



## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بازدهی سیستم تصویربرداری کامپتون مبتنی بر آشکارسازهای نیمه‌رسانا با استفاده از کد کامپیوتری GEANT4

نیکنامی، مصطفی<sup>(۱)</sup> - ابراهیمی لوشاب، مهدی<sup>(۲)</sup> - حسینی، سید ابوالفضل\*<sup>(۱)</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

<sup>۲</sup> دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان رضوی، دانشکده شهید رجایی، گروه فیزیک

### چکیده:

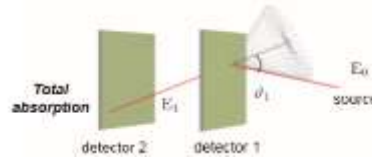
تصویر کامپتونی یک تکنیک تصویربرداری است که در آن از پراکندگی کامپتون برای ایجاد تصاویر از یک چشمه تابش گاما استفاده می‌شود. بازدهی در دوربین‌های کامپتون بصورت کسری از فوتون‌های وارد شده به آشکارساز پراکننده که یک پراکندگی کامپتون انجام داده‌اند و سپس بطور کامل توسط پدیده فتوالکتریک در آشکارساز جاذب، جذب شده‌اند، تعریف می‌شود. در این پژوهش بازدهی سیستم تصویربرداری کامپتون، برای چند نوع چشمه گاما و همچنین آشکارسازهای نیمه‌رسانا مختلف، با استفاده از ابزار GEANT4، بررسی شده است و در نهایت آنالیز حساسیت بازدهی نسبت به پارامترهای مختلف تاثیرگذار صورت گرفته است.

**کلمات کلیدی:** سیستم تصویربرداری کامپتون، آشکارساز نیمه‌رسانا، GEANT4، بازدهی.

### مقدمه:

سیستم‌های تصویربرداری کامپتونی تحت عنوان دوربین‌های کامپتونی<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند. طراحی پایه در سیستم‌های تصویربرداری کامپتونی مطابق شکل (۱)، شامل دو صفحه آشکارساز که حساس به موقعیت و انرژی پرتوهای گاما است. اصول دوربین کامپتون اینگونه است که فوتون‌ها از یک چشمه پرتوزا گسیل می‌شوند و در آشکارساز نخست (پراکننده) دستخوش پراکندگی کامپتون می‌گردند و سپس در آشکارساز دوم (جاذب) جذب می‌شوند. این دو آشکارساز در یک مد همزمانی عمل می‌نمایند، بدین طریق فوتون‌ها به صورت الکترونیکی و بدون محدود کردن جهت ورودشان شناسایی می‌شوند. اصل دوربین‌های کامپتون در ابتدا توسط آقای Everett و همکارش در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای و توسط آقای Schnfelder و همکارش در فیزیک نجومی پیشنهاد شد [۱، ۲].

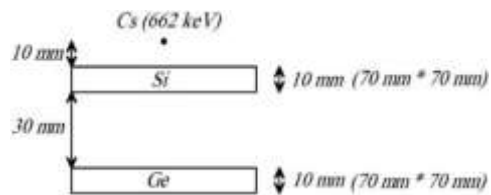
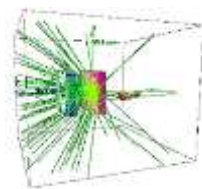
<sup>۱</sup> Compton camera



شکل (۱): نمایی ساده از دوربین کامپتون [۳].

## روش کار:

در این پژوهش، یک نمونه ساده از سیستم تصویربرداری کامپتون براساس دو صفحه آشکارساز پراکننده (رنگ صورتی) و آشکارساز جاذب (رنگ آبی) از جنس نیمه‌رسانا مطابق شکل (۲) طراحی و توسط ابزار مونت کارلویی GEANT4 شبیه‌سازی شده است. برای ساخت مواد تشکیل‌دهنده سیستم تصویربرداری از کلاس‌های G4Element، G4Material و برای ساخت چشمه پرتوزا از کلاس اجباری تولید ذرات اولیه از نوع GPS بصورت نقطه‌ای، توزیع زاویه‌ای همسانگرد و تک انرژی در شبیه‌سازی استفاده شده است. برای توصیف فرآیندهای الکترومغناطیسی و ساخت فهرست فیزیکی<sup>۴</sup> در بازه انرژی‌های مورد نیاز (۱۰ MeV تا ۱ keV)، از مدل استاندارد و همچنین برای بدست آوردن رویدادهای صحیح و مورد نظر، که برای بازدهی لازم است، از کلاس مدیریت گام<sup>۵</sup> و ساخت یک کلاس به زبان C++ استفاده شده است. در این پژوهش، آنالیز حساسیت تغییر پارامترهای مختلف در بازدهی سیستم تصویربرداری کامپتون برای بدست آوردن پارامترهای بهینه مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) خصوصیات آشکارسازهای نیمه‌رسانا مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است. چشمه‌های پرتوزا  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{54}\text{Mn}$ ،  $^{22}\text{Na}$ ،  $^{131}\text{I}$ ،  $^{198}\text{Au}$ ،  $^{11}\text{C}$  به همراه انرژی فوتون‌هایی که با بیشترین احتمال گسیل می‌کنند، در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۴].



شکل (۲): طراحی سیستم تصویربرداری کامپتون با یک چشمه سزیم (سمت راست). شبیه‌سازی با ابزار GEANT4

(سمت چپ).

<sup>۱</sup>G4UserPrimaryGeneratorAction

<sup>۲</sup>G4GeneralParticleSource

<sup>۳</sup>Physics list

<sup>۴</sup>Stepping action

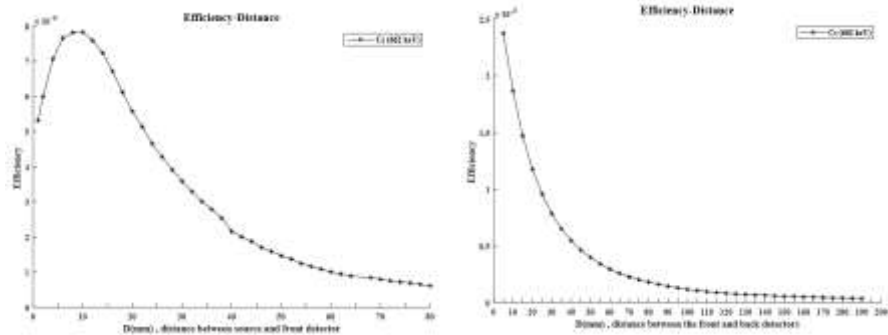


جدول (۱): خصوصیات آشکارسازهای نیمه‌رسانا مورد استفاده در شبیه‌سازی (سمت راست) [۵].

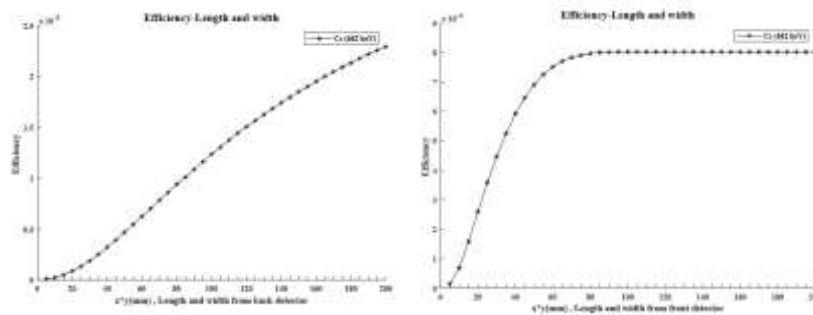
چگالی ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	انرژی لازم برای تولید زوج (eV)	گاف انرژی (eV)	عدد اتمی	ماده
۲/۳۳	۳/۶۵ (۳۰۰K)	۱/۱۰۶ (۳۰۰K)	۱۴	Si
۵/۳۳	۲/۹۶ (۷۷K)	۰/۶۷ (۷۷K)	۳۲	Ge
۶/۰۶	۴/۴۳ (۳۰۰K)	۱/۴۷ (۳۰۰K)	۴۸, ۵۲	CdTe
۶/۰۴	۴/۲۲ (۳۰۰K)	۲/۱۳ (۳۰۰K)	۸۰, ۵۳	HgI <sub>۲</sub>
۵/۳۲	۴/۵۱ (۳۰۰K)	۱/۴۵ (۳۰۰K)	۲۱, ۳۳	GaAs
۶	۴/۶۴ (۳۰۰K)	۱/۵۷ (۳۰۰K)	۴۸, ۵۲, ۳۰	CdTeZn

### نتایج:

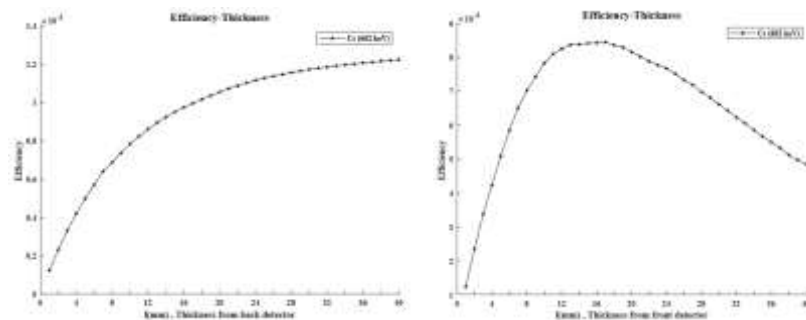
نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مختلف برای شکل (۲) و برای تعداد رخدادهای یکسان در سیستم تصویربرداری کامپتون شبیه‌سازی شده و نتایج بازدهی برای هر پارامتر در جدول‌ها و شکل‌های زیر آمده است. نتایج حاصل برای بازدهی ناشی از تغییرات فاصله بین دو آشکارساز، فاصله بین چشمه پرتوزا، تغییر ابعاد صفحه آشکارسازها، تغییر ضخامت آشکارسازها و برای بازه انرژی (۱۰ MeV تا ۱۴۰ keV) در شکل‌های (۳-۶) آمده است. با توجه به شکل (۶)، بهترین بازدهی در بازه (۱/۵ MeV تا ۲۰۰ keV) است، به همین دلیل چند چشمه گاما در این محدوده را برای تغییر ابعاد هندسی آشکارسازها و فاصله‌ها بررسی کردیم که در شکل‌های (۷-۹) برای چشمه‌های مختلف آمده است. همچنین، در جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی بازدهی برای تغییر جنس آشکارساز نیمه‌رسانا پراکننده و جنس آشکارساز جاذب Ge و جدول (۳) برای تغییر جنس آشکارسازهای جاذب و جنس آشکارساز پراکننده Si برای چشمه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.



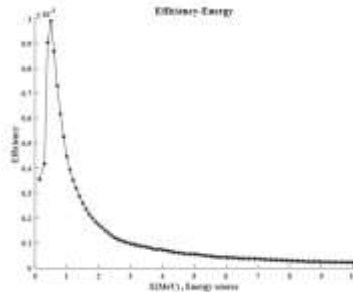
شکل (۳): نمودار بازدهی برحسب تغییرات فاصله بین آشکارسازها (۲۰۰ تا ۵) (شکل راست). برحسب تغییرات فاصله بین آشکارساز پراکنده و چشمه پرتوزا (۸۰ تا ۵) (شکل چپ).



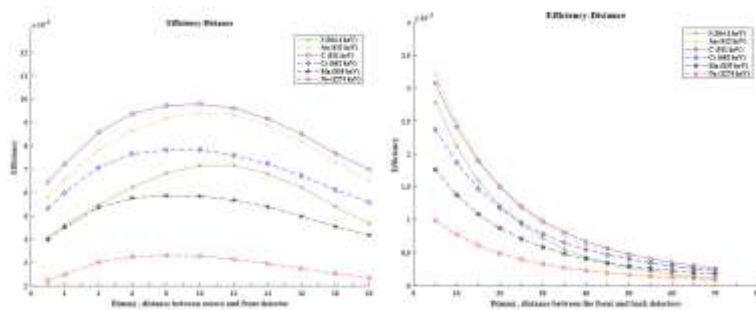
شکل (۴): نمودار بازدهی برحسب تغییرات ابعاد صفحه آشکارساز پراکنده (۲۰۰ تا ۵) (شکل راست). برحسب تغییرات ابعاد صفحه آشکارساز جاذب (۲۰۰ تا ۵) (شکل چپ).



شکل (۵): نمودار بازدهی برحسب تغییرات ضخامت آشکارساز پراکنده (۴۰ تا ۲) (شکل راست). برحسب تغییرات ضخامت آشکارساز جاذب (۴۰ تا ۲) (شکل چپ).

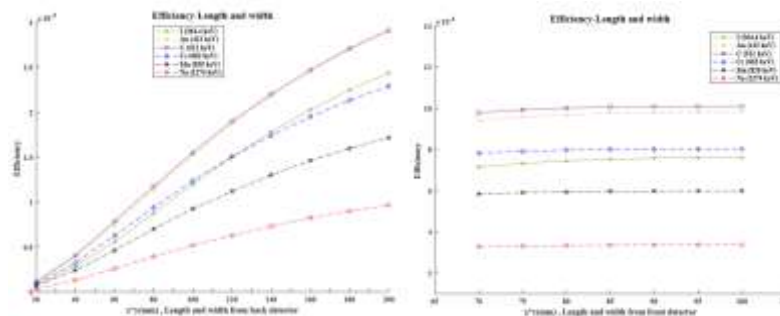


شکل (۶) : نمودار بازدهی برحسب انرژی در بازه‌ی (۱۰ MeV تا ۱۴۰ keV)



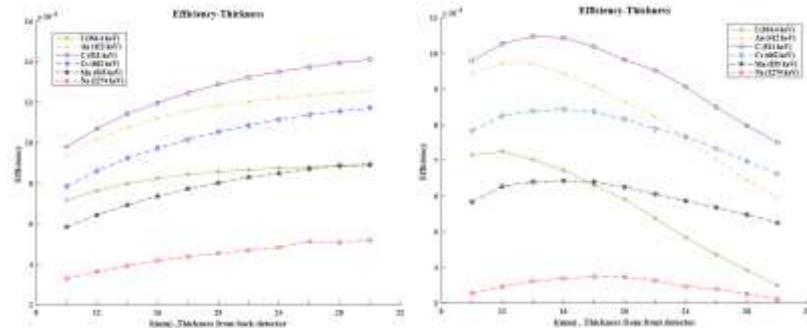
شکل (۷) : نمودار بازدهی برحسب تغییرات فاصله بین آشکارسازها در محدوده (۷۰ تا ۵ mm) (شکل راست).

برحسب فاصله آشکارساز پراکننده و چشمه پرتوزا (۲۰ mm تا ۱) (شکل چپ).



شکل (۸) : نمودار بازدهی برحسب تغییرات ابعاد آشکارساز پراکننده (۷۰ تا ۱۰۰ mm<sup>۲</sup>) (شکل راست).

تغییرات ابعاد آشکارساز جاذب (۲۰ تا ۲۰۰ mm<sup>۲</sup>) (شکل چپ).



شکل (۹): نمودار بازدهی بر حسب ضخامت آشکارساز پراکننده (۱۰ تا ۳۰ mm) (شکل راست). بر حسب تغییرات ضخامت جاذب (۱۰ تا ۳۰ mm) (شکل چپ).

### بحث و نتیجه گیری:

با توجه به نتایج نمودارها و جداول برای داشتن بازدهی بیشتر برای سیستم تصویربرداری کامپتون که به علت سطح مقطع کامپتون و فتوالکتریک پرتوهای گاما برای انرژی مختلف و چشمه‌های مختلف پرتوزا و همچنین جنس آشکارساز است که در کتابخانه داده‌های سطح مقطع NIST موجود است، فاصله کمتر بین آشکارسازها و فاصله کمتر بین آشکارساز پراکننده و چشمه پرتوزا پیشنهاد می‌شود. همچنین افزایش ابعاد صفحه آشکارساز پراکننده از یک ابعادی بر بازدهی تاثیر نمی‌گذارد ولی ضخامت پراکننده دارای ضخامتی بهینه، برای هر نوع طراحی خاص سیستم تصویربرداری می‌باشد. در واقع، ضخامت بیشتر از حالت بهینه، تعداد کامپتون‌های چندگانه را افزایش می‌دهد و در نتیجه رویداد صحیح و مورد نظر برای بازدهی کم می‌شود. افزایش ضخامت جاذب و افزایش ابعاد صفحه آشکارساز جاذب هرچه بیشتر باشد، بازدهی بهتر است ولی دارای هزینه است. بهترین گزینه به عنوان چشمه پرتوزا گاما چشمه  $^{11}\text{C}$  و بهترین گزینه برای آشکارساز نیمه‌رسانا پراکننده GaAs و Ge است و بهترین گزینه برای آشکارساز نیمه‌رسانا جاذب  $\text{HgI}_2$  و  $\text{CdTe}$  است. این نتایج برای فاصله چشمه از آشکارساز پراکننده و فاصله دو آشکارساز پراکننده و جاذب برای بررسی بازدهی با مرجع [۶] همخوانی دارد.



جدول (۲): تغییر جنس آشکارساز نیمه‌رسانا پراکننده برای چشمه‌های مختلف.

انرژی (keV)	بازدهی ( $\times 10^{-4}$ )					
	Si	Ge	CdTe	HgI <sub>2</sub>	GaAs	CdTeZn
۳۶۴/۴	۷/۱۵۱	۷/۳۲۰	۳/۲۷۷	۰/۸۷۵	۷/۲۶۵	۴/۰۰۸
۴۱۲	۹/۴۱۱	۱۰/۷۸۱	۶/۰۲۸	۲/۳۴۸	۱۰/۷۳۰	۶/۸۳۸
۵۱۱	۹/۷۸۳	۱۲/۶۰۶	۹/۱۰۹	۵/۰۸۵	۱۲/۵۹۲	۹/۷۸۹
۶۶۲	۷/۸۲۹	۱۰/۶۵۸	۹/۱۶۲	۶/۲۷۰	۱۰/۶۹۲	۹/۶۷۴
۸۳۵	۵/۸۴۳	۸/۳۲۴	۷/۷۸۵	۵/۸۳۹	۸/۳۴۹	۷/۹۳۸
۱۲۷۴	۳/۲۸۰	۴/۹۰۰	۴/۸۰۷	۳/۸۶۳	۴/۹۱۴	۴/۸۸۴

جدول (۳): تغییر جنس آشکارساز نیمه‌رسانا جاذب برای چشمه‌های مختلف.

انرژی (keV)	بازدهی ( $\times 10^{-4}$ )					
	Si	Ge	CdTe	HgI <sub>2</sub>	GaAs	CdTeZn
۳۶۴/۴	۰/۲۱۹	۷/۱۵۱	۲۱/۱۵۱	۲۹/۴۴۰	۷/۲۴۴	۱۸/۸۵۰
۴۱۲	۰/۳۱۴	۹/۴۱۱	۳۱/۴۸۵	۴۸/۰۷۸	۹/۵۳۸	۲۷/۴۷۸
۵۱۱	۰/۳۰۰	۹/۷۸۳	۳۸/۳۶۴	۶۹/۳۵۵	۹/۸۴۵	۳۲/۶۰۲
۶۶۲	۰/۲۴۴	۷/۸۲۹	۳۳/۹۳۸	۷۰/۰۶۰	۷/۹۰۴	۲۸/۱۲۲
۸۳۵	۰/۱۶۹	۵/۸۴۳	۲۶/۴۴۹	۵۸/۸۵۱	۵/۹۲۷	۲۱/۸۵۰
۱۲۷۴	۰/۰۸۱	۳/۲۸۰	۱۵/۴۳۹	۳۶/۳۰۴	۳/۲۶۱	۱۲/۵۵۷

مراجع:

- [1] D. Everett, J. Fleming, "Gamma-radiation imaging system based on the Compton effect, [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), 1975.
- [2] R. S. White and V. Schnfelder, "Neutron and proton interaction backgrounds in compton-telescopes used for gamma-ray astronomy", *Astrophys. Space Sci.*, 38(1):1-27, 1975.
- [3] M. Richard, "Design study of a Compton camera for prompts-gamma imaging during ion beam therapy", 2014.
- [4] Knoll G.F., "Radiation Detectibn and Measurement", 1999.
- [5] N. Tsoulfanidis, "Measurement and detection of radiation", 2010.
- [6] C. R. Kirkhart, "UC Berkeley UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations," 2015.