

بررسی اثر نوع و ضخامت فیلتر تیوپ اشعه ایکس بر کیفیت و شدت طیف

حسن رنجبر^{۱*}، محسن محرابی^۲

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

چکیده:

در دهه‌های اخیر استفاده از اشعه ایکس در کاربردهای پزشکی مانند تصویربرداری و رادیولوژی تشخیصی افزایش داشته است لذا آگاهی دقیق از سیستم و طیف تیوپ اشعه ایکس از اهمیت بالایی برخوردار است. روش تجربی برای رسیدن به این آگاهی، پیچیدگی و دشواری‌های زیادی دارد ولی روش مونت کارلو برای تولید طیف اشعه ایکس، طراحی و بهینه‌سازی فیلتر مناسب است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر فیلتر بر کیفیت طیف خروجی از تیوپ اشعه ایکس می‌باشد. تحقیق در دو فاز انجام شد. در فاز ۱ تأیید صحت مدل شبیه‌سازی شده با کد MCNPX با مقایسه با طیف تجربی منتشر شده انجام شد و در فاز ۲ اثر دو فیلتر مولیبدن و آلومینیوم و ضخامت‌های مختلف آن‌ها بر طیف اشعه ایکس بررسی شد. نتایج نشان داد طیف شبیه‌سازی شده با طیف تجربی توافق خوبی دارد و فیلترهای استفاده شده سبب حذف قله‌های کم‌انرژی مضر برای بیمار و کاهش پرتوگیری آنها می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: طیف اشعه ایکس، اثر فیلتر، کد MCNPX

Investigation of type and thickness effects of X-ray tube filter on the spectrum quality and intensity

Hassan Ranjbar^{1*}, Mohsen Mehrabi²

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 11365-8486, Tehran, Iran.

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 11365-8486, Tehran, Iran.

Abstract:

In recent decades, the use of X-rays has increased in medical applications like diagnostic radiology. Therefore, it is important to know the X-ray based systems and output X-ray spectrum. Using the Monte Carlo method is less complicated than experimental methods for examining X-ray based systems. On the other hand, it is a good option for studying X-ray spectra to design and optimize the filters. The purpose of this study is to investigate the filters effect on X-ray quality. The study was conducted in two steps. In the first step, the simulated model with MCNPX code was validated by comparison with the obtained experimental spectrum. In the second step, the molybdenum and aluminum filters and effect of their thickness was investigated on the X-ray spectrum. The good agreement was observed between the simulated and experimental spectra. Also, these filters cause removal of low energy peak harmful reduction of exposure to patients.

Keywords: X-ray spectrum, Filter effect, MCNP code.

Email: hranjbar@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

با کشف اشعه ایکس در سال ۱۸۹۵ و یک سال بعد از آن با اولین تصویربرداری از دست انسان، اهمیت کاربرد اشعه ایکس در پزشکی سریعاً آشکار گردید. در این راستا طراحی تیوپ اشعه ایکس توسط هابت جکسون اولین فناوری بود که تصاویر شفاف رادیوگرافی را ایجاد کرد. از آن زمان تاکنون فعالیت‌ها و کارهای بسیاری برای بهبود این فناوری صورت گرفته است. متداول‌ترین روش تولید اشعه ایکس تاباندن باریکه‌ای از الکترون‌های پرنرژی بر ماده‌ای با عدد اتمی بالا است که هدف می‌نامند که درون محفظه‌ای از جنس شیشه پیرکس قرار دارد و داخل آن خلأ شده است [۱]. تعداد فوتون‌های اشعه ایکس تولیدی به تعداد الکترون‌هایی که از کاتد (فیلامان) به سمت آند تیوپ (هدف) حرکت می‌کند بستگی دارد. تنگستن و تانتالیوم که هادی الکتریکی و حرارتی خوبی هستند با عدد اتمی بالا و دارا بودن تابش اختصاصی K در محدوده انرژی تشخیصی گزینه‌های مناسب برای ایفای نقش آند را دارند. شیشه لامپ اشعه ایکس بخشی از تابش‌های کم انرژی طیف اشعه ایکس را کاهش می‌دهد (فیلتر ذاتی) اما برای حذف اکثر فوتون‌های کم انرژی که قابلیت نفوذ به بافت‌های بدن را جهت تصویربرداری ندارند و فقط باعث پرتوگیری بیشتر بیمار می‌شود، قرار دادن فیلتر اضافی امری ضروری است که این فیلتر اضافی باعث سختتر شدن انرژی اشعه ایکس و افزایش قدرت نفوذ مؤثر اشعه ایکس در بدن می‌شود [۲].

علم و آگاهی نسبت به طیف اشعه ایکس به منظور بررسی دز پرتویی دریافتی بیمار و کیفیت تصویر در رادیولوژی تشخیصی از اهمیت بالایی برخوردار است ولی بررسی تجربی طیف اشعه ایکس علاوه بر زمان بر بودن نیازمند تجهیزات ویژه و متعددی است که آزمایشگاه‌های محدودی به آن مجهز هستند از این رو استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو روش مناسب برای ارزیابی طیف اشعه ایکس محسوب می‌شود.

Ng Kee Peng و همکارانش طیف اشعه ایکس مورد استفاده در ماموگرافی را به کمک کد مونت کارلو ITS شبیه‌سازی کردند و هدف‌های مختلف را مورد استفاده قرار دادند که اختلاف اندک بین نتایج آن‌ها و طیف تولیدشده به روش‌های دیگر سبب شد آن‌ها نتیجه بگیرند که روش مونت کارلو در بررسی طیف اشعه ایکس مورد استفاده در ماموگرافی کارآمد است [۳].

Ay و همکارانش علاوه بر بررسی اثر ماده هدف، به اثر ولتاژ تیوپ و زاویه مناسب آند بر طیف اشعه ایکس به روش مونت کارلو پرداختند. مقایسه طیف اشعه ایکس شبیه‌سازی شده توسط آن‌ها با اندازه‌گیری‌های تجربی و طیف محاسبه شده بوسیله گزارش شماره ۷۸ مربوط به IPEM اختلاف چندانی نداشت [۴].

Bonifacio و همکارانش طیف اشعه ایکس را در رادیولوژی تشخیصی و ماموگرافی با استفاده از کد Geant شبیه‌سازی کردند و به بررسی پارامترهای مهم در این زمینه پرداختند که نتایج آن‌ها نیز توافق خوب در شدت تابش ترمزی طیف شبیه‌سازی شده با طیف تجربی را نشان داد [۵].

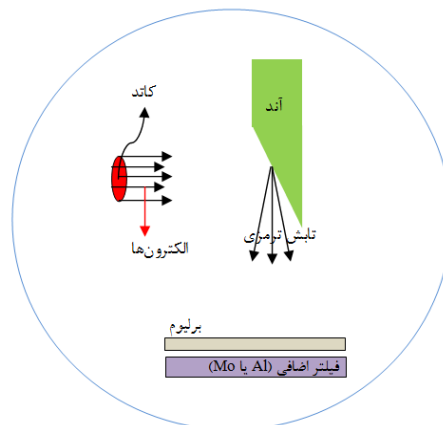
از تحقیقات و کارهای انجام شده دیگر در زمینه شبیه‌سازی طیف اشعه ایکس و توافق آن‌ها با نتایج تجربی می‌توان به تحقیقات Park [۶]، Omar [۷]، Bootsma [۸]، Baek [۹] و همکارانشان اشاره کرد.

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر دو فیلتر مولیبدن (Mo) و آلومینیوم (Al) بر شدت قله‌های اشعه ایکس و همچنین بررسی اثر ضخامت‌های مختلف فیلتر بر کیفیت اشعه ایکس می‌باشد که با استفاده از روش مونت کارلو با کد MCNPX در دو فاز تأیید برنامه نوشته‌شده و انجام شبیه‌سازی مدنظر انجام خواهد شد.

۲. روش کار

محدوده انرژی برابر الکترون و فوتون در کد MCNP از ۱ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰۰ مگا الکترون‌ولت گسترش دارد. گسترده‌گی در محدوده انرژی پایین اجازه طراحی صحیح و دقیق برهمکنش‌های فوتوالکتریک، اثر فوتوالکتریک، الکترون‌های اوزه و تابش‌های ایکس مشخصه را می‌دهد. برای شبیه‌سازی از کد MCNPX.2.4.0 که ارتقا یافته کد MCNP است، استفاده شد. قابلیت بارز MCNPX ساختن وکسل‌هایی است که حجم بزرگتر مورد نظر را به صورت

فضایی در ۳ بعد به وکسل‌های کوچکتر تقسیم بندی می‌کند. این وکسل‌ها به صورت استوانه و کروی و مکعبی می‌باشند. MCNPX برای سطح مقطع فوتون، از کتابخانه MCPLIB02 استفاده می‌کند [۱۰]. تعداد ذرات برای این محاسبات، 5×10^7 - ۴ ذره بود که این تعداد زیاد ذرات برای رسیدن به خطای زیر پنج درصد است. برنامه شبیه‌سازی شامل هندسه دستگاه اشعه ایکس، چشمه الکترونی، تعریف مواد، محدوده‌های انرژی و غیره می‌باشد. در فاز اول به منظور تأیید صحت برنامه نوشته شده، طیف اشعه ایکس حاصل از شبیه‌سازی برای انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت با طیف اشعه ایکس تحقیق انجام شده بوسیله Harding [۱۱] مقایسه می‌شود. در فاز بعدی به منظور بررسی اثر نوع و ضخامت فیلتر اضافی در تیوپ اشعه ایکس بر شدت و کیفیت طیف اشعه ایکس هندسه و مواد بکار رفته در برنامه به صورت زیر است. آند دستگاه اشعه ایکس از جنس تانتالیوم (Ta) در نظر گرفته می‌شود. آند یک طرفه تخت با زاویه ۴۵ درجه به صورت مکعب مستطیلی که ضلع پایین آن یک صفحه مورب است و پنجره بریلیومی به صورت یک صفحه مکعب مستطیل به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، که در این نوع طراحی زیر آند قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی می‌شود. چشمه به صورت صفحه‌ای دایره‌ای شکل و به شعاع ۰/۵ سانتی‌متر و با انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت در نظر گرفته می‌شود. سپس به منظور حذف فوتون‌های کم انرژی، در فاصله کمی از فیلتر بریلیوم و زیر آن یک فیلتر دیگر یعنی Mo و Al (فیلتر اضافی) قرار داده شده، سپس شار متوسط فوتون‌ها روی سطح خروجی فیلتر اضافی محاسبه می‌گردد.

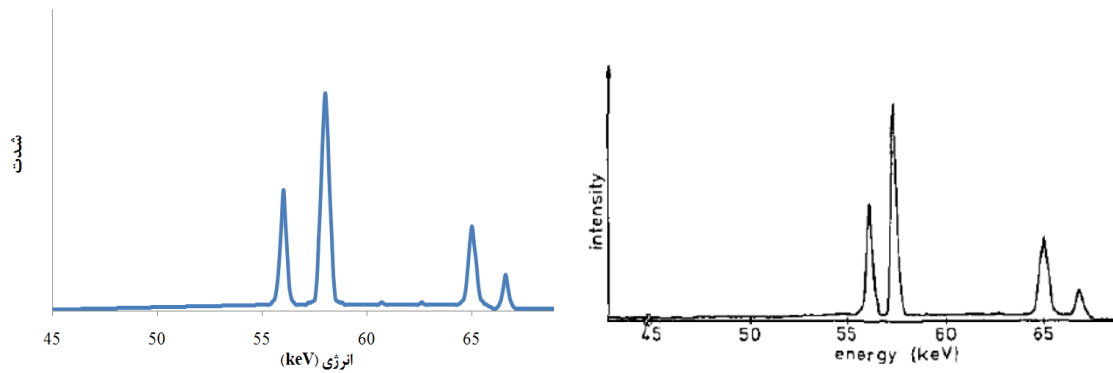


شکل ۱. طرحی از هندسه شبیه‌سازی شده با استفاده از کد MCNPX

برای بررسی اثر ضخامت فیلتر، برای فیلتر مولیبدن ضخامت‌های ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر و برای فیلتر آلومینیوم بدلیل ضریب جذب پایین‌تر ضخامت‌های ۱ تا ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی در مد الکترون و فوتون اجرا می‌شود. در کلیه حالات، مکان چشمه به گونه‌ای انتخاب شده که بیشترین شدت ممکن حاصل شود. تالی انتخاب‌شده در این شبیه‌سازی F2 می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

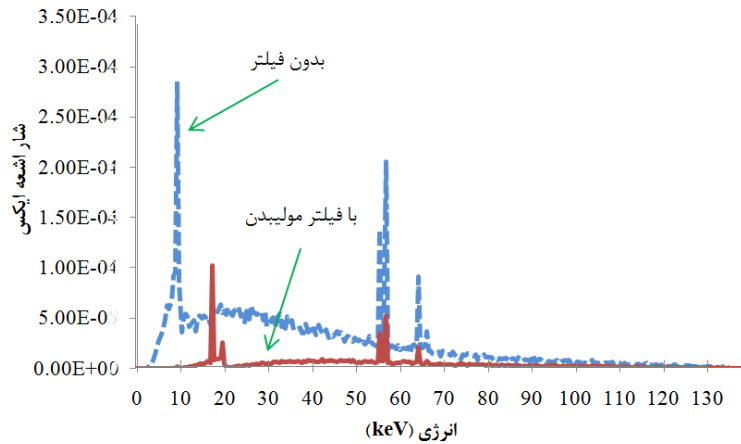
طیف اشعه ایکس ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولتی برای تیوپ با آند مس و فیلتر تانتالیوم با طیف مربوط به کار تجربی انجام شده [۱۱] مقایسه گردید. همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد نتایج، صحت برنامه نوشته شده را تأیید می‌کند.



شکل ۲. طیف اشعه ایکس شبیه‌سازی شده در این تحقیق (سمت چپ) و طیف تجربی [۱۱] (سمت راست)

همانطور که این شکل‌ها نشان می‌دهند در طیف تجربی اشعه ایکس قله‌های با انرژی ۵۶، ۵۷، ۶۵ و ۶۷ کیلوالکترون‌ولت وجود دارند که همین انرژی‌ها در طیف شبیه‌سازی شده قابل مشاهده هستند. از توافق خوب بین دو طیف تجربی و شبیه‌سازی شده این نتیجه حاصل می‌شود که برنامه نوشته شده قابل اعتماد است و می‌توان به بررسی‌های دیگر (اثر فیلتر اضافی) تیوپ اشعه ایکس با اطمینان خاطر پرداخت.

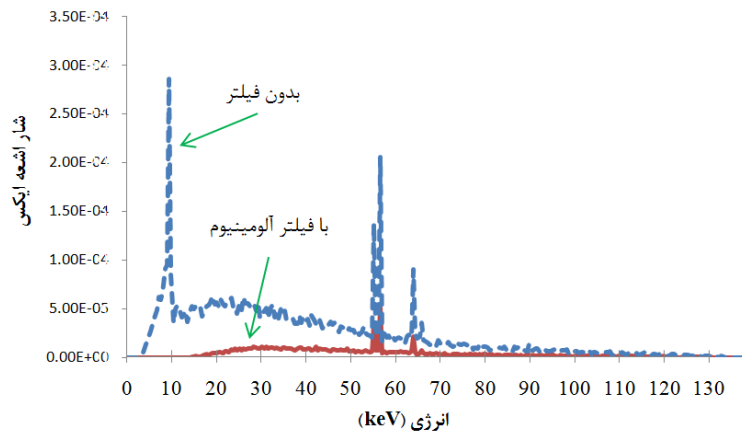
به منظور بررسی اثر فیلتر اضافی بر اشعه ایکس، در مسیر اشعه ایکس به صورت جداگانه فیلتر مولیبدن (عدد اتمی ۴۲ و چگالی ۱۰/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و آلومینیوم (عدد اتمی ۱۳ و چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) قرار داده شد که شکل ۲ طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر اضافه مولیبدن را نشان می‌دهد.



شکل ۳. طیف اشعه ایکس قبل و بعد از قرار دادن فیلتر اضافی مولیبدن

از مقایسه طیف اشعه ایکس قبل و بعد از گذاشتن فیلتر مولیبدن می‌توان مشاهده کرد که هرچند شدت قله‌های اشعه ایکس کاهش داشته است ولیکن قله‌های با انرژی پایین حذف شده است و این نشان‌دهنده این موضوع است که دز جذبی بیمار کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۳ طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر اضافه آلومینیوم را نشان می‌دهد.

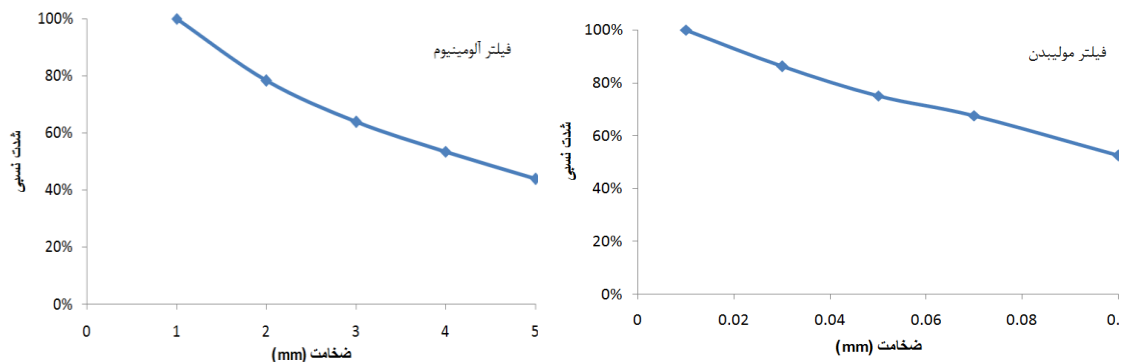


شکل ۴. طیف اشعه ایکس قبل و بعد از قرار دادن فیلتر اضافی آلومینیوم

همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود فیلتر آلومینیوم پیک‌های مضر با انرژی پایین که سبب افزایش دز جذبی بیمار می‌شود را حذف می‌کند.

زمانیکه از فیلتر آلومینیوم استفاده می‌شود کوچکترین تابش مشخصه تانتالیوم با انرژی حدود ۱۰ کیلو الکترون‌ولت حذف می‌شود و خود آن تابش مشخصه‌ای به طیف اشعه ایکس اضافه نمی‌کند ولی زمانیکه از فیلتر مولیبدن استفاده شود هرچند اشعه ایکس مشخصه تانتالیوم حذف می‌شود اما این فیلتر دو قله مشخصه ۱۷ و ۲۰ الکترون‌ولتی به طیف اشعه ایکس تحمیل می‌کند که در صورتیکه این دو مزاحم باشند باید از یک فیلتر دیگری علاوه بر مولیبدن به صورت ترکیبی استفاده کرد.

به منظور بررسی میزان اثر ضخامت فیلتر بر کیفیت طیف اشعه ایکس (شدت قله‌ها) ضخامت ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر برای مولیبدن و ۱ تا ۵ میلی‌متر برای آلومینیوم انتخاب شد که شکل ۴ اثر ضخامت‌های مختلف بر شدت اشعه ایکس را نشان می‌دهد.



شکل ۵. کاهش شدت قله طیف اشعه ایکس به ازای ضخامت‌های مختلف

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از روش مونت کارلو جهت ترابرد ذرات هسته‌ای روش دقیق و مورد تأیید است که برای شبیه‌سازی تیوپ اشعه ایکس و بررسی طیف حاصل از آن بسیار مفید و کارگشا می‌باشد زیرا عوامل متعددی بر کیفیت و شدت طیف اشعه ایکس اثرگذار هستند به طوری که بررسی تجربی همه آن‌ها هزینه‌بر، زمان‌بر و پیچیده است. با کمک و استفاده از روش شبیه‌سازی می‌توان به بررسی طیف تیوپ اشعه ایکس با هندسه‌های پیچیده، انواع هدف‌ها، فیلترهای گوناگون و ولتاژهای مختلف تیوپ پرداخت. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی طیف اشعه ایکس مورد استفاده در رادیولوژی تشخیصی از کد MCNPx استفاده شد. در این کار پس از تأیید کد و برنامه نوشته‌شده برای شبیه‌سازی، تأثیر دو فیلتر مولیبدن و

آلومینیوم و سپس ضخامت‌های مختلف در سرراه اشعه ایکس بر کیفیت تابش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی، صحت و توافق خوب با طیف تجربی را نشان دادند. از نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت روش مونت کارلو به طور وسیعی در کاربردهای تصویربرداری، ارزیابی کیفیت تصویر و محاسبات دوز جذبی می‌تواند کاربرد داشته باشد و همچنین فیلترهای اضافی بر سرراه طیف تیوپ اشعه ایکس هرچند سبب کاهش شدت طیف می‌شود ولی با حذف قله‌های با انرژی کم سبب سخت‌تر شدن طیف می‌گردد و این سبب خواهد شد که دز دریافتی بیمار از قسمت‌هایی از طیف که مورد استفاده در تصویربرداری قرار نمی‌گیرد کاهش یابد.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از رئیس و پرسنل آزمایشگاه شناسایی و مشخصه‌یابی رادیونوکلیدها (آنالیز هسته‌ای سابق) پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای که ما را در ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

۶. مراجع

- [1] Dendy, Philip Palin, and Brian Heaton. *Physics for diagnostic radiology*. CRC press, 2011.
- [2] Dance, D. R., et al. "Influence of anode/filter material and tube potential on contrast, signal-to-noise ratio and average absorbed dose in mammography: a Monte Carlo study." *The British Journal of Radiology* 73.874 (2000): 1056-1067.
- [3] Ng, Kee Peng, Cheuk S. Kwok, and F. H. Tang. "Monte Carlo simulation of x-ray spectra in mammography." *Physics in Medicine & Biology* 45.5 (2000): 1309.
- [4] Ay, M. R., et al. "Comparative assessment of different computational models for generation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography." *IEEE Symposium Conference Record Nuclear Science 2004*. Vol. 7. IEEE, 2004.
- [5] Bonifácio, Daniel AB, Hélio M. Murata, and Maurício Moralles. "Monte Carlo simulation of X-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using GENT4." (2005).
- [6] Park, Su-Jin, et al. "Evaluation of the Use of a Molybdenum Filter for Dose Reduction in Pediatric Digital X-ray Imaging." *Journal of the Korean Physical Society* 77.12 (2020): 1253-1259.
- [7] Omar, Artur, Pedro Andreo, and Gavin Poludniowski. "A model for the energy and angular distribution of x rays emitted from an x-ray tube. Part II. Validation of x-ray spectra from 20 to 300 kV." *Medical Physics* 47.9 (2020): 4005-4019.
- [8] Bootsma, G. J., et al. "Monte Carlo kilovoltage X-ray tube simulation: A statistical analysis and compact simulation method." *Physica Medica* 72 (2020): 80-87.
- Hoff, G., et al. "Using Geant4 Monte Carlo toolkit to evaluate a low power X-ray tube generator configuration." *Applied Radiation and Isotopes* (2020): 109487.
- [9] Baek, Cheol-Ha, and Daehong Kim. "Simulation Study of a Monochromatic X-ray Beam with K-edge Filter for Low Dose Mammography." *Journal of Magnetism* 24.4 (2019): 729-732.
- [10] Waters, Laurie S. "MCNPX user's manual." *Los Alamos National Laboratory* (2002).
- [11] Harding, G., B. Jordan, and J. Kosanetzky. "A new fluorescent X-ray source for photon scattering investigations." *Physics in Medicine & Biology* 36.12 (1991): 1573.