

تعیین نقطه‌ی مجازی آشکارساز HPGe در انرژی‌های مختلف اشعه‌ی گاما به دو روش شبیه‌سازی و تجربی

سیده فاطمه طاهری* و احمد شیرانی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

پست الکترونیکی: fatemeh.taheri1993@yahoo.com

چکیده

آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe) زیر شاخه‌ای از آشکارسازهای نیمه‌هادی هستند که به دلیل قدرت تفکیک بالا، زمان مرده کوچک، عدم محدودیت در ابعاد و سازگار بودن با انواع محیط‌ها، در سطح گسترده‌ای از تکنولوژی هسته‌ای، از صنعت فضا گرفته تا پزشکی هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. بازده (ذاتی و همچنین مطلق) آشکارساز HPGe که تابع هندسه سیستم چشمه-آشکارساز و هم چنین انرژی اشعه گاما می‌باشد یک فاکتور مهم در تعیین فعالیت چشمه‌های پرتوزا به شمار می‌رود که با تغییر هر یک از عوامل فوق الذکر بازده نیز تغییر می‌کند و نیازمند اندازه‌گیری‌های مجدد خواهد بود. یکی از راه‌های ساده‌تر تعیین فعالیت چشمه‌های پرتوزا استفاده از بازده ذاتی نقطه مجازی است. نقطه مجازی نقطه‌ای است فرضی که میزبان تمامی واکنش‌ها درون آشکارساز است. هدف در انجام این پژوهش تعیین نقطه‌ی مجازی آشکارساز HPGe مدل GMX 40P4-76 و تعیین بازدهی نقطه مجازی برای این آشکارساز است. برای این کار ابتدا با استفاده از سیستم طیف سنجی HPGe طیف اشعه گامای گسیل شده از یک چشمه یورویوم را در فواصل مختلف چشمه-آشکارساز به طور تجربی به دست آوردیم و سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (کد MCNPX) سیستم طیف‌سنجی را شبیه‌سازی کردیم. در این پژوهش در مرحله‌ی اول به تعیین فاصله نقطه‌ی مجازی به دو روش تجربی و شبیه‌سازی برای بازدهی انرژی ۱۲۱ keV تا ۱۴۰۸ keV پرداخته شد که در محاسبه بازده به روش شبیه‌سازی از کد مونت کارلو MCNPX استفاده شد و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شدند که سازگاری خوبی داشتند. در مرحله‌ی دوم با استفاده از نقطه‌ی مجازی به محاسبه‌ی بازدهی نقطه‌ی مجازی برای آشکارساز HPGe پرداختیم و نشان داده شد که این بازدهی برای یک انرژی در فواصل مختلف نوسانات کمی دارد یا به عبارتی بازدهی نقطه‌ی مجازی در فواصل مختلف برای یک انرژی، یکسان به دست می‌آید و با داشتن آن (بازدهی نقطه مجازی) محاسبه فعالیت چشمه‌های نامعلوم آسان‌تر است چراکه وابستگی به فاصله از بین رفته است و در فواصل مختلف نیازمند اندازه‌گیری مجدد نخواهیم بود.

کلیدواژه‌گان: آشکارساز HPGe، روش مونت کارلو، کد MCNP، بازده، نقطه مجازی آشکارساز.

۱. مقدمه

امروزه طیف سنجی پرتو گاما حائز اهمیت است چرا که کاربردهای فراوانی در صنایع هسته‌ای و دیگر علوم دارد. برای طیف سنجی اشعه گاما از آشکارساز فوق خالص ژرمانیوم HPGe استفاده می‌شود که دارای قدرت تفکیک بالایی می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در این آشکارساز بازدهی آن است که به نوع چشمه، هندسه ی چشمه-آشکارساز و انرژی اشعه گاما بستگی دارد و در هر آزمایش با توجه به شرایط آزمایش باید تعیین شود. در آشکار ساز HPGe برهم کنش فوتون محدود به کلاهیک آشکار نمی‌شود، بلکه در حجم کریستال اتفاق می‌افتد، همین پدیده باعث انحراف بازدهی آشکارساز از قانون عکس مجذور فاصله می‌شود که در محاسبه فعالیت ضعیف باعث ایجاد نتایج با دقت کم می‌شود. برای برطرف کردن این عیب یک نقطه مجازی درون کریستال که میزان تمام برهم کنش‌های فوتون با کریستال است، در نظر گرفته می‌شود. با تعیین محل این نقطه درون آشکارساز، عوامل هندسی مورد استفاده در درجه‌بندی آشکارساز ساده‌تر خواهد شد. این ساده‌سازی در اندازه‌گیری فعالیت چشمه‌های ضعیف حائز اهمیت است. لازم به ذکر است که فرض نقطه مجازی آشکارساز معنای فیزیکی ندارد و فقط یک ساده سازی ریاضی است. این مفهوم (نقطه ی مجازی) اولین بار Norea در سال ۱۹۷۱ برای آشکارساز Ge(Li) معرفی و تایید شد [۱]. در سال‌های بعد صحت این موضوع برای آشکارسازهای سوسوزن [۲]، محیط‌های جاذب [۳]، چشمه‌های دیسکی [۴] و چشمه‌های خارج از محور مورد بررسی قرار گرفت. هدف در این پژوهش، محاسبه ی فاصله نقاط مجازی تا سطح آشکارساز در انرژی‌های متفاوت برای چشمه‌ی نقطه‌ای یورانیوم و همچنین تعیین بازده نقطه‌ی مجازی برای آشکارساز HPGe هم محور نوع n هم به صورت تجربی و هم به شکل شبیه‌سازی است.

۲. تجهیزات آزمایشگاهی

آشکارساز استفاده شده در این پژوهش، آشکارساز HPGe هم‌محور نوع n مدل GMX-40P4 می‌باشد که مشخصات کامل آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات آشکارساز GMX-40P4 از شرکت ORTEC.

قدرت	قدرت	بازدهی	ضخامت	ماده بلور	پنجره	نسبی	انرژی در
تفکیک	تفکیک	نسبی	ضخامت	ماده بلور	پنجره	نسبی	انرژی در
keV	keV	فوتوپیک	برلیومی	برلیومی	پنجره	نسبی	انرژی در
۱۳۳۲	۵۹ keV						
ژرمانیوم							
۲ keV	۷۶۰eV	%۴۰	۰/۵۱mm	فوق			
خالص n							

برای کاهش میزان پرتوهای زمینه و جلوگیری از تأثیر چشمه‌های خارجی در اطراف آشکارساز از یک حفاظ سربی به ضخامت ۹/۸cm استفاده شده است و برای کاهش پرتوهای ثانویه از سرب، از یک لایه‌ی مسی به ضخامت ۲mm استفاده شده است که هر دو در برنامه‌ی شبیه‌سازی لحاظ شدند.

- چشمه‌ی مورد استفاده در این پژوهش، چشمه نقطه‌ای ^{152}Eu می‌باشد که فعالیت آن در زمان تولید (۱۵ ژانویه ۲۰۱۵) 337kBq بوده است و در زمان طیف‌گیری (۲۹ می ۲۰۱۸)، 283489 Bq بوده است.

۳. شبیه‌سازی آشکارساز

این شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNPX نسخه ۲/۶/۰ انجام شد [۵]. برای این شبیه‌سازی به اندازه‌های دقیق و هم‌چنین جنس اجزای آشکارساز در طیف‌سنجی تجربی لازم بود که بر اساس کاتالوگ شرکت سازنده‌ی آشکارساز در کد تعریف شدند (شکل ۱). هم‌چنین شبیه‌سازی چشمه‌ها نیز

مقدار این ضرایب برای طیف چشمه یورانیوم در فاصله
۳۵ cm عبارتند از:

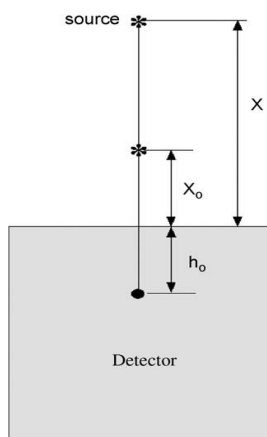
$$a = 1/114 \times 10^{-3}$$

$$b = 5/789 \times 10^{-4}$$

$$c = 1/792$$

۴. تعیین نقطه‌ی مجازی آشکارساز

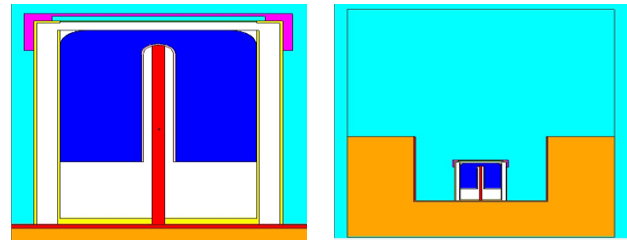
بازدهی یک آشکارساز پارامتر مهمی در تعیین پرتوزایی چشمه‌های ضعیف محیطی می‌باشد. لیکن این بازده به شدت به فاصله چشمه از آشکارساز، هندسه چشمه و آشکارساز، شکل و ابعاد آشکارساز وابسته است. برای رفع این مشکل در سال ۱۹۷۱ میلادی نوتا مفهوم نقطه مجازی و بازدهی نقطه مجازی را ارائه داد. مفهوم نقطه مجازی که از آن می‌توان برای تسهیل محاسبات بازدهی به وسیله‌ی کاهش حجم آشکارساز به یک نقطه مؤثر که تمامی فعل و انفعالات در آن روی می‌دهد استفاده کرد در شکل ۲ آورده شده است.



شکل (۲): نقطه مجازی درون بلور و چشمه
نقطه‌ای واقع بر محور تقارن آشکارساز.

در شکل ۲، x فاصله‌ی چشمه تا آشکارساز، x_0 کوچکترین فاصله بین چشمه تا لبه‌ی آشکارساز (فاصله‌ای که زمان مرده آشکارساز کمتر از هشت درصد باشد و در این پژوهش ۵cm

منطبق با شرایط به کار رفته در آزمایشگاه به برنامه ورودی افزوده شدند.



(ب)

(الف)

شکل (۱): تصویر (الف) نشان‌دهنده کل فضای مورد بررسی شامل حفاظها، آشکارساز و چشمه است. تصویر (ب) شامل جزئیات آشکارساز از جمله درپوش پلی اتیلن، پنجره برلیومی، حفاظهای آلومینیومی داخلی و خارجی، قسمت فعال کریستال ژرمانیوم و لوله‌ی مسی است.

به منظور تطابق بیشتر طیف شبیه‌سازی و طیف تجربی اندازه‌گیری شده باید ضرایب پهن شدگی طیف را برای کد MCNP تعریف کرد. معیاری از پهن شدگی هر قله در طیف توسط FWHM (پهنای کامل در نیمه بیشینه) تعریف می‌شود [۶]. که به صورت زیر برحسب انرژی بیان می‌شود:

$$FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (1)$$

که E انرژی اشعه گاما بر حسب MeV و ضرایب a, b, c باید تعیین شوند. برای تعیین مقدار این ضرایب باید FWHM چند قله‌ی تمام انرژی را بعد از کالیبراسیون طیف تجربی مشخص و سپس نسبت به معادله‌ی (۱) برای نقاط به دست آمده در نمودار FWHM بر حسب انرژی برآزش گیری می‌شود.

$$\frac{c(x)}{c(x)} = \frac{(x+h)^2}{(x+h)^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{c(x)}} = \frac{1}{\sqrt{c(x)}} \times \left(\frac{x}{x+h}\right) + \frac{1}{\sqrt{c(x)}} \times \left(\frac{h}{x+h}\right) \quad (4)$$

$$y = Nx + Nh. \quad (5)$$

$$N = \frac{1}{\sqrt{c(x)}} \times \frac{1}{x+h}. \quad (6)$$

جدول ۲ و شکل ۳ نتایج محاسبه مقدار h_0 در انرژی‌های متفاوت را برای داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

در نظر گرفته شده است) و h_0 فاصله نقطه مجازی از درون کریستال تا لبه‌ی آشکارساز است. فرض جایگزینی حجم آشکارساز به یک نقطه بدین معناست که آهنگ شمارش در فواصل مختلف چشمه از آشکارساز از قانون عکس مجذوری تبعیت می‌کند. برای محاسبه‌ی فاصله نقطه‌ی مجازی از فرمول (۲) استفاده شد که در آن I_γ نسبت انشعاب هر انرژی (درصد احتمال هر انرژی)، A فعالیت چشمه، h_0 فاصله نقطه‌ی مجازی، x فاصله‌ی چشمه تا سطح آشکارساز است و $c(E_\gamma)$ آهنگ شمارش ذرات است. با استفاده از روابط زیر می‌توان به محاسبه h_0 (فاصله نقطه مجازی تا لبه آشکار ساز) پرداخت.

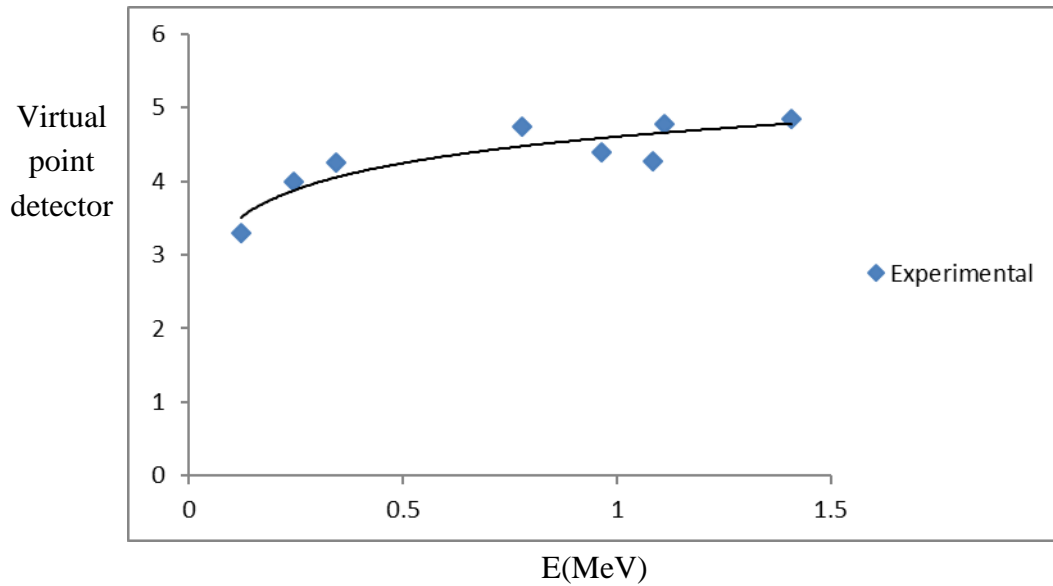
$$c(E_\gamma) = \frac{A I_\gamma \varepsilon(x)}{\varepsilon \pi (h_0 + x)^2} \quad (2)$$

جدول (۲): نقاط مجازی به دست آمده از طریق آهنگ شمارش برای انرژی‌های متفاوت چشمه یورانیوم از داده‌های تجربی.

E (MeV)	۰/۱۲۱	۰/۲۴۴	۰/۳۴۴	۰/۷۷۸	۰/۹۶۴	۱/۰۸۵	۱/۱۱۲	۱/۴۰۸
h_0 (cm)	$۳/۳ \pm ۰/۷$	$۴ \pm ۰/۳۶$	$۴/۲۵ \pm ۰/۲۸$	$۴/۷۵ \pm ۰/۳۸$	$۴/۴ \pm ۰/۳۸$	$۴/۲۷ \pm ۰/۴$	$۴/۷۷ \pm ۰/۱۴$	$۴/۸۵ \pm ۰/۱۶$
R^2	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۸۲	۰/۹۶۱۱

جدول (۲): نقاط مجازی به دست آمده از طریق آهنگ شمارش برای انرژی‌های متفاوت چشمه یورانیوم از داده‌های تجربی.

E (MeV)	۰/۱۲۱	۰/۲۴۴	۰/۳۴۴	۰/۷۷۸	۰/۹۶۴	۱/۰۸۵	۱/۱۱۲	۱/۴۰۸
h_0 (cm)	$۳/۳ \pm ۰/۷$	$۴ \pm ۰/۳۶$	$۴/۲۵ \pm ۰/۲۸$	$۴/۷۵ \pm ۰/۳۸$	$۴/۴ \pm ۰/۳۸$	$۴/۲۷ \pm ۰/۴$	$۴/۷۷ \pm ۰/۱۴$	$۴/۸۵ \pm ۰/۱۶$
R^2	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۸۲	۰/۹۶۱۱



شکل (۳): نمودار نقاط مجازی برای داده‌های تجربی بر حسب انرژی.

$$\frac{\epsilon_{abs}(x.)}{\epsilon_{abs}(x)} = \frac{c(x.)}{c(x)} = \frac{(x+h.)^2}{(x.+h.)^2} \quad (9)$$

برای محاسبه‌ی فاصله‌ی نقطه مجازی بر اساس داده‌های شبیه‌سازی بر حسب بازدهی از روابط زیر استفاده می‌شود:

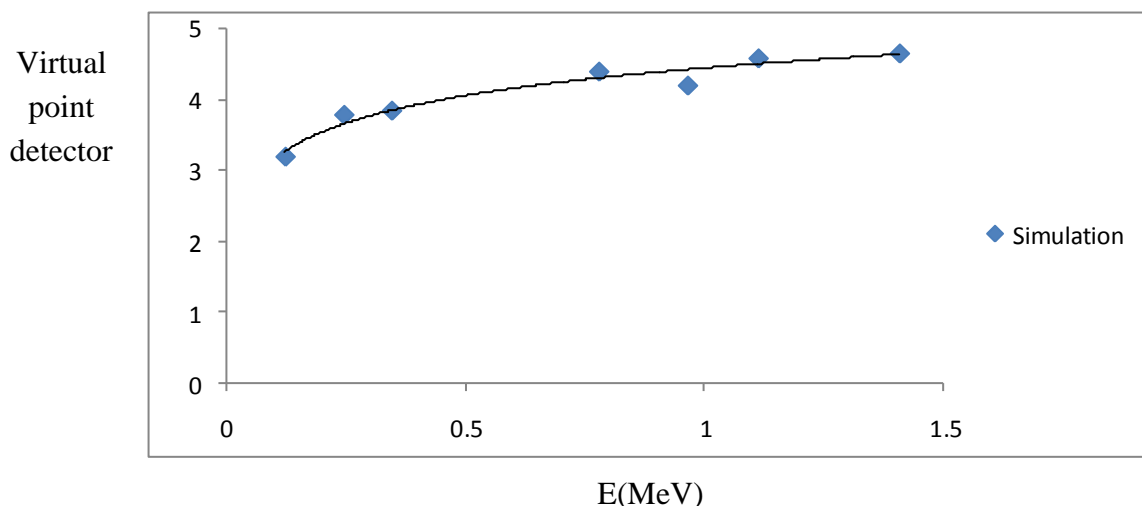
جدول ۳ و شکل ۴ نیز نتایج محاسبه مقدار h_0 در انرژی‌های متفاوت را بر حسب داده‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

$$AI_{\gamma} \epsilon_{abs}(x.) = c(x.) \quad (7)$$

$$AI_{\gamma} \epsilon_{abs}(x) = c(x) \quad (8)$$

جدول (۳): نقاط مجازی به دست آمده طریق معکوس جذر بازده برای انرژی‌های متفاوت چشمه یورانیوم از داده‌های شبیه‌سازی.

E(MeV)	۰/۱۲۱	۰/۲۴۴	۰/۳۴۴	۰/۷۷۸	۰/۹۶۴	۱/۰۸۵	۱/۱۱۲	۱/۴۰۸
h_0 (cm)	۲/۰۲	۳/۷۸	۳/۸۴	۴/۴	۴/۲	۳/۴۲	۴/۵۹	۴/۶۶
R^2	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۵۷	۰/۹۹۵۸	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۹۱	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۸۲



شکل (۴): نمودار نقطه مجازی برای داده‌های شبیه‌سازی بر حسب انرژی.

۵. تعیین بازدهی نقطه‌ی مجازی

بودند اما در این‌جا بازه‌ها (بازه‌های نقطه‌مجازی) تقریباً یکسان و دارای بعد مساحت هستند.

$$c(E_\gamma) = \frac{A I_\gamma \varepsilon(x)}{\varepsilon \pi (h, +x)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{\varepsilon \pi c(x) (h, +x)^2}{A I_\gamma} \quad (11)$$

برای محاسبه بازدهی نقطه مجازی از روش Norea پیش خواهیم رفت این گونه که با استفاده از فرمول (۱۰) مقدار بازده به دست آمده برای یک انرژی در فواصل مختلف باید نوسانات کمی داشته باشد یا به عبارتی دیگر بازدهی در فواصل مختلف برای یک انرژی باید یکسان شود. لازم به ذکر است بازده‌های ذاتی و مطلق دارای روند صعودی و نیز فاقد بُعد

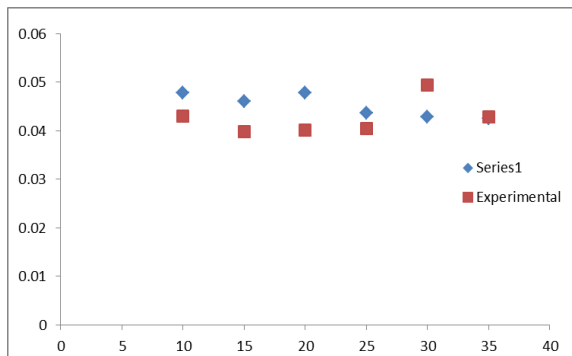
جدول (۴): محاسبه بازدهی نقطه‌ی مجازی برای داده‌های شبیه‌سازی

E(keV)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
۱۲۱	۰/۱۴۲۸	۰/۱۲۸۴	۰/۱۲۵۶	۰/۱۱۸۸	۰/۱۱۸۶	۰/۱۱۸۲
۲۴۴	۰/۱۳۴۹	۰/۱۲۷۱	۰/۱۲۰۷	۰/۱۲۵۵	۰/۱۱۶۳	۰/۱۱۳۱
۳۴۴	۰/۰۹۶۱	۰/۰۹۰۰	۰/۰۸۵۵	۰/۰۸۲۴	۰/۰۸۳۳	۰/۰۷۹۱
۷۷۸	۰/۰۶۲۱	۰/۰۵۷۸	۰/۰۵۵۲	۰/۰۵۳۵	۰/۰۵۲۹	۰/۰۵۲۱
۹۶۴	۰/۰۴۷۹	۰/۰۴۶۱	۰/۰۴۷۸۷	۰/۰۴۳۶	۰/۰۴۲۸	۰/۰۴۲۵
۱۰۸۵	۰/۰۳۸۴	۰/۰۴۱۶	۰/۰۴۰۸	۰/۰۴۰۴	۰/۰۴۰۲	۰/۰۴۰۱
۱۱۱۲	۰/۰۴۶۳	۰/۰۴۴۲	۰/۰۴۱۸۷	۰/۰۴۱۵	۰/۰۴۰۲	۰/۰۴۰۲
۱۴۰۸	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۳۹	۰/۰۳۲۹	۰/۰۳۲۴	۰/۰۳۱۹	۰/۰۳۱۲

جدول (۵): محاسبه بازدهی نقطه‌ی مجازی برای داده‌های تجربی

E(keV)	Distance:					
	۱۰cm	۱۵cm	۲۰cm	۲۵cm	۳۰cm	۳۵cm
۱۲۱	۰/۱۶۱۷±۰/۰۳۴۱	۰/۱۴۵۲±۰/۰۲۵۹	۰/۱۴۴۶±۰/۰۲۱۶	۰/۱۴۴۶±۰/۰۱۸۸	۰/۱۴۳۶±۰/۰۱۵۲	۰/۱۵۲۰±۰/۰۱۴۵
۲۴۴	۰/۱۱۷۳±۰/۰۳۴۱	۰/۱۰۶۷±۰/۰۲۴۸	۰/۱۰۶۱±۰/۰۲۰۴	۰/۱۰۵۷±۰/۰۱۷۵	۰/۱۰۵۷±۰/۰۱۱۸	۰/۱۱۰۹±۰/۰۱۳۹
۳۴۴	۰/۰۸۸۷±۰/۰۳۴۶	۰/۰۸۵۵±۰/۰۲۷۳	۰/۰۸۴۶±۰/۰۲۳۱	۰/۰۸۴۳±۰/۰۱۰۹	۰/۰۸۴۴±۰/۰۱۸۳	۰/۰۸۸۲±۰/۰۲۱۱
۷۷۸	۰/۰۵۳۳±۰/۰۳۱۹	۰/۰۴۸۱±۰/۰۲۴۹	۰/۰۴۷۶±۰/۰۲۰۹	۰/۰۴۷۵±۰/۰۱۸۲	۰/۰۴۷۴±۰/۱۶۳	۰/۰۵۰۲±۰/۰۱۴۸
۹۶۴	۰/۰۴۳۱±۰/۰۳۱۰	۰/۰۳۹۹±۰/۰۲۳۹	۰/۰۴۰۲±۰/۰۱۹۶	۰/۰۴۰۵±۰/۰۱۵۹	۰/۰۴۹۴±۰/۰۱۴۹	۰/۰۴۲۸±۰/۰۱۳۴
۱۰۸۵	۰/۰۴۰۵±۰/۰۳۱۴	۰/۰۳۶۹±۰/۰۲۴۱	۰/۰۳۷۶±۰/۰۱۰۳	۰/۰۳۷۴±۰/۰۱۷۱	۰/۰۳۷۲±۰/۰۱۵۱	۰/۰۳۹۵±۰/۰۱۹۶
۱۱۱۲	۰/۰۴۱۰±۰/۰۳۱۴	۰/۰۳۷۶±۰/۰۲۴۷	۰/۰۳۷۷±۰/۰۲۰۵	۰/۰۳۷۱±۰/۰۱۷۷	۰/۰۳۷۵±۰/۰۱۵۹	۰/۰۳۹۱±۰/۰۱۴۴
۱۴۰۸	۰/۰۳۴۷±۰/۰۲۹۷	۰/۰۳۱۶±۰/۰۱۴۱	۰/۰۳۱۶±۰/۰۱۸۸	۰/۰۳۱۷±۰/۰۱۶۲	۰/۰۳۱۶±۰/۰۱۴۳	۰/۰۳۳۲±۰/۰۱۲۸

شکل (۵): بازدهی نقطه مجازی برحسب انرژی‌های متفاوت در فاصله‌ی ۲۰ سانتی متری.

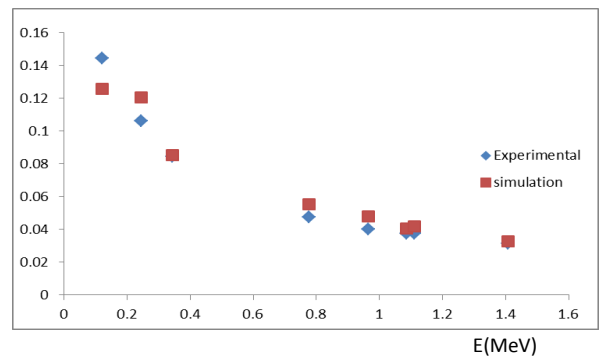


شکل (۶): بازدهی نقاط مجازی بر حسب فواصل مختلف در انرژی ۹۶۴ keV.

۶. نتیجه گیری

بازده آشکارساز HPGe که تابع هندسه سیستم چشمه-آشکارساز می‌باشد یک فاکتور مهم در تعیین فعالیت چشمه‌های پرتوزا به شمار می‌رود. در این پروژه برای محاسبه‌ی ساده‌تر بازده به تعریف و تعیین فاصله‌ی نقطه مجازی هم به صورت تجربی و هم به شکل شبیه‌سازی روی می‌آوریم و نتایج به دست آمده با یکدیگر مورد مقایسه قرار دادیم و نیز بیان کردیم که نقطه مجازی معنای فیزیکی ندارد و

جداول ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقدار بازده نقطه‌ی مجازی برای داده‌های شبیه‌سازی و تجربی می‌باشد. با توجه به محاسبات انجام شده و جداول به دست آمده، با رسم بازدهی نقطه‌ی مجازی برحسب فاصله (شکل ۵)، می‌توان دریافت که همانند بازدهی مطلق و ذاتی با افزایش انرژی، کاهش بازدهی نقطه‌ی مجازی را خواهیم داشت. همان‌گونه که انتظار می‌رفت بازدهی نقاط مجازی در فواصل مختلف و برای یک انرژی خاص (هم در داده‌های تجربی و هم در داده‌های شبیه‌سازی) تقریباً روند یکسانی دارد و با داشتن این بازدهی می‌توان فعالیت چشمه‌های نامعلوم را به دست آورد. در شکل ۶ این روند تقریباً یکسان برای یک انرژی مشخص (۹۶۴ keV) نشان داده شده است. این روند برای تمامی انرژی‌های مد نظر در این پروژه صادق است.



مجازی و بازدهی نقطه‌ی مجازی مورد بررسی قرار داده شد که طی این محاسبات این نتیجه حاصل شد در فواصل که بازدهی نقطه مجازی در فواصل مختلف برای یک انرژی مشخص تقریباً یکسان به دست می‌آید و با داشتن این بازدهی می‌توان فعالیت چشمه‌های نامعلوم را به دست آورد که دیگر هیچ‌گونه وابستگی به فاصله ندارد و محاسبات بسیار آسان‌تر خواهد شد.

صرفاً یک ساده‌سازی ریاضی است. با مقایسه روش شبیه‌سازی و تجربی و رسیدن به توافق به دست آمده از دو روش، دیگر لزومی به انجام آزمایش نخواهد بود چرا که روش شبیه‌سازی منجر به صرفه جویی در زمان و هزینه خواهد و با همان دقت می‌توان محاسبات را برای هر هندسه‌ای و در انرژی و فواصل متفاوت انجام داد. در مرحله بعد این پروژه اعتبارسنجی نقطه

۷. مراجع

- [1] A. Notea. The Ge(Li) spectrometer as a point detector. Nucl, Instrum, Meth. 91(1971) 513-515.
- [2] O. Presler, U. German, V. Pushkarsky and Z. B. Alfassi. virtual piont detector: on the interpolation and extrapolation of scintillation detectors counting efficiencys. Nuclear Instruments and methods A565. 704 (2006).
- [3] O. Preslet, U. German, O. Pelled and Z. B. Alfassi. The validity of the virtual point detector concept for absorbing media. Applied Radiation and Isotopes. 60 (2004) 213.
- [4] Z. B. Alfassi, N. Lavi, O. Plesler and V. Pushkarski. HPGe virtual point detector for radioactive disk sources. Applied Radiation and Isotopes. 65 (2007) 253-258.
- [5] B. Denise and Pelowitz. editor, MCNPX USER'S MANUAL, version 2.6.0, (April2008).
- [6] N. Tsoufanidis. Measurement and Detestion of Radiation. Second Edition, Taylor & Francis, (1995).