



دانشگاه گیلان

طراحی مفهومی سیستم پرتوئی پایشگر مواد با استفاده از اشعه ایکس - دو انرژی

علیرضا، مازوچی^۱؛ فریدون، عباسی دوانی^{۱*}؛ فائزه، رحمانی^۱؛ محمد عماد، عادلای خواه^۲

^۱دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

^۲دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه چرخه سوخت هسته‌ای

چکیده

در این مقاله به طراحی مفهومی سیستم پرتوئی پایشگر اشعه X دو انرژی شامل لامپ ۱۶۰ kV اشعه X، هم سوساز و آشکارساز چندطبقه پرداخته شده است. محاسبات طراحی با کد MCNPX به منظور طراحی هم سوساز و انتخاب نوع آشکارساز و نیز ضخامت‌های آنها انجام شده است. اشعه X توسط هم سوسازی که در این سیستم طراحی شده، باریکه‌ی ۳۰×۱۰ درجه خروجی تیوب را به باریکه‌ی پروانه‌ای شکل^۱ تبدیل می‌نماید. فوتون‌های عبوری توسط آرایه‌ای از آشکارساز خطی چند لایه‌ای سوسوزن-فوتودیود شامل CsI(Tl) و ZnSe(Te) به ترتیب با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر شمرده می‌شوند. محاسبات با خطای نسبی کمتر از ۱٪ انجام شده است.

کلید واژه: پایشگر مواد با دو انرژی، فیلتر لبه‌ی K، آشکارساز چندطبقه، کد MCNPX

مقدمه

در رادیوگرافی و توموگرافی، تصویربرداری با اشعه X تک انرژی تنها اطلاعاتی در مورد چگالی جسم مورد آزمایش فراهم می‌آورد که این روش برای تشخیص دقیق اشیاء بخصوص در حالتی که فوتون از چند عنصر مختلف عبور می‌کند، کافی نمی‌باشد [۱]. حتی این سیستم‌ها در تمیز دادن یک ورق نازک که جاذب قوی می‌باشد با یک ورق ضخیم که جاذب ضعیفی می‌باشد ناتوان هستند. لذا با توجه به محدودیت ذاتی این روش، استفاده از سیستم‌های دو انرژی پیشنهاد می‌شود. روش انرژی دوگانه‌ی اشعه X با ترکیبی از دو طیف مستقل انرژی، برای تخمین عدد اتمی و چگالی به منظور کسب اطلاعات در مورد ترکیب ماده استفاده می‌شود [۲-۳]. در این سیستم باید بهینه‌سازی پارامترهایی مانند قله‌ی انرژی بهینه و خصوصیات آشکارسازها انجام شود. در این مقاله، محاسبات مربوط به طراحی یک پایشگر اشعه X دو انرژی با استفاده از لامپ ۱۶۰ kV اشعه X، آرایه‌ای خطی از آشکارسازهای چند لایه‌ی سوسوزن-فوتودیود و هم سوساز انجام شده است. تعیین ضخامت تیغه‌های هم سوساز و نیز مواد آشکارسازی به همراه ضخامت مناسب با کد MCNPX انجام شده است.

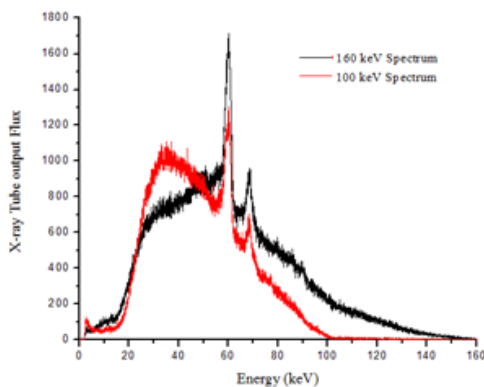
^۱ Fan beam

روش کار

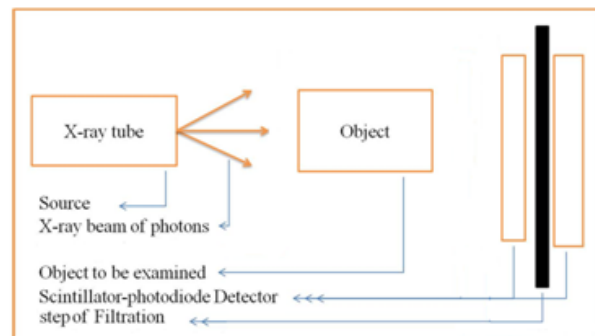
در سیستم‌های تصویربرداری دوانرژی، جهت تشخیص مواد از مؤلفه‌ی R استفاده می‌شود تا پاسخ خروجی وابستگی‌ای در برابر تغییرات ضخامت نداشته باشد. این مؤلفه مطابق با رابطه ۱ تابعی از سیگنال عبوری ناشی از طیف انرژی پایین (TL) و طیف انرژی بالا (TH) می‌باشد.

$$R = \frac{\log(T_L/T_L)}{\log(T_H/T_H)} \quad (1)$$

در سیستم‌های بازرسی اشعه X دوانرژی جهت کاهش هم پوشانی بین دو طیف انرژی از یک طبقه‌ی فیلترسازی بعد از عبور پرتو از ماده و بین طبقات آشکارساز استفاده می‌شود. آرایش مناسب برای یک سیستم پیشگر اشعه X دوانرژی در شکل (۱-الف) نمایش داده شده است.



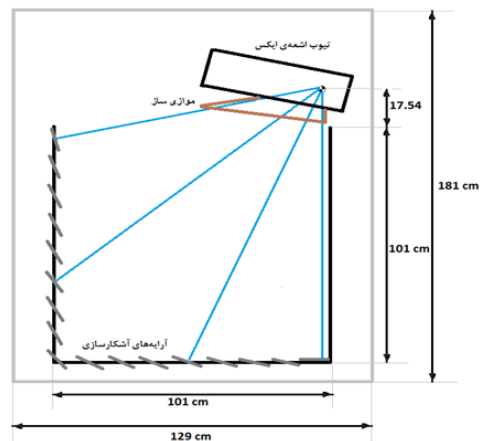
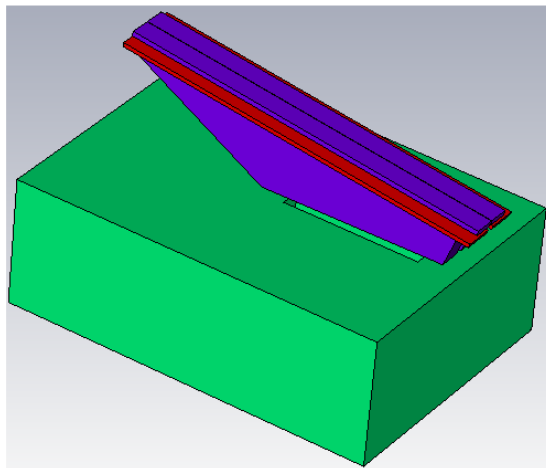
(ب)



(الف)

شکل ۱. الف) نمایی از چشمه، فیلتر و ترتیب آشکارسازها (ب) طیف‌های خروجی از آند تنگستن یک لامپ اشعه X ایکس چشمه‌ی فوتون استفاده شده، یک لامپ اشعه X با ولتاژ ۱۶۰ kV با جریان ۱ mA است. باریکه خروجی از چشمه، طیف پیوسته‌ای از فوتون‌های X-ray می‌باشد (شکل ۱-ب). برای رسیدن به نتایج مطلوب ناشی از برخورد تابش ایکس خروجی از تیوب با جسم مورد بازرسی، باید هم سوسازی طراحی و تعبیه شود تا بسته‌ی مورد نظر به صورت مقطع به مقطع روی تسمه نقاله‌ی در حال حرکت، مورد تابش قرار گیرد و تصویری با قدرت تفکیک مطلوب بر روی صفحه نمایش مشاهده شود. هم سوسازی که در این سیستم طراحی شده، باریکه‌ی ۳۰×۸۰ درجه خروجی تیوب را به باریکه‌ی پروانه‌ای شکل تبدیل می‌نماید. از آنجا که آرایه‌های آشکارسازی به صورت L مانند و در دو وجه روبرویی چشمه قرار می‌گیرند، هم سوساز باید به گونه‌ای طراحی

شود تا تمام آرایه‌ها در معرض تابش ایکس قرار بگیرند (شکل ۲-الف). اتاقک تابش در نظر گرفته شده برای این کار ابعادی حدود 100×100 سانتیمتر مربع دارد. هم سوساز طراحی شده مطابق با شکل (۲-ب)، از یک بدنه و دو تیغه‌ی سربی تشکیل شده که جهت ایجاد پنجره‌ی هم سوساز و تولید باریکه‌ی پروانه‌ای شکل به فاصله‌ی بسیار کمی در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند.



شکل ۲. الف) نحوه‌ی قرارگیری تیوب، هم سوساز و آرایه‌های آشکارسازی در سیستم بازرسی چمدانی (ب) نمایی از ساختار هم سوساز و نحوه‌ی قرارگیری آن بر روی تیوب

در این طراحی، فاصله‌ی نقطه‌ی کانونی تیوب تا تیغه‌های سربی ۱۴ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در محاسبه عرض روزنه هم سوساز باید دورترین فاصله از آرایه‌های آشکارسازی که برابر با $155/05$ سانتی متر می باشد، در نظر گرفته شود زیرا سطح مقطع باریکه با افزایش مسافت پهن تر می‌شود و اگر سطح مقطع باریکه بیشتر از عرض پیکسل‌ها ($3/5$ میلی‌متر) باشد، موجب از بین بردن هم سنجی تصویر می‌گردد. با استفاده از شبیه سازی با کد MCNPX حداقل ضخامت سرب جهت هم سوسازی کردن پرتوها محاسبه شده است. ابتدا یک میله‌ی آلومینیومی به قطر ۲ میلی‌متر را در مقابل هم سوساز قرار داده و برای ضخامت‌های مختلفی از سرب، شار انرژی پایین، شار انرژی بالا و مؤلفه R محاسبه شد. سپس برای مشاهده‌ی تأثیر ضخامت تیغه‌ها و بدنه‌ی هم سوساز بر سیگنال خروجی، در کنار این میله‌ی آلومینیومی، صفحات پلاستیکی قرار داده شده و مراحل بالا دوباره تکرار شده است. نتایج این شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده است.



جدول ۱: خطای سیستم در ضخامت‌های مختلفی از بدنه و تیغه‌های سربی به کاررفته در هم سوساز

خطای نسبی (%)	آلومینیوم + پلاستیک			آلومینیوم			ضخامت سرب (میلی متر)
	R _r	T _H	T _L	R _r	T _H	T _L	
۳/۲۱	۲/۳۷	۱۶۰/۶۰	۲۳/۵۲	۲/۳۰	۱۵۰/۴۸	۲۱/۷۰	۰/۵
۱/۹۶	۲/۲۴	۱۲۵/۳۶	۲۰/۴۴	۲/۱۹	۱۲۱/۴۰	۲۰/۲۰	۱
۰/۹۵	۲/۱۷	۱۱۶/۶۰	۲۰/۲۲	۲/۱۹	۱۱۶/۷۶	۲۰/۰۲	۲
۰/۸۶	۲/۱۶	۱۱۴/۸۶	۲۰/۱۰	۲/۱۸	۱۱۵/۳۰	۱۹/۸۰	۳
۰/۸۰	۲/۱۶	۱۱۳/۶۸	۱۹/۹۸	۲/۱۸	۱۱۴/۲۰	۱۹/۶۵	۴
۰/۷۷	۲/۱۵	۱۱۲/۶۲	۱۹/۹۰	۲/۱۷	۱۱۳/۱۶	۱۹/۵۵	۵

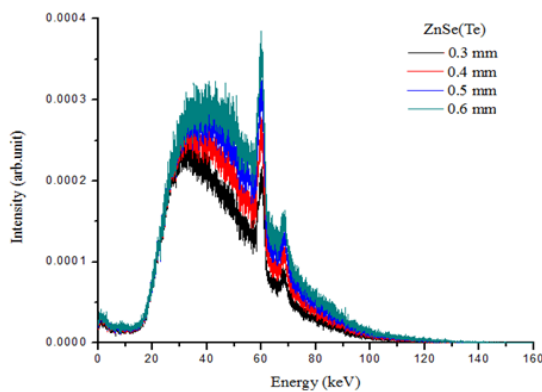
همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت تیغه‌های سربی هم سوساز دقت تشخیص آلومینیوم هم افزایش می‌یابد، پس کمترین ضخامت سرب ۲ میلی‌متر می‌باشد و در ضخامت‌های بیشتر بهبود چندانی در دقت سیستم دیده نمی‌شود.

بر اساس آنچه بیان شد، عرض شیار هم سوساز بر اساس روابط ۲ و ۳ بدست می‌آید:

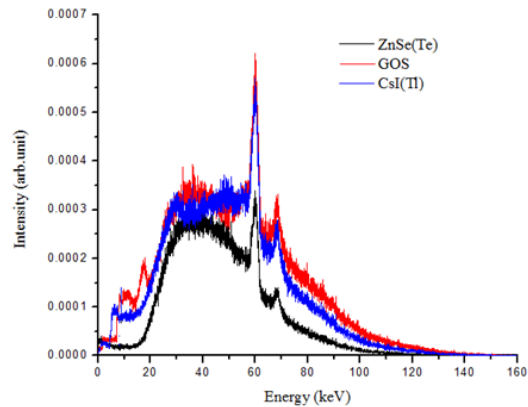
$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{عرض پیکسل‌ها}}{\text{حداکثر فاصله آشکارساز تا تیوب}} = \tan^{-1} \frac{۳.۵}{۱۵۵۰.۵} = ۰.۱۲۹۳ \quad (۲)$$

$$\text{عرض شیار هم سوساز} = ۱۴ \times \tan \theta = ۳۱۶ \mu\text{m} \quad (۳)$$

در ادامه برای آشکارسازی انرژی، یک آشکارساز دو طبقه طراحی شده است. هر طبقه، یک آشکارساز سوسوزن- فوتودیود می‌باشد که توسط یک فیلتر فلزی میانی به منظور حذف انرژی‌های پایین، از هم جدا شده‌اند. طبقه‌ی بالاتر می‌تواند یا از نوع GOS(Gd₂O₂S(Tb)) (ترکیبی غیر آلی بصورت پودر سفید با چگالی ۷/۳۲ gr/cm^۳) یا از نوع ZnSe(Te) باشد [۴]. ZnSe(Te) برای آشکارسازی انرژی‌های پایین به علت بازدهی بالاتر، مناسب تر است و فیلتر خوبی برای آشکارساز انرژی بالا می‌باشد، زیرا عدد اتمی مؤثر آن تقریباً برابر با عدد اتمی مس که معمولاً از آن به عنوان فیلتر میانی استفاده می‌شود، می‌باشد. همانطور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، تضعیف آشکارساز ZnSe در انرژی‌های بالا به علت چگالی کمتر، پایین تر از تضعیف GOS می‌باشد. از آنجا که ZnSe(Te) شفافیت خوبی ندارد استفاده از آن در ضخامت‌های بالاتر از ۳ تا ۴ میلی‌متر پیشنهاد نمی‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) طیف دریافتی از 0.6 mm فسفر GOS و ZnSe(Te) ب) طیف دریافتی از ۴ ضخامت مختلف از ZnSe(Te) شکل (۳-ب) شدت پرتو آشکار شده برای چهار ضخامت مختلف از ZnSe(Te) را نشان می دهد. این آشکارساز برای آشکارسازی انرژی های پایین انتخاب شده است. برای انتخاب موثرترین ضخامت باید از رابطه ۴ استفاده نماییم.

$$(۴) \quad \text{بازدهی آشکارسازی انرژی کم} = \frac{\text{ارتفاع پالس دومین قله انرژی پایین}}{\text{ارتفاع پالس قله انرژی بالا}}$$

بازدهی آشکارسازی انرژی پایین برای ضخامت های 0.3 تا 0.6 میلی متر محاسبه شده است (جدول ۲). مطابق با این نتایج، ضخامت 0.3 میلی متر بهترین گزینه برای فیلتر ZnSe(Te) می باشد. لازم به ذکر است که رشد بلورهای سوسوزنی در ضخامت های کمتر از 0.3 میلی متر بسیار دشوار می باشد، بطوریکه طی تحقیقات بدست آمده، کمترین ضخامت انواع مواد سوسوزنی تجاری که به صورت بلوری ساخته می شوند، 0.3 میلی متر می باشد.

جدول ۲. بازدهی آشکارساز ZnSe(Te) در ضخامت های مختلف

Thickness(mm)	۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۶
$\frac{LE^2 \text{ Pulse Height}}{HE \text{ Pulse Height}}$	۴.۴۹۰	۴	۳.۵۲۹	۳.۲۷۰

برای آشکارساز انرژی بالا (HE)، عموماً CsI(Tl)، GOS و CdWO_۴ بصورت تجاری در دسترس هستند که در ضخامت ۵ میلی متر مقایسه شده اند [۵]. با توجه به بررسی های بدست آمده تمامی آشکارسازها دارای حساسیت یکسانی به ناحیه ی انرژی های بالا می باشند. در نتیجه برای انتخاب ماده ی سوسوزنی این طبقه، بهترین گزینه ماده ای است که خصوصیات سوسوزنی و طول موجی بهتری داشته باشد و امکان تولید آن در



داخل کشور وجود داشته باشد. از این سه آشکارساز، CsI(Tl) دارای مشخصه‌هایی همچون بازدهی بالا، بهره‌ی نوری بالا و چگالی $4/51 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد که بطور گسترده‌ای در آشکارسازی فوتون‌های با انرژی متوسط به بالا استفاده می‌شود. در طراحی سیستم آشکارسازی بین دو طیف انرژی پایین و انرژی بالا هم پوشانی وجود دارد. لذا توانایی سیستم در استخراج اطلاعات دو انرژی و تشخیص مواد از هم کاهش خواهد یافت. برای حل این مشکل، یک فیلتر مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر جهت تضعیف سیگنال انرژی بالا و کاهش اثر هم پوشانی بین دو آرایه‌ی آشکارسازی قرار داده می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

در طراحی مفهومی سیستم پرتوئی پایشگر اشعه X دو انرژی بر اساس شبیه سازی با کد MCNPX، هم سوسازی طراحی شده که دو تیغه‌ی سربی به ابعاد $38/5 \times 2/25$ سانتیمتر و ضخامت ۲ میلی‌متر را شامل می‌شود. این دو تیغه سربی جهت ایجاد پنجره‌ی هم سوساز و تولید باریکه‌ی پروانه‌ای شکل به فاصله‌ی ۳۱۶ میکرومتر در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. فوتون عبوری از مواد نیز باید قابل آشکارسازی باشد. از میان آشکارسازها ZnSe(Te) با ضخامت $0/3$ میلی‌متر و CsI(Tl) با ضخامت ۵ میلی‌متر برای تفکیک دو قله‌ی انرژی در خروجی بهترین رفتار را نشان دادند. با توجه به وجود دو قله انرژی و قابلیت تفکیک این انرژی‌ها، این سیستم می‌تواند به عنوان تبعیض‌گر مواد، تخمین عدد اتمی و اندازه گیری چگالی با دقت بالاتر نسبت به سیستم‌های تک انرژی استفاده شود.

مراجع

- [۱] Rebuffel, V. and J.M. Dinten, ۲۰۰۷. "Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits", Insight, ۴۹(۱۰):۵۸۹-۵۹۴.
- [۲] Balles A., S. Zabler, Th. Ebersperger, R. Hanke, Optimized detector concept for inline phase contrast and Born-type retrieval algorithms using polychromatic micro- and nano-focus X-ray Sources, St. Petersburg, Russia, ۲۰۱۲.
- [۳] Jia, H., Li, Z., Yuxiang, X., Kejun, K., & Yongshun, X. (۲۰۱۰, October). Material discrimination study of dual-energy imaging using photon counting detector. In Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), ۲۰۱۰ IEEE (pp. ۵۲۴-۵۲۷). IEEE.
- [۴] Cha, B. K., Kim, J. Y., Kim, T. J., Sim, C., & Cho, G. (۲۰۱۰). Fabrication and imaging characterization of high sensitive CsI (Tl) and Gd 209 S(Tb) scintillator screens for X-ray imaging detectors. Radiation Measurements, ۴۵(۳), ۷۴۲-۷۴۵.
- [۵] Mazoochi, A., Rahmani, F., Abbasi, D. F., ghaderi, R. (۲۰۱۳). Optimum Design of Multi-layer K-edge Filter and Multi-stage Detectors for Triple Energy Bone Densitometer. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.