مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شمارهٔ ٤، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۹، صفحه ۲٦۱-۲٦٦
پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیریون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰٦/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

بررسی اثر نوسانات ولتاژ بر کیفیت پرتوهای ایکس در محدوده انرژی رادیولوژی تشخیصی

حسین محمدی[۱]، محمدرضا شجاعی[۱*] و جمشید سلطانی نبی‌پور[۲]

[۱]دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.
[۲]گروه مهندسی پرتو پزشکی، دانشکده کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران.
[*]سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، گروه مهندسی پرتو پزشکی، کدپستی: ۳٦۱۹۹۹۵۱٦۱
پست‌الکترونیکی: shojaei.ph@gmail.com

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، بررسی اثر نوسانات ولتاژ حاصل از دستگاه‌های تولیدکننده پرتوی ایکس بر کیفیت پرتوهای ایکس می‌باشد. برای رسیدن به این موضوع باید ابتدا طیف انرژی حاصل از تیوب‌های تولیدکننده پرتوی ایکس در محدوده رادیوگرافی تشخیصی شبیه‌سازی شده و با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده، صحت‌سنجی شود. آنالیز آماری انجام گرفته روی نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود ندارد. سپس تاثیر ریپل ولتاژ روی طیف انرژی شبیه‌سازی و بررسی شد. برای بررسی اثر نوسانات ولتاژ بر میزان کیفیت پرتو محاسبات لایه نیم جذب (HVL) انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که نوسانات ولتاژ می‌تواند تا حدود ٥٦٪ مقدار HVL را در ولتاژ ۱۰۰kV و در حدود ۷۵٪ در ولتاژ ۸۰kV کاهش دهد.

کلیدواژگان: لایه نیم جذب، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، GATE، نوسانات ولتاژ، طیف انرژی.

۱. مقدمه

پرتو ایکس مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزار در پزشکی بالینی می‌باشد، که در دو زمینه تصویربرداری و رادیوتراپی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله کاربردهای پرتو ایکس در تصویربرداری را می‌توان به دستگاه‌های رادیولوژی، سی‌تی‌اسکن و ماموگرافی اشاره کرد. تولید پرتو ایکس براساس تاباندن الکترون‌های پر انرژی به هدفی با عدد اتمی بالا که بسته به نوع کاربرد از جنس تنگستن، مولیبدن یا آلیاژهای آن‌ها می‌باشد، صورت می‌گیرد. طیف پرتو ایکس شامل پرتوهای ناشی از تابش ترمزی وهمچنین قله‌های ایکس مشخصه است که بر اثر پدیده‌های یونش و برانگیزش ایجاد می‌گردد. برای استفاده از پرتوهای ایکس لازم است که طیف انرژی آن‌ها شناخته شود. از آن‌جایی که اندازه‌گیری طیف پرتو ایکس مشکل بوده و نیاز به تجهیزات خاصی دارد[۱ و ۲]. تلاش‌های زیادی در جهت رسم طیف پرتو ایکس با استفاده از روش‌های محاسباتی صورت گرفته است که این تلاش‌ها از سال ۱۹۲۳ آغاز شد. با پیشرفت سخت افزارها و توسعه روش‌های کامپیوتری، کارهای جدیدتری برای تولید طیف‌های دقیق‌تر صورت گرفت[۳]. به‌طورکلی روش‌های محاسباتی را می‌توان به سه دسته روش‌های تجربی، روش‌های نیمه تجربی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو تقسیم کرد. با وجود این‌که روش‌های

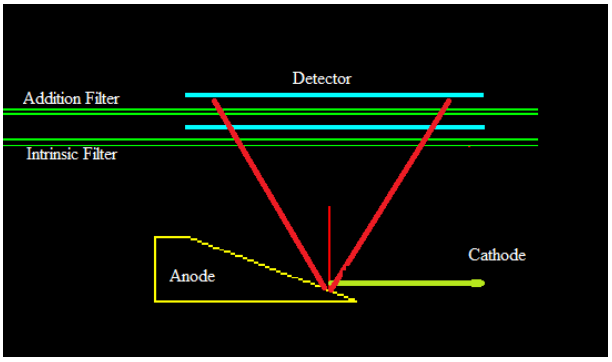
تجربی و نیمه تجربی سریع‌ترین روش‌های مدل‌سازی می‌باشند ولی مدل‌های پیشنهاد شده محدود بوده و توانایی کاربری در محدوده وسیعی از کاربردها را ندارند. به علاوه مدل‌های ارائه شده ترکیب هدف و فیلتر ثابتی دارند و اجازه به کارگیری ترکیبات جدید در طراحی هدف و فیلتر و بررسی اثر آن روی کیفیت طیف ایکس خروجی را نمی‌دهند. شبیه‌سازی مونت‌کارلو این محدودیت‌ها را ندارد و تنها عیب آن زمان‌بر بودن این روش نسبت به مدل‌های تجربی و نیمه تجربی است[۳].

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی تیوب پرتو ایکس رادیولوژی تشخیصی با هدف پیش‌بینی طیف پرتو ایکس با ترکیب W / Al با استفاده از ولتاژهای مختلف تیوب (بین ٦٠ تا ١٢٠ کیلوولت در رادیولوژی تشخیصی) و زاویه آند ١٨ درجه با کد GATE شبیه‌سازی شده است. سپس به تاثیر استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف پرتو ایکس و روی میزان دز دریافتی توسط بیمار پرداخته شده است. اعتبار طیف محاسبه شده شبیه‌سازی شده با کد GATE با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شده است.

۲. مواد و روش‌ها

بسته شبیه‌سازی مونت‌کارلو GATE از کاربردهای رشد یافته کد شبیه‌سازی GEANT4 برای کاربردهای توموگرافی و تصویربرداری پزشکی است که توسط انجمن فیزیک انرژی بالا به عنوان ابزاری قدرتمند شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای بهینه‌سازی طراحی آشکارساز، تست مدل‌های تئوری، پیشبینی کارایی آشکارسازی و .. توسعه داده شده است. از GATE برای تولید فوتون‌ها با انرژی‌های مختلف استفاده می‌شود و ترابرد و برهم‌کنش آن‌ها را در مواد مختلف بررسی و شبیه‌سازی می‌کند[۸].

اساساً کد کامپیوتری GEANT4/GATE سه مدل برای تولید برهم‌کنش‌های فوتون با مواد را می‌تواند در نظر بگیرد؛ مدل استاندارد، مدل انرژی پایین و PENELOPE. مدل PENELOPE برای شبیه‌سازی مونت کارلوی با توزیع فوتون‌های کم‌انرژی متمرکز شده است. در این مدل سطح مقطع‌های کل فرآیند پراکندگی کامپتون و ریلی از پارامترسازی‌های تحلیلی بدست می‌آید. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق از مدل PENELOPE در فیزیک لیست و برای محاسبه طیف انرژی از خروجی EnergySpectrumActor استفاده شده است[۸]. نمونه از هندسه شبیه‌سازی شده در کد GATE در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): نمایش از هندسه شبیه‌سازی شده در کد GATE.

انواع مختلف دستگاه‌های تولیدکننده پرتو ایکس در چند گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: دستگاه تولیدکننده پرتو ایکس با فرکانس بالا، ۳ فاز ، تک فاز و پتانسیل ثابت. تفاوت این گروه‌ها در میزان و فرکانس نوسان در ولتاژ الکتریکی اعمال شده در تیوب در زمان پرتودهی می‌باشد. درصد تغییرات پتانسیل تیوب در طول زمان پرتودهی، "ریپل پتانسیل" نامیده می‌شود (شکل ۲) مقدار ریپل ولتاژ از ۰ تا ۱۰۰٪ می‌تواند تغییر کند[۳].

برای شبیه‌سازی نوسانات ولتاژ در شبیه‌سازی، از رابطه (۱) برای عامل ریپل و ولتاژ تیوب استفاده شده است[٤]:

$$Ripple\ factor = 100 \times \frac{Kv_{max} - Kv_{min}}{Kv_{max}} \quad (۱)$$

بنابراین، انرژی یک الکترون قبل از گسیل به سمت هدف، به صورت یکنواخت از شکل موج ولتاژ تیوب با مقادیر مختلف ریپل، نمونه‌برداری می‌شود:

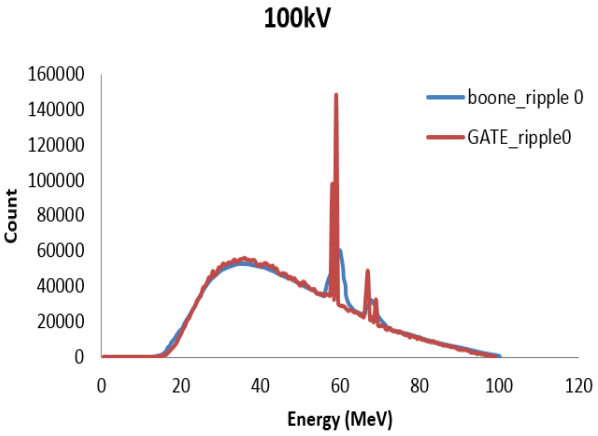
$$KV(t) = Kv_{max}\left[1 - \frac{RF}{100}(1 - |\sin \omega t|)\right] \quad (۲)$$

حداکثر خطای آماری در مورد تعداد فوتون‌های تولید شده در هر بازه انرژی با عرض ۱keV در شبیه‌سازی‌ها کمتر از ۵٪ است، که مقدار آن به تعداد الکترون‌های شبیه شده بستگی دارد (تعداد الکترون‌های شبیه‌سازی شده ۹×۱۰^{۷}).

مرحله سوم تعیین تاثیر نوسانات ولتاژ بر میزان دز دریافتی بیمار توسط یک واحد رادیولوژی است. فیلتر کردن پرتوهای تولید شده به وسیله تیوب اشعه ایکس موجب کاهش تابش به بیمار می‌شود، زیرا از این طریق فوتون‌های کم‌انرژی برای شکل‌گیری تصویر تشخیصی حذف می‌شود. کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژیک (ICRP) حداقل مقدار ضخامت فیلتر را با پرتوهای ایکس نباید کمتر از ۲/۵ میلی‌متر اعلام کرده است. تولیدکنندگان تجهیزات رادیوگرافی باید اطمینان حاصل کنند که حداقل الزامات فیلتراسیون ICRP برآورده شده است.اغلب روش استفاده شده برای اطمینان از کل فیلترکردن یک تجهیز به فیلترکردن کیفیت پرتوی ایکس وابسته است، همچنین نفوذپذیری یا نفوذ انرژی در مواد، به صورت عددی با لایه نیمه جذب (HVL) مشخص می‌شود. متون علمی مختلفی ارتباطات بین HVL و پتانسیل تیوب (kVp) و جنس فیلتر نشان می‌دهند [۹]. با توجه به استانداردهای فنی در کشورهای مختلف، حداقل مقادیر HVL را برای نوسانات تیوب و تاثیر استفاده از ژنراتورهای مختلف مشخص می‌کند. اگر چنین حداقل مقادیری برای HVL بدست آمده باشد، تصور می‌شود که فیلتر کل پرتو در مطابقت با استانداردهای ICRP باشد[۹]. بدین منظور و برای بررسی میزان تاثیر نوسانات ولتاژ بر فیلترگذاری و HVL، مقدار لایه نیم جذب را در دو ولتاژ پرکاربرد در رادیولوژی تشخیصی ۸۰kV و ۱۰۰ kV محاسبه شد.

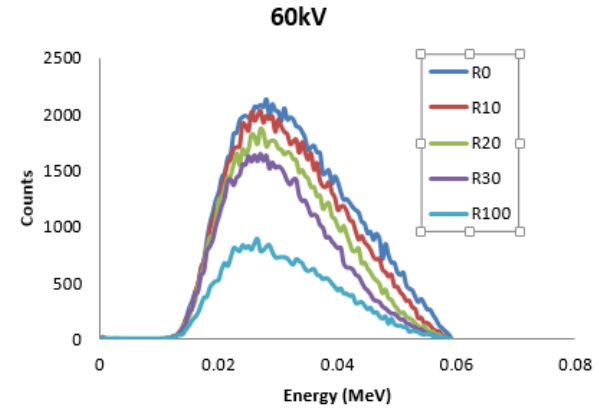
۳. نتایج

جهت صحت‌سنجی طیف انرژی محاسبه شده از طریق کد شبیه‌سازی GATE، این نتایج در انرژی ۱۰۰kV با نتایج تجربی که توسط Boone و همکارانش منتشر شده مقایسه شده که در شکل (۲) نمایش داده شده است. بازه محاسبات انرژی ۱ کیلوالکترون ولت در نظر گرفته شده است.

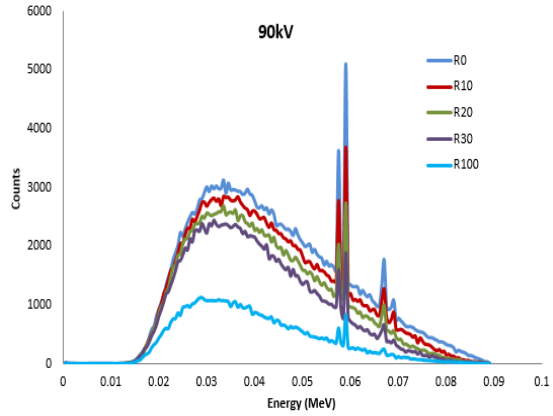


شکل (۲): مقایسه طیف انرژی شبیه‌سازی شده با کد GATE و نتایج تجربی اندازه‌گیری شده [۴] در انرژی۱۰۰keV.

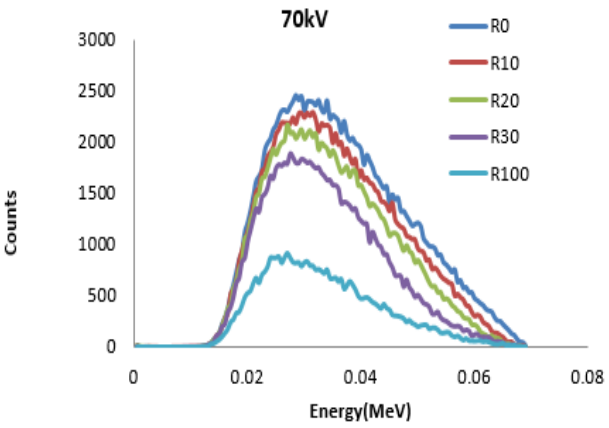
در شکل‌های (۳ تا ۷) اثر نوسانات ولتاژ تیوب را روی طیف ایکس شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی‌ها، ریپل ولتاژ را در طول شبیه‌سازی مونت‌کارلو طیف پرتوی ایکس با نمونه‌گیری یکنواخت از تابع موج ولتاژ (رابطه ۲) مدل‌سازی شده است.



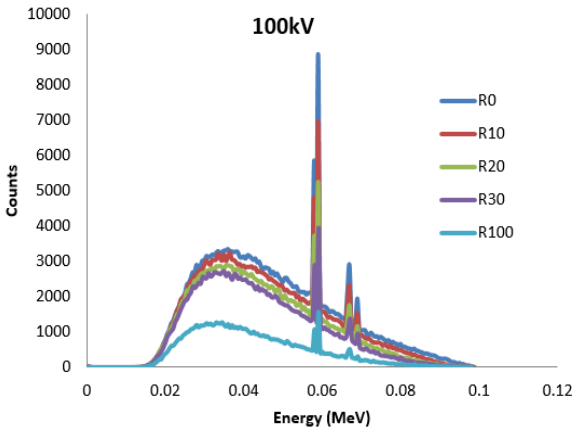
شکل (۳): اثر نوسانات ولتاژ حاصل از استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف انرژی در ۶۰kV.



شکل (۶): اثر نوسانات ولتاژ حاصل از استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف انرژی در ۹۰kV.

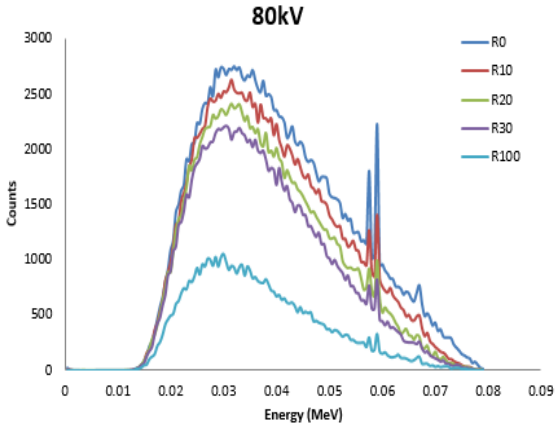


شکل (۴): اثر نوسانات ولتاژ حاصل از استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف انرژی در ۷۰kV.



شکل (۷): اثر نوسانات ولتاژ حاصل از استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف انرژی در ۱۰۰kV.

با آنالیز انجام گرفته روی طیف‌های محاسبه شده در انرژی‌های ۶۰kV تا ۱۰۰kV نشان می‌دهد که پیک نمودارها در ریپل‌های مختلف تغییر محسوسی پیدا نکرده است و فقط شدت طیف کاهش یافته است. در جدول (۱) می‌توان انرژی موثر ریپل‌های مختلف را در ولتاژهای متفاوت مشاهده نمود.

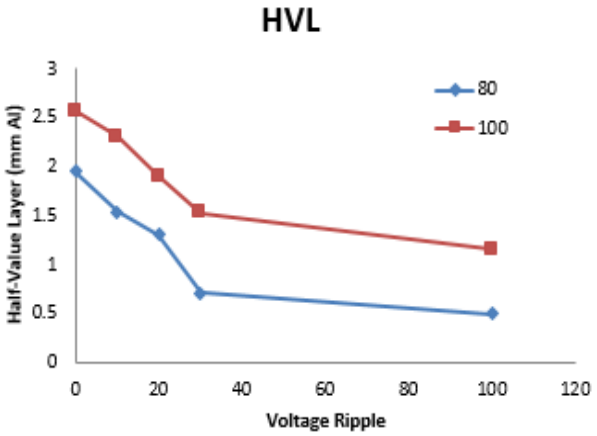


شکل (۵): اثر نوسانات ولتاژ حاصل از استفاده از ژنراتورهای مختلف روی طیف انرژی در ۸۰kV.

جدول (۱): انرژی موثر طیف انرژی برای ولتاژهای متفاوت در ریپل‌های مختلف.

نوسانات ولتاژ	انرژی موثر طیف (kV)				
	۶۰kV	۷۰kV	۸۰kV	۹۰kV	۱۰۰kV
R0	۳۲/۷۷	۳۶/۵۰	۴۰/۳۲	۴۳/۲۰	۴۷/۲۵
R 10%	۳۲/۰۳	۳۵/۶۳	۳۹/۱۶	۴۲/۷۳	۴۵/۹۷
R 20%	۳۱/۲۹	۳۴/۸۲	۳۸/۱۳	۴۱/۶۲	۴۴/۷۴
R 30%	۳۰/۴۷	۳۳/۵۹	۳۷/۶۱	۴۰/۴۵	۴۳/۷۴
R 100%	۲۹/۷۹	۳۳/۲۲	۳۶/۴۱	۳۹/۳۶	۴۲/۲۷

بعد از تاثیر نوسانات ولتاژ بر طیف انرژی، تاثیر نوسانات ولتاژ بر کیفیت باریکه پرتوی ایکس توسط لایه نیم جذب HVL محاسبه شد. اثر ریپل ولتاژ برحسب لایه نیم جذب در شکل ۸ آمده است.



شکل (۱): نمودار تغییرات HVL برحسب نوسانات ولتاژ در ولتاژهای ۸۰kV و ۱۰۰kV.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی کمی از تفاوت بین طیف‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از کد GATE و نتایج اندازه‌گیری شده با استفاده از تحلیل آماری انجام شد. آزمون t-test (آزمون دو طرفه) برای طیف‌های شبیه‌سازی شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شد. اگر مقدار p-value محاسبه شده بیش‌تر از مقدار t بحرانی باشد، فرضیه صفر بدون تفاوت آماری معنی‌دار (در سطح اطمینان ۹۵٪) رد می‌شود. به طور کلی، آزمون t-test هیچ تفاوت آماری معنی‌داری بین طیف شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای تمام آزمایشات انجام شده در این کار نشان نداد. بنابراین می‌توان از مدل شبیه‌سازی شده برای بررسی اثرات مختلف بر طیف انرژی پرتوی ایکس استفاده نمود. در شکل‌های (۳) تا (۷) تاثیر ریپل ولتاژ بر طیف انرژی با کد شبیه‌سازی GATE محاسبه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود قله در ریپل‌های مختلف تغییری نکرده است اما انرژی موثر طیف مطابق با جدول ۲ تغییر نموده است.

جدول (۲): درصد کاهش تغییرات انرژی موثر طیف.

نوسانات ولتاژ	درصد تغییرات انرژی موثر طیف نسبت به ریپل صفر				
	۶۰kV	۷۰kV	۸۰kV	۹۰kV	۱۰۰kV
R 10%	۹۸	۹۸	۹۷	۹۹	۹۷
R 20%	۹۵	۹۵	۹۵	۹۶	۹۵
R 30%	۹۳	۹۲	۹۳	۹۴	۹۳
R 100%	۹۱	۹۱	۹۰	۹۱	۸۹

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده هر چه نوسانات ولتاژ افزایش پیدا کند انرژی موثر کاهش پیدا می‌کند. بیش‌ترین کاهش در ولتاژ ۱۰۰kV حدود ۱۱٪ در ریپل ۱۰۰٪ اتفاق می‌افتد.

درصد تغییرات سطح زیر نمودار طیف انرژی که به میزان نفوذپذیری، کیفیت و شدت باریکه پرتوهای ایکس وابسته است که در جدول ۳ جمع‌بندی شده است.

جدول (۳): درصد کاهش تغییرات سطح زیر نمودار طیف انرژی ولتاژهای مختلف برحسب نوسانات متفاوت.

نوسانات ولتاژ	درصد تغییرات انرژی موثر طیف نسبت به ریپل صفر				
	۶۰kV	۷۰kV	۸۰kV	۹۰kV	۱۰۰kV
R 10%	۹۰	۸۹	۸۹	۸۹	۷۹
R 20%	۷۸	۷۸	۷۸	۷۸	۷۹
R 30%	۶۷	۶۴	۷۰	۶۸	۷۰
R 100%	۳۶	۲۹	۲۹	۳۰	۳۰

هرچه نوسانات ولتاژ افزایش پیدا کند سطح زیر نمودار تا حدود ۷۰ درصد می‌تواند کاهش پیدا کند که این موضوع در میزان کیفیت پرتو و کیفیت تصویر حاصل تاثیر دارد. به منظور تعیین میزان تاثیر نوسانات ولتاژ در کیفیت پرتو در دو ولتاژ پرکاربرد در رادیوگرافی تشخیصی لایه نیم جذب محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که نوسانات ولتاژ می‌تواند تا حدود ۷۵ درصد در ولتاژ ۸۰kV و ۵۶٪ در ولتاژ ۱۰۰kV باعث کاهش HVL شود که این موضوع نشان‌دهنده کاهش کیفیت باریکه پرتوهای ایکس می‌باشد.

نتایج این مطالعه اثر نوسانات دستگاه تولیدکننده پرتوی ایکس در محدوده کاری رادیولوژی را بر طیف انرژی ثبت شده و کیفیت پرتو نشان می‌دهد. با استفاده از یک دستگاه با نوسانات ولتاژ کمتر می‌توان کیفیت بهتری تا حدود ۷۵ درصد به دست آورد.

۵. مراجع

[1] Fewell T R and Shuping R E. Photon energy distribution of some typical diagnostic x-ray beams Med Phys 1977; 4:187–97

[2] Dance D 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 Br J Radiol 2000; 73:1056–67.

[3] Ay M R, Shahriari M, Sarkar S, Adib M and Zaidi H. Monte Carlo simulation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNPX. Phys Med Biol 2004; 49: 4897-4917.

[4] Boone J M and Seibert J A. An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 kV Med Phys 1997; 24: 1661–70.

[5] Cho H-M, Kim H-J, Choi Y-N, Lee S-W, Ryu H-J and Lee Y-J. The effects of photon flux on energy spectra and imaging characteristics in a photon-counting x-ray detector. Phys Med Biol 2013; 58:4865–4879.

[6] International Atomic Energy Agency. Quality assurance program for digital mammography. IAEA Human Health Series Publication. No. 17. VIENNA, 2011.

[7] International Commission on Radiological Protection. Protection of the patient in diagnostic radiology. ICRP Publication 34. New York, NY: Pergamon Press, 1982.

[8] M.T. Bahreyni-Toosi, SH. Nasseri, M. Momennezhad, F. Hasanabadi, H. Gholamhosseinian. Monte Carlo Simulation of a 6 MV X-Ray Beam for Open and Wedge Radiation Fields, Using GATE Code, Journal of Medical Signals & Sensors, Vol 4, 2014, 268-273.

[9] M. A. Sousa Lacerda, T.A. Silva, A. H Oliveira, the methodology for evaluating half-value layer and its influence on the diagnostic radiology, Radiol Bras 2007;40(5):331–336