سیستم الکترونیکی و برای آشکارسازی اشعه ایکس از سیستم تشخیصی استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی در طراحی و شبیه‌سازی تیوب اشعه ایکس شامل نوع و شکل کاتد، جریان، شعاع باریکه، نوع و شکل آند، جریان و ولتاژ آند و سیستم انتقال حرارت هستند. به دلیل پرهزینه بودن ساخت تیوب اشعه ایکس استفاده از نرم‌افزار برای شبیه‌سازی و بررسی عملکرد آن قبل از ساخت متداول شده است.

تیوب اشعه ایکس به طور کلی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است که شامل کاتد، آند و سیستم خنک‌کننده است. همچنین تیوب شامل محفظه محافظ است که این محفظه دربردارنده کاتد، آند و عدسی‌های الکترونی است و داخل آن خلأ است. خلأ بالا برای دستیابی به کارکرد بهینه ضروری است. سیستم خلأ شامل پمپ‌های خلأ به صورت سری یا موازی جهت تأمین خلأ، مورد نیاز است. علاوه بر این‌ها برای ولتاژ تغذیه و کنترل

به ضخامت گوشته ۵ mm و به شعاع ۵۵ mm که از جنس آلومینا (Al_2O_3) و به ارتفاع ۸۰ mm طراحی شده است. درپوش بالایی و پایینی یک دیسک فلزی از جنس مس به ضخامت ۱ mm و به شعاع ۵۵ mm بود. فاصله آند - کاتد نیز ۳۵ mm است.

همچنین با تغییر پارامترهای لازم از جمله: تغییر ضخامت بدنه تیوب (ضخامت آلومینا)، تغییر جنس آند، تغییر ضخامت آند، تغییر شعاع آند جهت شبیه‌سازی سلول‌هایی با ابعاد $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ در جهت محور Xها و در فواصل ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۲۰ سانتی‌متر ایجاد گردید و برنامه دوباره اجرا گردید. جنس سلول‌ها آب در نظر گرفته شده و در ارتفاع‌های مختلف از محور Z در فواصل ۲-، ۰، ۲ و ۴ سانتی‌متر از مرکز استوانه تیوب در نظر گرفته شد. همچنین از یک عدد سیلندر توخالی با ابعاد مناسب که به پتانسیل صفر وصل شده و اطراف کاتد است، به‌عنوان تنظیم قطر بیم الکترونی استفاده شده است. از یک عدد درپوش توخالی نیز در آند خنک کاری شده با آب، استفاده شده است و با توجه به‌عنوان پژوهش، در این گزارش آورده نشده است.



شکل (۱): تصویر تیوب اشعه ایکس بر اساس نرم افزار MCNPX.

نرم‌افزارها بر اساس حل عددی معادلات الکترومغناطیس در محیط تیوب اشعه ایکس عمل می‌کنند. یکی از مناسب‌ترین نرم‌افزارهای موجود برای شبیه‌سازی، نرم‌افزار MCNPX است که در این مقاله از این کد استفاده شده است. در شبیه‌سازی هسته‌ای بایستی از روش‌های کاهش واریانس برای کم کردن زمان اجرای برنامه استفاده کرد. این روش‌ها عبارت‌اند از: تقسیم‌بندی حفاظ به سلول‌های کوچک، دادن imp مناسب به هر یک از سلول‌ها، تبدیل imp سلول‌ها به weight window با استفاده از کارت‌های wwp و wwg، Cut انرژی‌های کمتر از ۰/۰۱ در صورت نیاز (کم‌نشدن خطای برنامه)، تولید new weight window با استفاده از کارت‌های wwg و wwge در صورت نیاز و استفاده از برخورد اجباری در صورت نیاز. شبیه‌سازی هسته‌ای (MCNP) اشعه ایکس ساطع شده با استفاده از داده‌های بالا انجام شده است.

۲. نحوه شبیه‌سازی

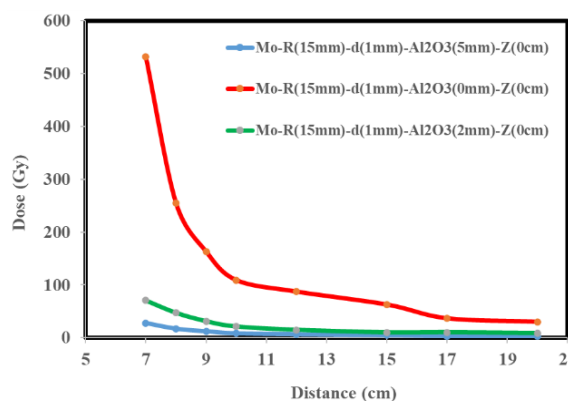
مطابق شکل ۱ تیوب اشعه ایکس با مشخصات زیر طراحی و محاسبات MCNP بر اساس این مشخصات به مدت ۲۵۰۰ دقیقه اجرا گردید. برای مقادیر کمتر از ۲۵۰۰ دقیقه، مقدار خطا غیر قابل قبول و برای مقادیر بیشتر از ۲۵۰۰ دقیقه، مقدار خطا تغییرات کمی داشت. در این اجرا انرژی ذرات برابر ۱۰۰ keV است. این انرژی بر اساس پیش‌فرض وجود منبع ولتاژ بالای ۱۰۰ کیلوولتی انتخاب شده است. ذره پرتابی از کاتد به سمت آند الکترون است.

مشخصات تیوب شبیه‌سازی شده به‌صورت زیر است: کاتد مورد استفاده یک دیسک فلزی از جنس تنگستن به ضخامت ۱ mm و به شعاع ۱۵ mm بود. آند یک دیسک فلزی از جنس مولیبدن به ضخامت ۱ mm و به شعاع ۱۵ mm بود که با زاویه 20° در جهت صفحه‌ی XY مطابق شکل ۱ مقابل کاتد قرار گرفته است. بدنه تیوب عبارت بود از یک تیوب استوانه‌ای عایق

۳. بحث و نتایج

۳.۱. تغییر ضخامت بدنه تیوب (ضخامت آلومینا)

شکل ۲ منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات ضخامت بدنه تیوب (ضخامت آلومینا) برای مقادیر ۰ (یعنی بدون آلومینا)، ۲ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. نمودارها در فواصل مختلف Z نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است با کاهش ضخامت آلومینا، میزان دز جذبی افزایش یافته به‌طوری که در فواصل یکسان، با کاهش ضخامت آلومینا از ۵ mm به ۲ mm میزان دز جذبی به اندازه تقریباً ۲ برابر افزایش پیدا می‌کند.



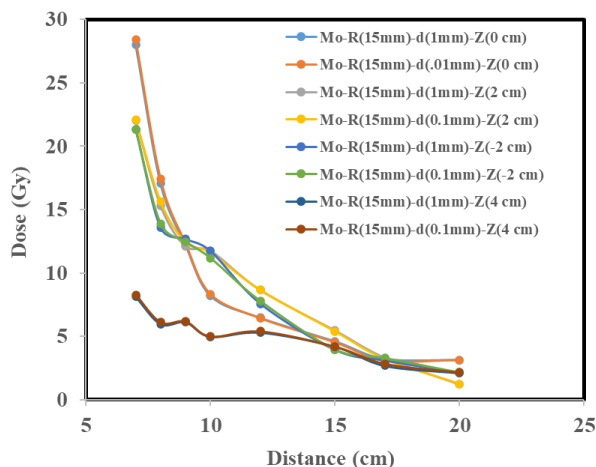
شکل (۲): منحنی تغییرات دز بر اساس تغییرات ضخامت بدنه تیوب.

۳.۳. تغییر ضخامت آند

شکل ۳ منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات ضخامت آند با شعاع ۱۵ mm برای مقادیر ضخامت ۰/۱ mm و ۱ mm را نشان می‌دهد. نمودارها در فواصل مختلف Z نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش ضخامت آند، هیچ‌گونه تغییری در میزان دز جذبی حاصل نمی‌گردد. یعنی در عمل می‌توان از هر ضخامت آند استفاده کرده و بر اساس قطعه موجود در بازار برنامه‌ریزی کرد.

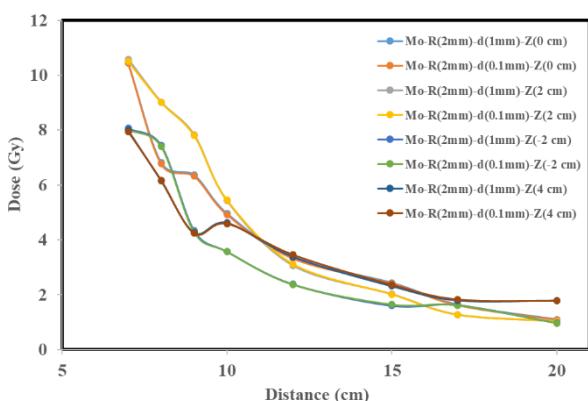
شکل ۴ منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات ضخامت آند با شعاع ۲ mm برای مقادیر ضخامت ۰/۱ mm و ۱ mm را نشان می‌دهد. نمودارها در فواصل مختلف Z نشان داده شده

است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است در این شعاع هم با افزایش ضخامت آند، میزان دز جذبی ثابت می‌ماند.



شکل (۳): منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات ضخامت آند برای

شعاع ۱۵ mm آند.

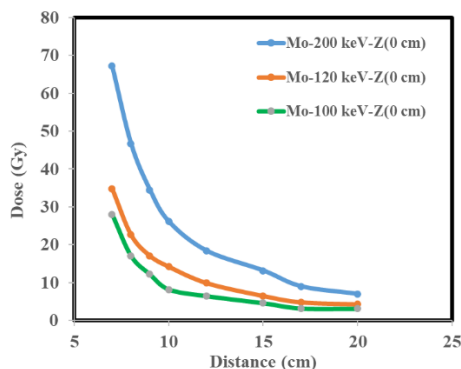


شکل (۴): منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات ضخامت آند برای

شعاع ۲ mm آند.

شکل ۵ منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات شعاع آند برای مقادیر ضخامت شعاع ۲ mm و ۱۵ mm را نشان می‌دهد. نمودارها در $Z = 0$ نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش شعاع آند، میزان دز جذبی در فواصل نزدیک به آند، افزایش پیدا می‌کند ولی با دور شدن از آند، رفتار آند مثل یک چشمه نقطه‌ای شده و بنابراین میزان دز جذبی مانند هم می‌شود. یعنی در پرتو دهی، مقدار دز جذبی مستقل از شعاع آند است و بنابراین مقدار دقیق فوکوس الکترونی در این جا مهم نیست.

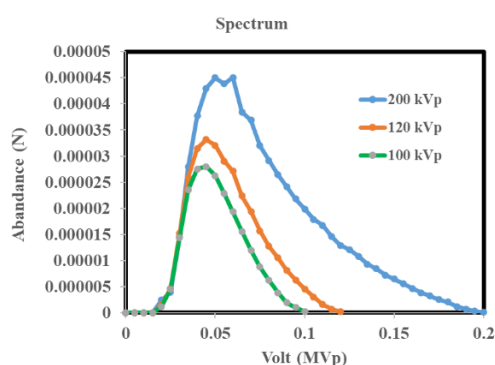
۱۲۰ keV و ۲۰۰ keV را نشان می‌دهد. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش ولتاژ بین کاتد و آند میزان دز جذبی نیز افزایش یافته به طوری که با افزایش ولتاژ از ۱۰۰ keV به ۲۰۰ keV میزان دز دریافتی نیز تقریباً بیش از ۲ برابر افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۷): منحنی تغییرات دز بر اساس تغییرات فاصله و برای سه ولتاژ اعمال شده بین کاتد و آند.

۳.۴.۳. تغییرات شار نسبت به تغییرات ولتاژ

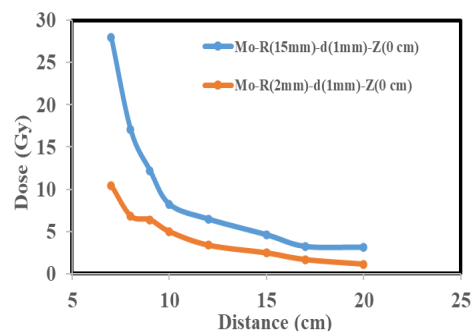
شکل ۸ طیف تغییرات شار اشعه ایکس را بر اساس تغییرات ولتاژ اعمال شده بین کاتد و آند در ولتاژهای ۱۰۰ keV، ۱۲۰ keV و ۲۰۰ keV نشان می‌دهد. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش ولتاژ بین کاتد و آند طیف شار اشعه ایکس نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۸): منحنی تغییرات شار اشعه ایکس بر اساس تغییرات ولتاژ اعمالی بین کاتد و آند.

۴.۴.۳. شار اشعه ایکس در بدو ورود به سلول تالی

شکل ۹ طیف تغییرات شار اشعه ایکس بر حسب ولتاژ اعمالی را بعد از عبور از ضخامت‌های مختلف بدنه تیوب (ضخامت

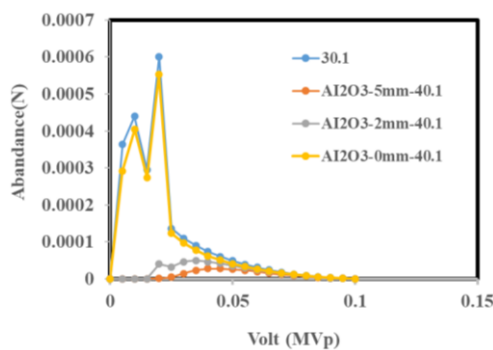


شکل (۵): منحنی تغییرات دز بر اساس تغییرات شعاع آند.

۴.۳. شار اشعه ایکس

۱.۴.۳. شار اشعه ایکس بعد از خروج از تیوب

شکل ۶ طیف تغییرات شار اشعه ایکس را بعد از عبور از ضخامت‌های مختلف بدنه تیوب (ضخامت آلومینا) برای مقادیر ۰ mm، ۲ mm و ۵ mm بعد از خروج از تیوب را نشان می‌دهد. نمودارها در فاصله $r = 70 \text{ mm}$ نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش ضخامت آلومینا، میزان شار خروجی اشعه ایکس کاهش یافته به طوری که ضخامت آلومینا برای شار خروجی به عنوان فیلتر عمل کرده و فوتون‌های زیر ۴۰ keV عملاً حذف می‌گردد. همین‌طور نمودار مربوط به عدد $30/1$ نیز شار اشعه ایکس را در فاصله $r = 55 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.



شکل (۶): منحنی تغییرات شار اشعه ایکس بر اساس تغییرات ضخامت آلومینا بعد از خروج از تیوب.

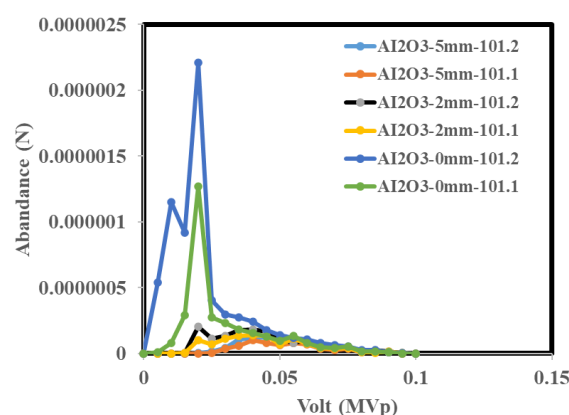
۲.۴.۳. تغییرات دز نسبت به تغییرات ولتاژ

شکل ۷ منحنی تغییرات دز را بر اساس تغییرات فاصله و برای سه ولتاژ اعمال شده بین کاتد و آند را در ولتاژهای ۱۰۰ keV،

۴. نتیجه‌گیری

همان‌طور که از نمودارها مشخص است با کاهش ضخامت آلومینا، میزان دُز جذبی افزایش یافته به‌طوری که در فواصل یکسان، با کاهش ضخامت آلومینا از ۵ mm به ۲ mm میزان دُز جذبی به اندازه تقریباً ۲ برابر افزایش پیدا می‌کند. با افزایش شعاع آند، میزان دُز جذبی در فواصل نزدیک به آند، افزایش پیدا می‌کند ولی با دور شدن از آند، رفتار آند مثل یک چشمه نقطه‌ای شده و بنابراین میزان دُز جذبی یکسان می‌شود. با افزایش ضخامت آند، هیچ‌گونه تغییری در میزان دُز جذبی حاصل نمی‌گردد. با افزایش ضخامت آلومینا، میزان شار خروجی اشعه ایکس کاهش یافته به‌طوری که ضخامت آلومینا برای شار خروجی به‌عنوان فیلتر عمل کرده و فوتون‌های زیر ۴۰ keV عملاً حذف می‌گردد. با افزایش ولتاژ بین کاتد و آند طیف شار اشعه ایکس نیز افزایش می‌یابد. از داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی انجام شده می‌توان در ساخت تیوب اشعه ایکس مورد استفاده در سیستم‌های پرتو دهی اشعه ایکس استفاده کرد.

آلومینا) برای مقادیر ۰ mm (یعنی بدون آلومینا)، ۲ mm و ۵ mm در بدو ورود به سلول تالی را نشان می‌دهد. نمودارها در فواصل مختلف Z نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودارها مشخص است با افزایش ضخامت آلومینا، میزان شار خروجی اشعه ایکس کاهش یافته به‌طوری که ضخامت آلومینا برای شار خروجی به‌عنوان فیلتر عمل کرده و فوتون‌های زیر ۳۰ keV عملاً حذف می‌گردد.



شکل (۹): منحنی تغییرات شار اشعه ایکس بر حسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت‌های مختلف آلومینا.

۵. مراجع

1. J. K. Shultis, R. E. Faw. *AN MCNP PRIMER*. Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering Kansas State University Manhattan, KS 66506, 2004.
2. J. F. Briesmeister, Ed. *MCNPTM — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A*. Report LA-12625-M. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1993.
3. E. Acosta, X. Liovet, E. Coleoni, J. A. Riveros, F. Salvat. Monte Carlo simulation of X-ray emission by kilovolt electron bombardment. *J. Appl. Phys.* 83 (1998) 6038–6049.
4. L. Ben Omrane, F. Verhaegen, N. Chahed, S. Mtimet. An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms. *Phys. Med. Biol.* 48 (2003) 1809–1824.
5. J. M. Boone, T. R. Fewell, R. J. Jennings. Molybdenum, rhodium, and tungsten anode spectral models using interpolating polynomials with application to mammography. *Med. Phys.* 24 (1997) 1863–1874.
6. J. M. Boone, J. A. Seibert. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV. *Med. Phys.* 24 (1997) 1661–1670.
7. J. F. Briesmeister. *MCNP a general Monte Carlo N-particle transport code. version 4C* Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M (Los Alamos, NM) 2000.
8. M. Caon, G. Bibbo, J. Pattison, M. Bhat. The effect on dose to computed tomography phantoms of varying the theoretical x-ray spectrum: a comparison of four diagnostic x-ray spectrum calculating codes. *Med. Phys.* 25 (6) (1998) 1021–1027.