

بررسی کیفی نرم افزار FLUKA در شبیه سازی و طراحی پرتوهای اشعه ایکس حاصل از لامپ اشعه ایکس

رضا طالعی^{۱*}، مجید شهریاری^۲، سید محمود رضا آقامیری^۳

۱- دانشجوی دکتری پرتو پزشکی، دانشکده مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲- دانشیار گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳- استادیار گروه پرتو پزشکی، دانشکده مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۶/۵/۲۹

تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۶/۳/۲۹

چکیده

مقدمه: اشعه ایکس مهم ترین و پرکاربردترین ابزار در پزشکی بالینی می باشد، که در دو مقوله تصویربرداری و رادیوتراپی مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به مشکلات اندازه گیری طیف اشعه ایکس، تلاشهای زیادی در جهت تعیین طیف اشعه ایکس با استفاده از روشهای محاسباتی صورت گرفته است. کد FLUKA یکی از کدهای چند منظوره مونت کارلو می باشد که می تواند برای تولید طیف اشعه ایکس بکار رود. در مقالات قبلی صحت نتایج کد MCNP با مقایسه با داده های تجربی به تایید رسیده. در این مقاله نتایج کد FLUKA با نتایج کد MCNP مقایسه شده است.

مواد و روشها: جهت شبیه سازی طیف اشعه ایکس از کد MCNP و کد FLUKA2006 استفاده شده است. هندسه لامپ اشعه ایکس بطور دقیق در این دو نرم افزار شبیه سازی اعمال شده است. خروج الکترون از کاتد با زاویه مناسب برای نقطه کانونی ۱/۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. آند از جنس تنگستن بوده و زاویه آن ۱۲ درجه است. همچنین قطر فیلتر آلومینیوم ۱/۲ میلی متر در نظر گرفته شده است.

نتایج: نتایج حاصل از کدهای FLUKA و MCNP برای شار فوتونی در قبل و بعد از فیلتر محاسبه شده است. برای بررسی اثر فیلتر، طیفهای نرمالیزه شده به میانگین داده ها قبل و بعد از فیلتر بطور جداگانه در ۴ انرژی مختلف مقایسه شده اند. برای بررسی کیفیت اثر فیلتر، طیف قبل به طیف بعد از فیلتر برای کدهای FLUKA و MCNP بطور جداگانه در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت تقسیم شده و نتایج بدست آمده رسم شده است.

بحث و نتیجه گیری: پاسخ بدست آمده از کدهای FLUKA و MCNP در ناحیه تابش ترمزی انطباق بسیار خوبی دارند. ولی اختلاف در دامنه قله های ایکسهای مشخصه مشاهده می شود، از آنجایی که در بررسی کیفیت طیفهای اشعه ایکس و اثر فیلترهای مختلف روی آنها عمدتاً طیف حاصل از پدیده ترمزی مد نظر است، لذا هر دو کد FLUKA و MCNP برای شبیه سازی طیف اشعه ایکس مناسب می باشند. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۳، شماره ۱۲، پاییز ۸۵: ۲۵-۳۶)

واژگان کلیدی: FLUKA، MCNP، طیف اشعه ایکس، فیلتر آلومینیوم

* نویسنده مسؤل: رضا طالعی

آدرس: گروه پرتو پزشکی، دانشکده مهندسی هسته ای، دانشگاه

شهید بهشتی تهران R_Taleei@std.sbu.ac.ir

تلفن: ۲۸۱۶۰۲۹۹۰ (۲۱) ۹۸+

۱- مقدمه

عیب آن زمان بر بودن این روش نسبت به مدل‌های تجربی و نیمه تجربی می‌باشد. کدهای کامپیوتری مختلفی جهت تولید اشعه ایکس مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بعضی از این کدها خاص تولید طیف اشعه ایکس بوده [۱۲ و ۱۶] و برخی دیگر کدهای با قابلیت‌های گسترده‌ای هستند که توانایی تولید طیف پرتوهای ایکس را نیز دارا می‌باشند. EGS4، MCNP و ITS از جمله مهمترین کدهای بکار رفته برای تولید طیف اشعه ایکس می‌باشند که در سالهای اخیر مقالات متعددی در این زمینه ارائه شده است [۷، ۱۳، ۱۴ و ۱۵].

یکی دیگر از کدهای چند منظوره برای محاسبات هسته‌ای کد FLUKA است که توانایی شبیه‌سازی مسائل مربوط به ذرات و پرتوهای مختلف را دارد. در کارهای قبلی توانایی کد MCNP جهت تولید طیف اشعه ایکس بررسی شده و نتایج بدست آمده با مقادیر تجربی مورد تأیید قرار گرفته است [۷]. در این مقاله طیف اشعه ایکس در محدوده انرژیهای بین ۸۰ تا ۱۴۰ الکترون ولت توسط کدهای MCNP و FLUKA تولید شده و اثر فیلتر آلومینیوم بر طیف خروجی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱ ویژگیهای FLUKA و MCNP

FLUKA یک کد چند منظوره برای محاسبه ترابرد ذرات و محاسبه اندرکنش آنها با مواد است که می‌تواند در مسائل مختلف مربوط به رادیولوژی، رادیو تراپی و پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان از این کد برای شبیه‌سازی حفاظ‌های مختلف، شتابدهنده‌های الکترون و پروتون، طراحی هدف، کالریمتری، محاسبه اکتیویته، دوزیمتری، طراحی

اشعه ایکس مهم‌ترین و پرکاربردترین ابزار در پزشکی بالینی می‌باشد، که در دو مقوله تصویربرداری و رادیوتراپی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله کاربردهای آن در تصویربرداری می‌توان به دستگاه‌های رادیولوژی، سی تی اسکن و ماموگرافی اشاره کرد. تولید اشعه ایکس بر اساس تاباندن الکترون‌های پرتو انرژی به هدفی با عدد اتمی بالا که بسته به نوع کاربرد از جنس تنگستن، مولیبدن یا آلیاژهای آنها می‌باشد صورت می‌گیرد. طیف اشعه ایکس شامل پرتوهای ناشی از تابش ترمزی و همچنین 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 شده باشد. از آنجایی که اندازه‌گیری طیف اشعه ایکس مشکل بوده و نیاز به تجهیزات خاصی دارد [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵]. تلاش‌های زیادی در جهت رسم طیف اشعه ایکس با استفاده از روش‌های محاسباتی صورت گرفته است. این تلاش‌ها از سال ۱۹۲۳ آغاز شد [۶]. با پیشرفت سخت افزارها و توسعه روش‌های کامپیوتری کارهای جدیدتری برای تولید طیف‌های دقیق‌تر صورت گرفت [۷ و ۸]. بطور کلی روش‌های محاسباتی را می‌توان به سه دسته روش‌های تجربی [۲ و ۹]، روش‌های نیمه تجربی [۱۰ و ۱۱] و شبیه‌سازیهای مونت کارلو [۸، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵] 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 بکارگیری ترکیبات جدید در طراحی هدف و فیلتر و بررسی اثر آن روی کیفیت طیف ایکس خروجی را نمی‌دهند. ولی شبیه‌سازی مونت کارلو این محدودیتها را ندارد و تنها

در طی حرکت الکترون صرف نظر شده و تولید آن در انتهای هر مسیر در نظر گرفته می شود. در روشهای جدید ترابرد الکترون علاوه بر در نظر گرفتن تولید فوتونهای تابش ترمزی تلاش شده که مسیر حرکت الکترونها به گونه ای تقسیم بندی شود که تا حد ممکن کوچک باشد که علاوه بر صادق بودن تئوری چند برخوردی دقت ترابرد الکترونها نیز افزایش یابد.

۲-۲ شبیه سازی طیف اشعه ایکس به کمک کدهای FLUKA و MCNP

جهت شبیه سازی طیف اشعه ایکس از کد MCNP در حالت E,P استفاده شده و تغییری در کارتهای PHYS:E و PHYS:P انجام نشده است. برای محاسبه طیف در قبل و بعد از فیلتر از خروجی F4 استفاده شده است. این خروجی شار را با استفاده از تخمین طول مسیر محاسبه می کند.

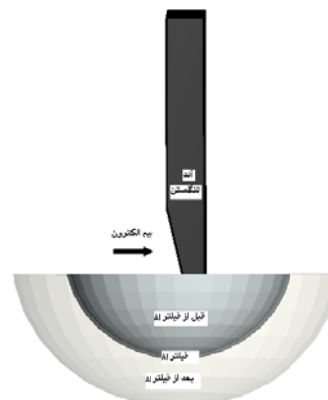
همچنین طیف اشعه ایکس با استفاده از کد FLUKA2006 شبیه سازی شده که برای بالا بردن دقت مساله از کارت DEFAULTS در مود PRECISIO استفاده شده است. کارت MULSOPT برای تبدیل مساله از حالت چند پراکندگی به حالت تک پراکندگی و همچنین کارتهای EMFCUT و EMFFLUO به ترتیب برای کاهش انرژی مورد نیاز تولید فوتون و فعال کردن فوتونهای فلونورسانسی مورد استفاده قرار گرفته اند. از کارت USRTRACK برای محاسبه شار فوتون در قبل و بعد از فیلتر استفاده شده است.

هندسه لامپ اشعه ایکس بطور دقیق در دو نرم افزار شبیه سازی FLUKA و MCNP اعمال شده است. خروج الکترون از کاتد با زاویه مناسب برای نقطه کانونی ۱/۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. آند از جنس تنگستن بوده و زاویه آن ۱۲ درجه است. همچنین قطر فیلتر آلومینیوم ۱/۲ میلی متر در نظر گرفته شده است. (شکل ۱)

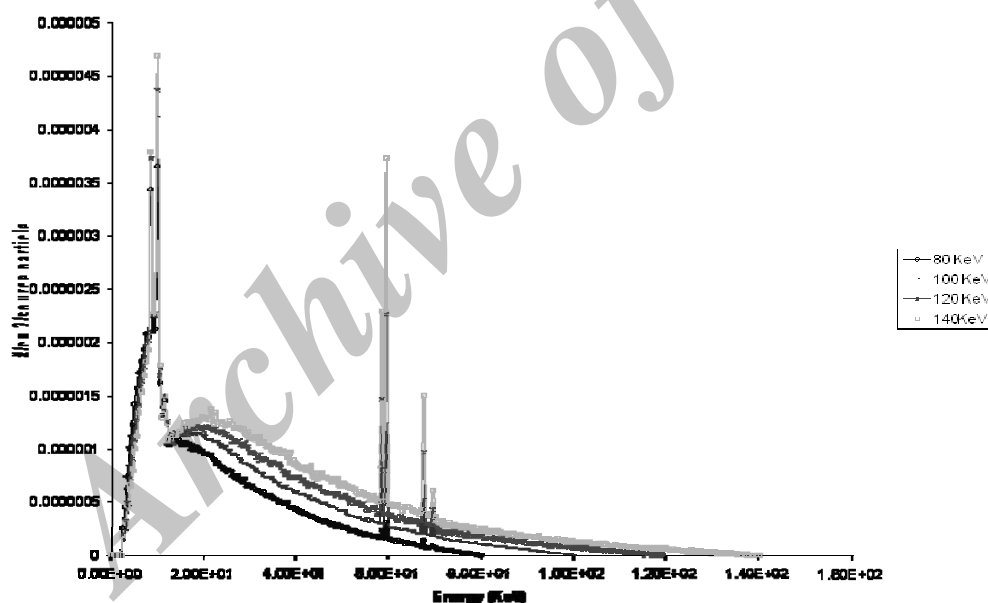
آشکارساز، تابشهای کیهانی و فیزیک نوترینواستفاده کرد. کد FLUKA توانائی شبیه سازی ۶۰ نوع ذره با دقت بالا را دارد که شامل فوتون و الکترون (در دامنه ۱ کیلو الکترون ولت تا هزاران ترا الکترون ولت) نوترینو و موئون در هر دامنه انرژی، هادرونها تا انرژی ۲۰ ترا الکترون ولت و همچنین آنتی ذرات مربوطه، نوترونها و یونهای سنگین می باشد [۱۷ و ۱۸]. این برنامه قابلیت ترابرد فوتونهای پلاریزه شده (نظیر تابش سینکروترون) و فوتونهای نوری را دارد. تحولات زمانی و دنبال کردن تابش هسته های ناپایدار پس ماند نیز توسط FLUKA انجام می شود. کد FLUKA از الگوریتم بدیعی برای ترابرد ذرات باردار استفاده می کند. این الگوریتم شامل بررسی پراکندگی کولمب می باشد که جابجائی عرضی دقیقی حتی در مرزها را انجام می دهد. سطح مقاطع تفاضلی تابش ترمزی و توزیع زاویه ای فوتونهای تابش ترمزی بطور دقیق اعمال می شود. در ناحیه ملایم تابش ترمزی اثرات فرونشانی و پلاریزاسیون در نظر گرفته می شود. در حال حاضر محدودیت انرژی پائین برای الکترونها ۱ کیلو الکترون ولت می باشد. اگر چه در مواد با عدد اتمی بالا مدل چند پراکندگی برای انرژیهای ۲۰-۳۰ کیلو الکترون ولت بی اعتبار می شود، و باید از مدل تک پراکندگی برای این دامنه انرژی استفاده نمود. حداقل انرژی پیشنهادی برای انرژی اولیه الکترون برای موادی با عدد اتمی کم بین ۵۰-۱۰۰ کیلو الکترون ولت می باشد و برای مواد با عدد اتمی بالا بین ۱۰۰-۲۰۰ کیلو الکترون ولت پیشنهاد می شود مگر اینکه از مدل تک پراکندگی استفاده شود که زمان اجرای برنامه را بالا می برد. بر خلاف کد FLUKA که قابلیت انجام ترابرد الکترون به دو روش چند پراکندگی و تک پراکندگی دارد کد MCNP تنها از روش چند پراکندگی استفاده می کند. در این روش از گسیل فوتونهای تابش ترمزی

۳- نتایج

نتایج حاصل از کدهای FLUKA و MCNP برای شار فوتونی در قبل و بعد از فیلتر شکل‌های ۲، ۳، ۴، ۵ ارائه شده است. بازه محاسبات انرژی ۰/۵ کیلو الکترون ولت در نظر گرفته شده است و طیف‌های حاصله بطور جداگانه برای ۴ انرژی ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ کیلو الکترون ولت که محدوده انرژی رادیوگرافی می‌باشد رسم شده است. نتایج بدست آمده به ازای یک الکترون برخوردی به آند نرمالیزه شده اند.

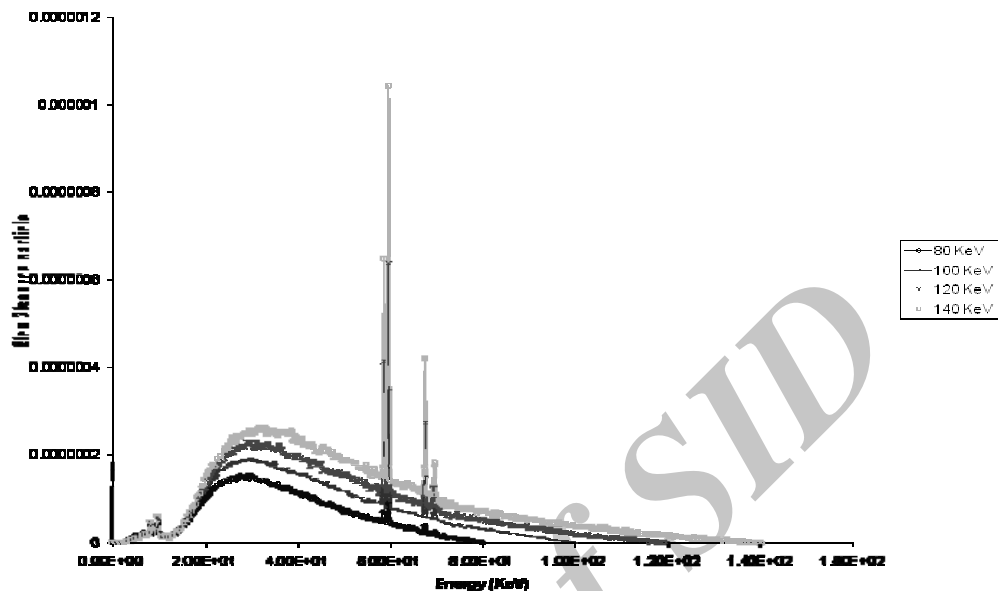


شکل ۱: هندسه لامپ اشعه ایکس

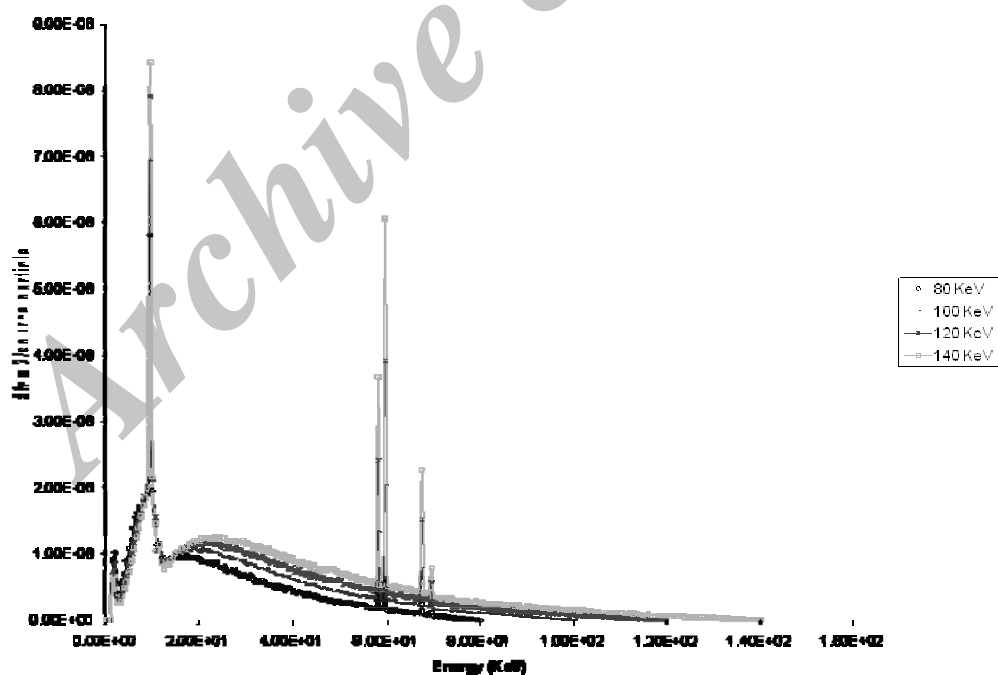


شکل ۲: طیف اشعه ایکس در ۴ انرژی قبل از فیلتر آلومینیومی به کمک کد FLUKA

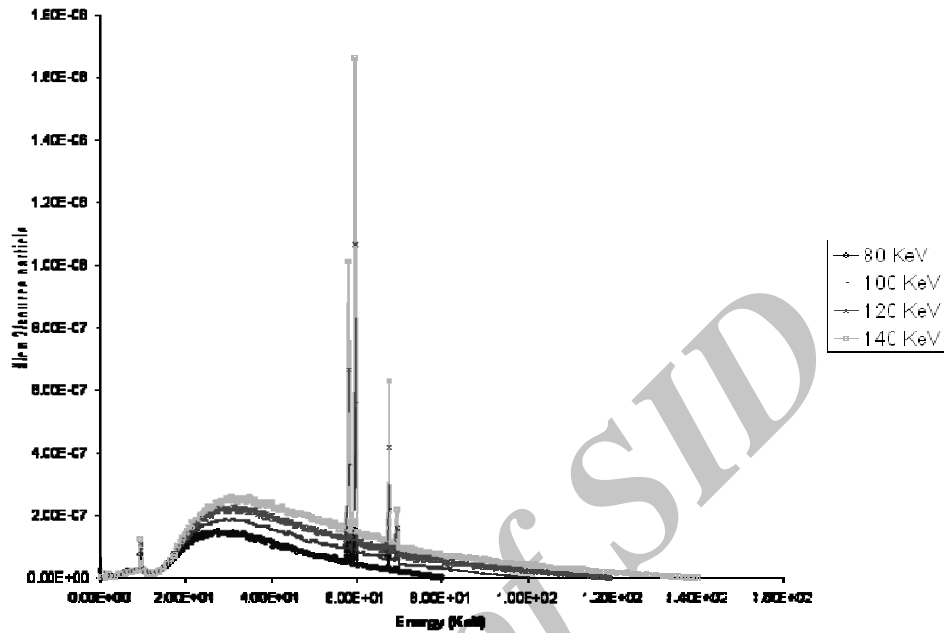
شبیه سازی و طراحی پرتوهای اشعه ایکس با FLUKA



شکل ۳: طیف اشعه ایکس در ۴ انرژی بعد از فیلتر آلومینیومی به کمک کد FLUKA

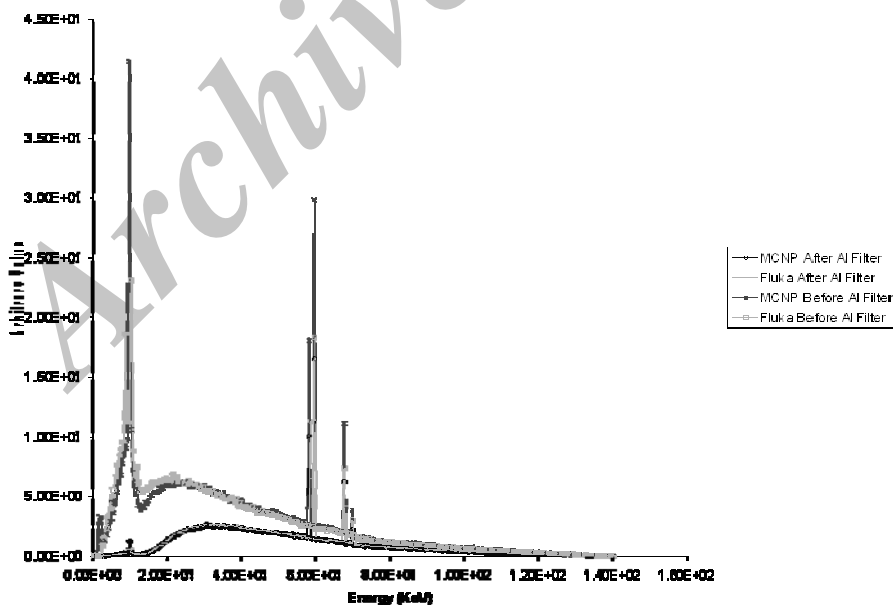


شکل ۴: طیف اشعه ایکس در ۴ انرژی قبل از فیلتر آلومینیومی به کمک کد MCNP



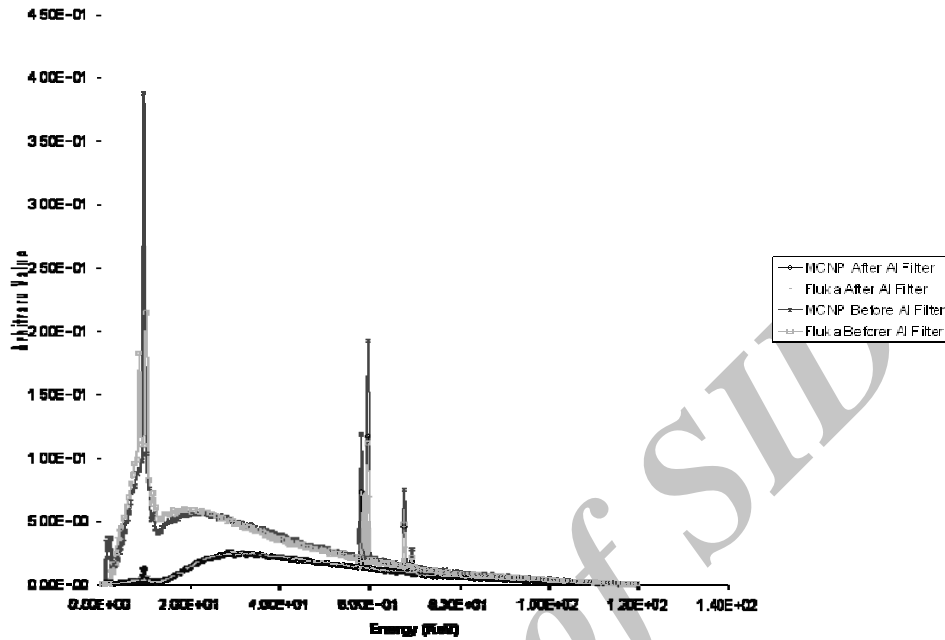
شکل ۵: طیف اشعه ایکس در ۴ انرژی بعد از فیلتر آلومینیومی به کمک کد MCNP

برای بررسی اثر فیلتر طیفهای نرمالیزه شده به میانگین داده ها قبل و بعد از فیلتر برای کدهای FLUKA و MCNP بطور جداگانه در ۴ انرژی ذکر شده مقایسه شده اند. نتایج بدست آمده در شکل‌های ۶، ۷، ۸، و ۹ مشاهده می شوند.

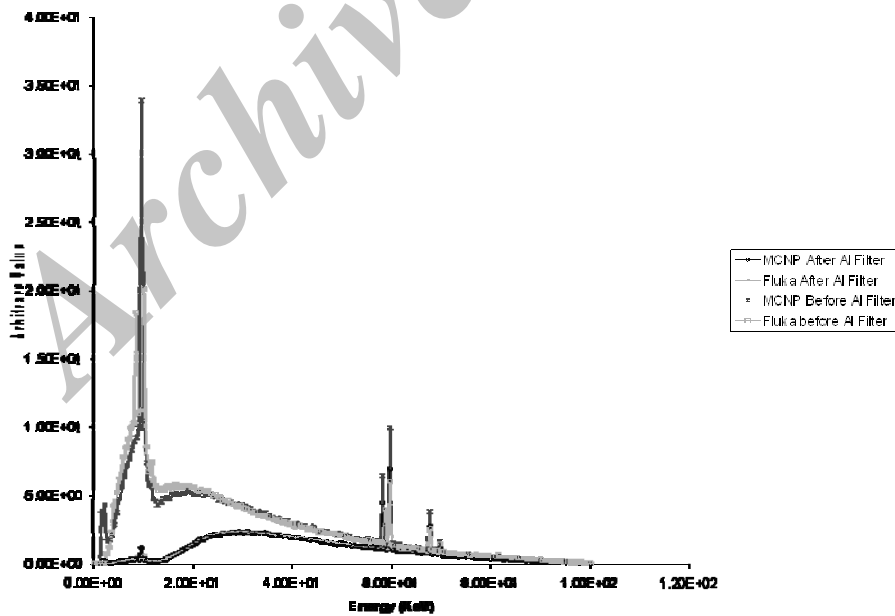


شکل ۶: طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای FLUKA و MCNP

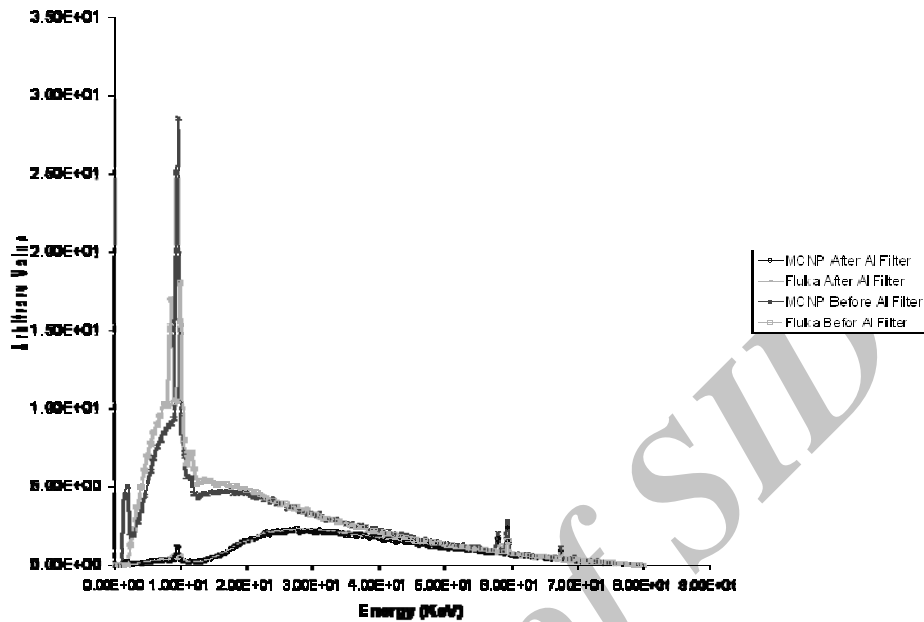
شبیه سازی و طراحی پرتوهای اشعه ایکس با FLUKA



شکل ۷: طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای MCNP و FLUKA

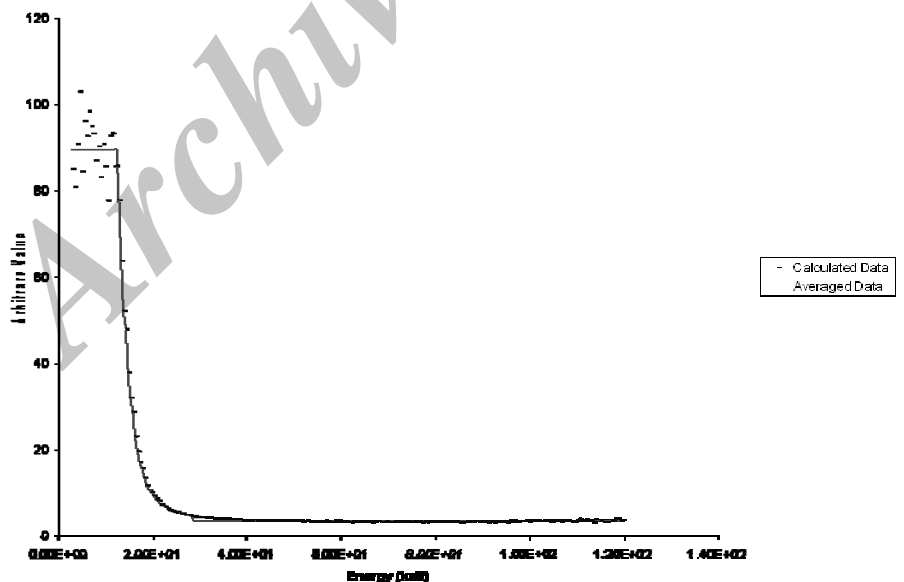


شکل ۸: طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۱۰۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای MCNP و FLUKA



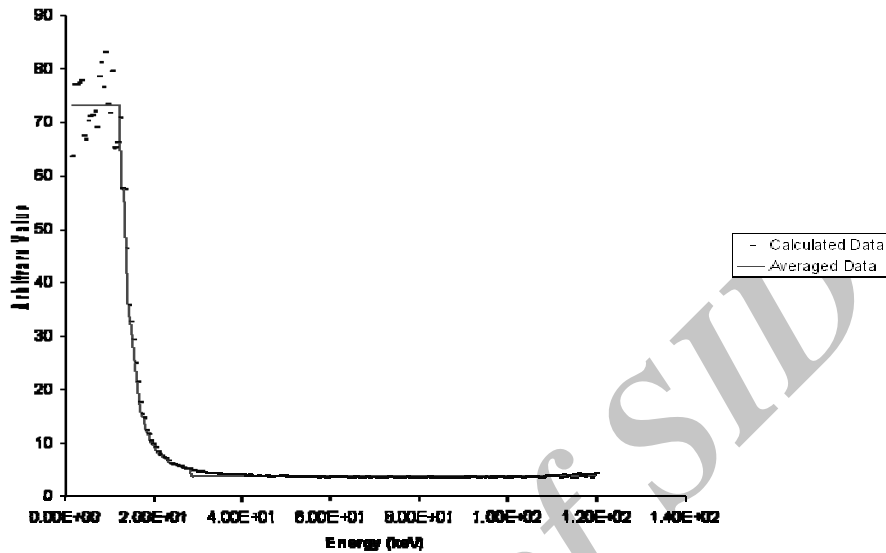
شکل ۹: طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۸۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای MCNP و FLUKA

برای بررسی کیفیت اثر فیلتر، طیف قبل به طیف بعد از فیلتر در شکلهای ۱۰ و ۱۱ رسم شده است. برای کدهای MCNP و FLUKA بطور جداگانه در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت تقسیم شده است و نتایج بدست آمده



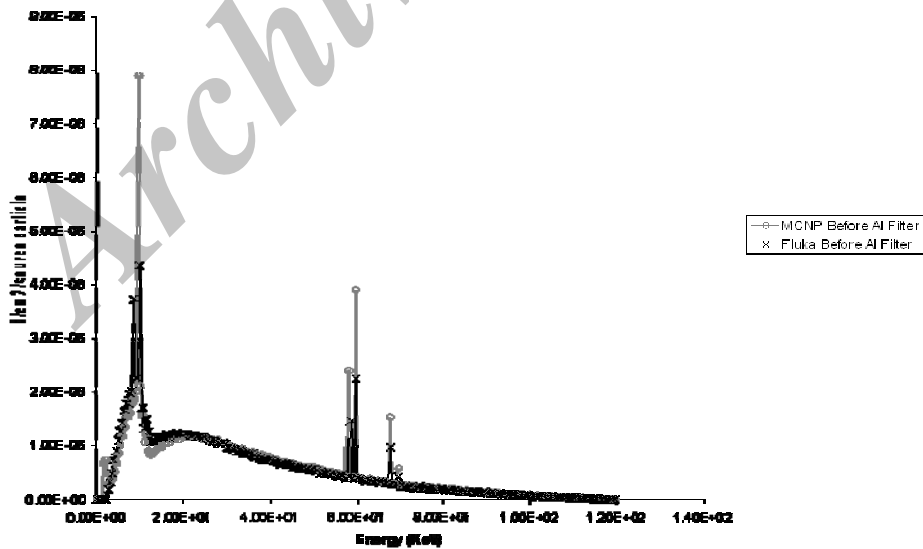
شکل ۱۰: منحنی حاصل از تقسیم طیف قبل به طیف بعد از فیلتر آلومینیومی برای کد FLUKA در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت

شبیه سازی و طراحی پرتوهای اشعه ایکس با FLUKA

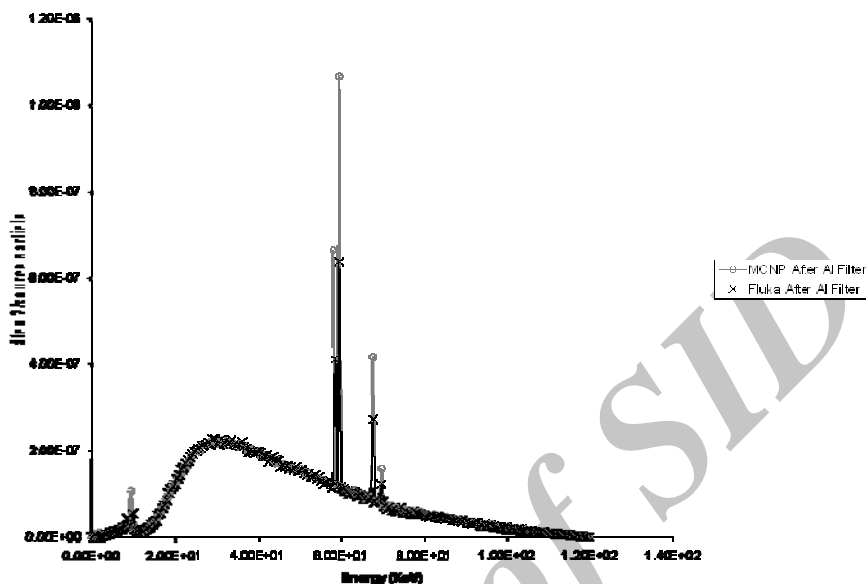


شکل ۱۱: منحنی حاصل از تقسیم طیف قبل به طیف بعد از فیلتر آلومینیومی برای کد MCNP در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت

برای مقایسه محاسبات FLUKA و MCNP نتایج حاصل از این دو کد در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت در شکل ۱۲ و ۱۳ دیده می شود.



شکل ۱۲: طیف اشعه ایکس قبل از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای FLUKA و MCNP



شکل ۰۳. طیف اشعه ایکس بعد از فیلتر آلومینیومی در انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت به کمک کدهای MCNP و FLUKA

۴- بحث

با توجه به نتایج بدست آمده هر دو کد قله های ایکس مشخصه و طیف انرژی پرتوهای تابش ترمزی را بخوبی نشان می دهند با کاهش اختلاف پتانسیل از ۱۴۰ تا ۸۰ کیلو الکترون ولت دامنه قله های ایکس مشخصه به ویژه در محدوده های ۵۰ تا ۸۰ کیلو الکترون ولت به تدریج کاهش می یابد بطوریکه در اختلاف پتانسیل ۸۰ کیلو الکترون ولت دامنه آنها بسیار کوچک می شود. این در حالی است که تضعیف قله های نزدیک به ۱۰ کیلو الکترون ولت به مراتب کمتر است. علت این پدیده مقدار انرژی لازم برای تولید این قله های ایکس مشخصه است، بطوریکه الکترونهای ۸۰ کیلو الکترون ولت انرژی لازم برای تولید ایکسهای مشخصه لایه های بیرونی، نزدیک به ۱۰ کیلو الکترون ولت را دارند در حالیکه احتمال تولید ایکس

مشخصه در لایه k، نزدیک ۶۰ کیلو الکترون ولت، در مقایسه با انرژی های بالاتر به مراتب کمتر می شود. این رفتار در شکل های ۲ تا ۵ بخوبی دیده می شود.

علی رغم رفتار مشابه نتایج کدهای MCNP و FLUKA در محدوده تابش ترمزی، دامنه فوتونهای ایکس مشخصه که توسط این دو کد محاسبه شده است تفاوت قابل توجهی دارند. شکل ۱۲ این موضوع را به وضوح نشان می دهد. با اینکه دامنه طیف در ناحیه تابش ترمزی منطبق بر هم است ولی قله های ایکس مشخصه بدست آمده از شبیه سازی کد MCNP حدود ۱/۵ برابر مقادیر حاصل از کد FLUKA می باشند. با توجه به کارهای قبلی مقادیر حاصل از شبیه سازی کد MCNP در حدود ۱/۲ مقادیر آزمایشگاهی بود [۷ و ۱۳]. بنابر این می توان

۵- نتیجه گیری

از آنجاکه اندازه گیری طیف اشعه ایکس قبل از فیلتر ممکن نمی باشد شبیه سازی مونت کارلو مناسب ترین روش برای این منظور می باشد و مقایسه کمی طیفهای قبل و بعد از فیلتر امکان طراحی لامپ اشعه ایکس را فراهم می کند. علی رغم اختلافات موجود بین دو کد FLUKA و MCNP در شبیه سازی طیف اشعه ایکس که بیشتر در قله های ایکسهای مشخصه مشاهده می شود، و از آنجایی که در بررسی کیفیت طیفهای اشعه ایکس و اثر فیلترهای مختلف روی آنها عمدتاً طیف حاصل از پدیده ترمزی مد نظر است لذا می توان گفت، هر دو کد FLUKA و MCNP برای شبیه سازی طیف اشعه ایکس مناسب می باشند.

گفت که کد FLUKA نیز تقریباً همان مقدار خطا را با تقریب نقصانی محاسبه می کند. نکته حائز اهمیت دیگر اثر فیلتر بر طیف پرتوهای ایکس است. این اثر در شکل‌های ۶ تا ۹ دیده می شود. برای بررسی اثر فیلتر انرژی ۱۲۰ کیلو الکترون ولت انتخاب شده است. فیلتر آلومینیومی طیف انرژی ناحیه پائین تر از ۱۲ کیلو الکترون ولت را برای کدهای FLUKA و MCNP به ترتیب حدود ۹۰ و ۷۳ برابر و طیف انرژی ناحیه بالاتر از ۲۴ کیلو الکترون ولت را برای کدهای FLUKA و MCNP به ترتیب حدود ۳/۶ و ۳/۷ برابر تضعیف می کند. نکته جالب ثابت بودن میزان تضعیف انرژیهای بالاتر از ۲۴ کیلو الکترون ولت است که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دیده می شود. بنابراین نقش مهم فیلتر آلومینیوم مبنی بر حذف ناحیه کم انرژی و تخت کردن طیف اشعه ایکس با توجه به شبیه سازیهای انجام شده به خوبی مشاهده می گردد.

منابع

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. Fewell T R, Shuping R E and Healy K E. Handbook of Computed Tomography X-Ray Spectra HHS publication (FDA) 81-8162 (Washington, DC: US Govt. Printing Office) 1981.
3. Antonuk L E, el-Mohri Y, Siewerdsen J H, Yorkston J, Huang W, scarpine V E and Street R A. Empirical investigation of the signal performance of a high-resolution, indirect detection, active matrix flat-panel imager (AMFPI) for fluoroscopic and radiographic operation Med Phys 1997; 24: 51-70.
4. 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.
5. Wilkinson L E, Johnston P N and Heggie J C. A comparison of mammography spectral measurements with spectra produced using several different mathematical models Phys Med Biol 2001; 46: 1575-89.
6. Kramers H A. On the theory of x-ray absorption and of the continuous x-ray spectrum Phil Mag 1923; 46: 836-71.

7. 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 MCNPM Phys Med Biol 2004; 49: 4897-4917.
8. Ben Omrane L, Verhaegen F, Chahed N and Mtimet S. An investigation of entrance surface dose calculations for diagnostic radiology using Monte Carlo simulations and radiotherapy dosimetry formalisms Phys Med Biol 2003; 48: 1809-24.
9. 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.
10. Birch R and Marshall M. Computation of bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector Phys Med Biol 1979; 24: 505-17.
11. Tucker DM, Barnes G T and Chakraborty D P. Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra Med Phys 1991; 18: 211-8.
12. Kulkarni R N and Supe S J. Monte Carlo calculations of mammographic x-ray spectra Phys Med Biol 1984; 29: 185-90.
13. Verhaegen F, Nahum A E, Van de Putte S and Namito Y. Monte Carlo modelling of radiotherapy kV x-ray units Phys Med Biol 1999; 44: 1767-89.
14. Ng K P, Kwok C S and Tang F H. Monte Carlo simulation of x-ray spectra in mammography Phys Med Biol 2000; 45: 1309-18.
15. Bhat M, Pattison J, Bibbo G and Caon M. Off-axis x-ray spectra: a comparison of Monte Carlo simulated and computed x-ray spectra with measured spectra Med Phys 1999; 26: 303-9.
16. O'Meara J M, Chettle D R, McNeill F E, Prestwich W V and Svensson C E. Monte Carlo simulation of source-excited in vivo x-ray fluorescence measurements of heavy metals Phys Med Biol 1998; 43: 1413-28.
17. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, and P.R. Sala, FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
18. Fasso, A. Ferri, S. Roesler, P.R. Sala, G. Battistoni, F. Cerutti, E. Gadioli, M.V. Garzelli, F. Ballarini, A. Ottolenghi, A. Empl and J. Ranft, The physics models of FLUKA: status and recent developments, Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003), La Jolla, CA, USA, March 24-28, 2003, (paper MOMT005), eConf C0303241 (2003).