

شبیه‌سازی اپتیکی و اندازه‌گیری تجربی پاسخ گامای سوسوزن‌های پلاستیک در ابعاد مختلف

پرویز قربانی^۱، داریوش سرداری^۱، روح‌ا... عظیمی‌راد^{۲*} و محمد حسن طلب^۱

^۱گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

^۲مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، کدپستی: ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

پست الکترونیکی: azimirad@yahoo.com

چکیده

استفاده از آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک با ابعاد بزرگ به دلیل مزیت‌های فنی و اقتصادی، در حوزه‌های مختلف صنعت، پزشکی و امنیت روز به روز در حال گسترش می‌باشد. با این وجود و با وجود توسعه استفاده از این سوسوزن‌ها در سیستم‌های کنترل نفر و خودرو در گمرکات داخل کشور، مباحث دانشی خاصی در این خصوص صورت نگرفته است. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار GEANT4/GATE، با ترابرد فوتون‌های اپتیکی ناشی از اندرکنش تابش گاما با ماده سوسوزن، طیف شبیه‌سازی مشابه با طیف تجربی در ۶ سوسوزن پلاستیک مکعب مستطیلی بزرگ با ابعاد متفاوت بدون پوشش بازتابنده استخراج شده است. نتایج نشان داده است که، موقعیت لبه کامپتون نسبت به بیشینه موضعی و میزان بهره نور جمع‌آوری شده در محل PMT واقع در وجه (Width×Thickness)، در طیف پیوستار کامپتون کاملاً با حجم هندسی سوسوزن ارتباط دارد. بعد پهنا (Width) تأثیرگذارترین پارامتر در این خصوص است. نتایج مطالعات انجام شده نشان داده است که، کاهش پهنای سوسوزن باعث افزایش قدرت تفکیک انرژی و بهره جمع‌آوری نور در سوسوزن شده است. در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی با تطبیق طیف شبیه‌سازی با طیف تجربی مورد تایید واقع شده است.

کلیدواژه‌گان: سوسوزن پلاستیک بزرگ، جمع‌آوری نور، کالیبراسیون انرژی.

۱. مقدمه

اپتیکی در گستره طول موج معین می‌گردد. از این رو، طیف چشمه گاما در سوسوزن پلاستیک، طیف فوتون‌های اپتیکی ناشی از انرژی الکترون‌های کامپتون است [۳-۱]. استفاده از سوسوزن‌های پلاستیک به واسطه‌ی قیمت بسیار پایین، پاسخ زمانی سریع و ویژگی‌های مناسب محیطی در مقایسه با دیگر

اندرکنش غالب فوتون‌های گاما با مواد آلی سبک همچون مواد پلاستیک از نوع پراکندگی کامپتون می‌باشد. در پراکندگی کامپتون، فوتون بخشی از انرژی خود را در حین اندرکنش به الکترون آزاد منتقل می‌نماید. در آشکارسازهای سوسوزن، جذب انرژی در بلور سوسوزن منجر به گسیل فوتون‌های

در خصوص سوسوزن‌های با ابعاد بزرگ، رسیدن به یک همخوانی مناسب بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مستلزم استفاده از یک کد کامل مونت کارلو با قابلیت تولید و ترابرد فوتون‌های اپتیکی می‌باشد. در شبیه‌سازی سوسوزن‌های کوچک با به‌کار بردن یک تابع پهن‌شدگی مناسب در کد MCNP و کمی اغماض می‌توان به معادل طیف تجربی رسید. لیکن با بزرگ شدن اندازه سوسوزن حتماً باید از یک کد با قابلیت ترابرد نور استفاده نمود، در غیر این صورت همخوانی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی به هیچ عنوان حاصل نمی‌شود [۱۵، ۱۶].

GEANT4 ابزاری حرفه‌ای و بسیار قدرتمند برای شبیه‌سازی اکثر پدیده‌های فیزیکی می‌باشد. GATE یک نرم‌افزار رایگان پیشرفته است که از کتابخانه‌های GEANT4 استفاده می‌کند. GEANT4 برای شبیه‌سازی فرآیند سوسوزنی از دو مدل UNIFIED و GLISUR بهره می‌برد. در GATE تنها از مدل UNIFIED استفاده شده است. این مدل فرآیندهای فیزیکی که یک فوتون اپتیکی در برخورد با سطوح متحمل می‌شود را توصیف می‌نماید. در شبیه‌سازی اپتیکی کاربر باید مشخصات سوسوزنی، نظیر؛ بهره سوسوزنی و طول تضعیف و نیز خصوصیات اپتیکی کلیه مواد و سطوح را تعریف نماید.

GATE توانایی لازم برای شبیه‌سازی کل پدیده اندرکنش تابش یونیزان با ماده سوسوزن، شامل؛ جذب انرژی تابش در ماده سوسوزن، تولید و ترابرد فوتون اپتیکی را دارد [۱۶، ۱۷]. در این تحقیق رابطه ویژگی‌های طیف انرژی سوسوزن پلاستیک به ابعاد هندسی سوسوزن، با شبیه‌سازی اندرکنش تابش گاما با سوسوزن‌های پلاستیک بزرگ و ترابرد نور در محیط نرم‌افزار GATE، پرداخته شده و با نتایج تجربی مورد مقایسه واقع شده است.

انواع سوسوزن، روز به روز در حال گسترش می‌باشد. با افزایش روز افزون تهدیدات تروریستی و احتمال بکارگیری مواد هسته‌ای از طرف تروریست‌ها، کشف و شناسایی جابه‌جایی این مواد دارای اهمیت بالایی است. در این راستا، استفاده از سوسوزن‌های پلاستیک بزرگ، احتمال آشکارسازی منابع تهدید پرتوی را افزایش می‌دهد. در حالت کلی، در مواردی که نیاز به حجم بالایی از آشکارساز است، تنها گزینه کاربردی، استفاده از سوسوزن پلاستیک است [۱، ۲، ۷-۴].

شکل طیف الکترون کامپتون اندازه‌گیری شده حاصل از یک سوسوزن آلی به هندسه چشمه تابش گاما، موقعیت قرارگیری چشمه، ابعاد و دیواره‌های آشکارساز، تابع خروجی نور و قدرت تفکیک ذاتی آشکارساز بستگی دارد [۸]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرآیند جمع‌آوری نور شدیداً به اندازه و شکل سوسوزن وابسته بوده و عامل انحراف در طیف ارتفاع پالس می‌باشد. این مسئله در سوسوزن با ابعاد کوچک مورد مطالعه قرار گرفته است، نتایج حاصله نشان از وابستگی شدید پاسخ طیف سوسوزن کوچک به مکان قرارگیری چشمه دارد [۹].

تعیین موقعیت لبه در طیف پیوستار کامپتون برای کالیبراسیون انرژی ضرورت دارد. در این زمینه، مقادیر متفاوتی برای موقعیت لبه نسبت به بیشینه موضعی بر روی طیف پیوستار کامپتون، ارائه شده است. برای نمونه، موقعیت لبه نسبت به بیشینه موضعی در ناحیه پیوستار کامپتون، در سوسوزن‌های آلی مختلف، ۶۷٪، ۸۷٪، ۷۰٪ و ۸۹٪ گزارش شده است [۸، ۱۴-۱۰]. این مسئله می‌تواند ناشی از وابستگی احتمالی موقعیت لبه در طیف پیوستار کامپتون و قدرت تفکیک انرژی در لبه کامپتون به مشخصات هندسی سوسوزن، نوع بازتابنده و حتی به تعداد و ابعاد لامپ تکثیر کننده فوتون (PMT)^۱ و به عبارتی طراحی مورد استفاده در سوسوزن باشد.

^۱ Photomultiplier Tube

۲. روش و ابزار

۱.۲. محاسبات شبیه‌سازی اپتیکی

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GATE نسخه 6.2 و انجام ترابرد فوتون‌های اپتیکی حاصل از اندرکنش فوتون‌های گاما، طیف معادل طیف انرژی حاصل از اندازه‌گیری تجربی در سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف به دست آمده است. سوسوزن‌ها لخت و بدون هر گونه پوشش بازتابنده می‌باشند. در اینجا سوسوزن‌های پلاستیک مورد مطالعه از نوع BC-408 ساخت شرکت Bicron می‌باشد. در این سوسوزن به ازای واگذاری ۱ MeV انرژی الکترون حدود ۱۰۰۰۰ فوتون اپتیکی در محدوده طول موجی ۳۵۰ nm تا ۵۰۰ nm گسیل می‌گردد (بهره نوری)^۱. همچنین، بیشینه طول موج گسیلی ۲۵۰ nm، طول تضعیف^۲ نور ۳۸۰ cm، زمان خیزش^۳ پالس ۰/۷ ns و زمان فرونشست^۴ نور تولیدی ۲/۱ ns است. در این مطالعه از PMT با قطر ۵/۰۸ cm مدل XP2020 ساخت شرکت Photonis استفاده شده است. در شبیه‌سازی مشخصه بازدهی کوانتومی فوتوکاتد اعمال شده است [۱، ۲]. فاصله PMT و چشمه گاما در تمامی اندازه‌گیری‌ها ثابت و برابر با ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد.

در شبیه‌سازی برای تولید طیف نور جمع‌آوری شده معادل با طیف تجربی، تمام مشخصات اپتیکی سوسوزن اعمال شده است. تمامی رخدادهای محتمل در سطوح سوسوزن، مانند؛ بازتاب، شکست و بازتاب کلی داخلی، بر مبنای ضرایب شکست وابسته به طول موج نور در محیط داخل سوسوزن و هوای بیرون سوسوزن اتفاق می‌افتد. شکل ۱، نمایی از ۶ هندسه سوسوزن پلاستیک مورد مطالعه در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

در اینجا، بررسی‌ها بر اساس ارزیابی پاسخ طیف گامای ¹³⁷Cs بوده است. برای کالیبراسیون انرژی طیف‌های گامای حاصله و امکان مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری تجربی، موقعیت لبه کامپتون با استفاده از چشمه الکترون با انرژی ۴۷۷ keV، در هر سوسوزن با شبیه‌سازی اپتیکی تعیین شده است. این انرژی معادل بیشینه انرژی الکترون پراکنده در اندرکنش گامای ۶۶۱/۷ keV ناشی از چشمه ¹³⁷Cs با سوسوزن پلاستیک (لبه کامپتون) می‌باشد [۲]. پهنا در نصف شمارش مربوط به لبه کامپتون (WHCE)^۵، به عنوان معیاری جهت ارزیابی قدرت تفکیک در لبه کامپتون تعریف شده است. همچنین نسبت لبه کامپتون^۶ به بیشینه موضعی^۷ در طیف مربوط به هر سوسوزن استخراج شده است.

با توجه به اینکه، با افزایش حجم سوسوزن پلاستیک، بحث وقوع پراکندگی‌های متعدد کامپتون در اندرکنش تابش فوتونی با محیط آشکارساز سوسوزن پلاستیک اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، سهم پراکندگی چندگانه در طیف پیوستار کامپتون هر یک از سوسوزن‌ها، با استفاده از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار GATE بدون ترابرد اپتیکی، صرفاً بر مبنای طیف انرژی جذب شده، مورد محاسبه قرار گرفته است.

۲.۲. چیدمان تجربی استخراج طیف انرژی گاما

شکل ۲، نمایی طرح واره از چیدمان تجربی مورد استفاده برای سنجش طیف ¹³⁷Cs در سوسوزن‌های پلاستیک را نشان می‌دهد. در شکل ۳، نمایی واقعی از هندسه سوسوزن پلاستیک و PMT، واقع در اتاق تاریک، در اندازه‌گیری تجربی را نشان می‌دهد. در چیدمان تجربی از تحلیل‌گر چندکاناله مدل 4110 ساخت IAP، تقویت‌کننده طیف نگاری مدل 2021 ساخت Canberra و منبع تغذیه ولتاژ بالامدل 8100 ساخت IAP

¹ Light Yield

² Attenuate Length

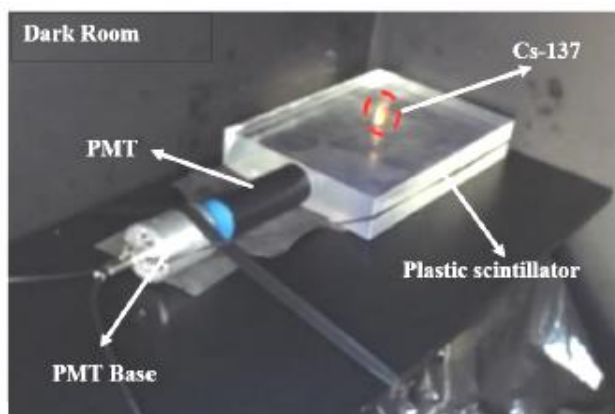
³ Rise Time

⁴ Decay Time

⁵ Width Half at Compton Edge

⁶ Compton Edge

⁷ Local Maximum



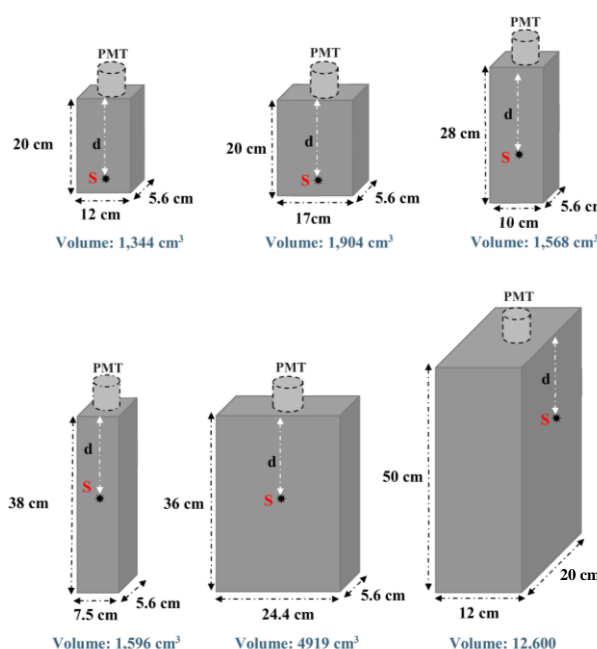
شکل (۳): نمایی از اندازه‌گیری تجربی.

۳. نتایج

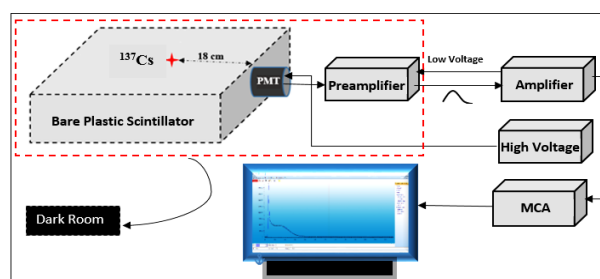
۱.۳. نتایج شبیه‌سازی ترابرد نور در GATE

شکل ۴، طیف فوتون‌های اپتیکی جمع‌آوری شده ناشی از طیف گامای ^{137}Cs در سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. تغییر بهره جمع‌آوری فوتون‌های اپتیکی با تغییر ابعاد سوسوزن به وضوح قابل مشاهده است. با بزرگ شدن ابعاد سوسوزن، شرایط جمع‌آوری فوتون نامناسب‌تر شده و لبه کامپتون بواسطه‌ی پالس‌های نوری با ارتفاع کمتر تشکیل شده است. در شکل ۵، موقعیت دقیق لبه کامپتون با استفاده از شبیه‌سازی چشمه الکترون با انرژی 477 keV در سوسوزن‌های با ابعاد مختلف آمده است. موقعیت لبه در طیف انرژی گامای سوسوزن پلاستیک معیاری از بهره جمع‌آوری فوتون را در سوسوزن‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که متناسب با حجم و پهنای سوسوزن، موقعیت لبه کامپتون در طیف انرژی تغییر یافته است. در جدول ۱، موقعیت دقیق قله مربوط به الکترون با انرژی 477 keV ، با برازش منحنی‌های گوسی مناسب آمده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول، بهره جمع‌آوری فوتون‌های اپتیکی با پهنای سوسوزن (Width) به صورت معکوس مرتبط می‌باشد. به عنوان مثال، در سوسوزن‌های با ابعاد $20 \times 12 \times 5.6\text{ cm}^3$ و

استفاده شده است. مجموعه سوسوزن پلاستیک، PMT، پیش تقویت‌کننده و چشمه سزیم داخل محفظه اتاقک تاریک، که هیچ‌گونه نوری از خارج اتاقک داخل آن نمی‌شود، واقع شده‌اند. به منظور اعمال تأثیر کیفیت اتصال اپتیکی بر نتایج اندازه‌گیری، طیف گاما چندین بار با کوپل مجدد PMT به سوسوزن اخذ شده و در نهایت طیف مربوط به بهترین کوپل اپتیکی برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده واقع شده است. طیف انرژی چشمه گامای ^{137}Cs در سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد $38 \times 7.5 \times 5.6\text{ cm}^3$ و $36 \times 24.4 \times 5.6\text{ cm}^3$ برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی اخذ شده است.

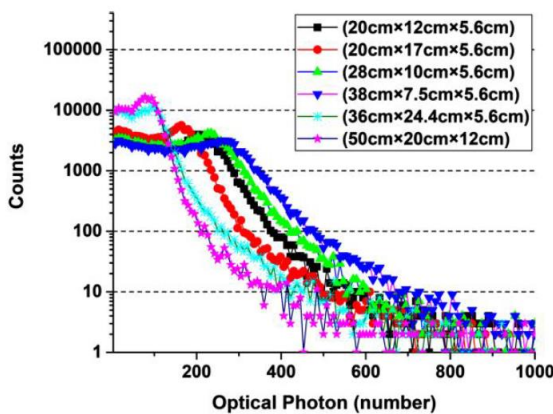


شکل (۱): هندسه سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف در شبیه‌سازی با کد GATE. S موقعیت چشمه روی سطح سوسوزن و d فاصله بین چشمه و PMT می‌باشد که برابر ۱۸ سانتی‌متر است.

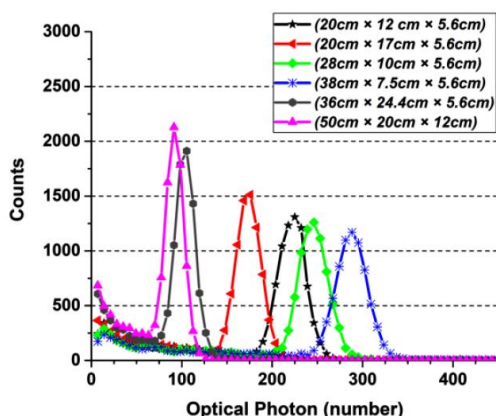


شکل (۲): چیدمان اندازه‌گیری تجربی سوسوزن پلاستیک.

سوسوزن‌های با ابعاد $20 \times 12 \text{ (width)} \times 5.6 \text{ cm}^3$ و $20 \times 17 \text{ (width)} \times 5.6 \text{ cm}^3$ که پهنای سوسوزن به ترتیب ۱۲ و ۱۷ سانتی‌متر می‌باشد، میزان WHCE بر حسب انرژی به ترتیب ۷۹ keV و ۸۶ keV است. یا اینکه، سوسوزن با ابعاد $28 \times 10 \text{ (width)} \times 5.6 \text{ cm}^3$ که کمترین پهنای را دارد، کمترین میزان WHCE که برابر ۵۵ keV می‌باشد، داراست. در این حالت بهترین قدرت تفکیک انرژی در لبه کامپتون به دست آمده است. در نتیجه، در مجموع، وابستگی بهره جمع‌آوری نور و قدرت تفکیک به پهنای سوسوزن بسیار بیشتر از دیگر ابعاد سوسوزن پلاستیک مکعبی می‌باشد.



شکل (۴): طیف نور مرئی جمع‌آوری شده ناشی از گامای ^{137}Cs در سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف با استفاده از شبیه‌سازی.



شکل (۵): طیف نور جمع‌آوری شده ناشی از الکترون با انرژی ۴۷۷ keV در سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف.

$20 \times 17 \text{ (width)} \times 5.6 \text{ cm}^3$ ، که پهنای سوسوزن به ترتیب ۱۲ و ۱۷ سانتی‌متر است، موقعیت لبه کامپتون در طیف نور جمع‌آوری شده به ترتیب در کانال‌های ۲۱۹ و ۱۷۰ قرار گرفته است. به بیان دیگر، پهنای سوسوزن با نسبت ۰/۷ کاهش یافته ولی میزان نور جمع‌آوری شده متناسب با عکس این مقدار افزایش یافته است. به عبارتی، اثر سطوح جانبی در جمع‌آوری فوتون‌های اپتیکی در PMT بسیار حائز اهمیت بوده و به هر میزان، سطوح در فاصله دورتری واقع گردند، نور کمتری به PMT می‌رسد و برعکس.

وجود نوسانات آماری در طیف پیوستار کامپتون هر یک از سوسوزن‌ها، تعیین دقیق موقعیت لبه کامپتون نسبت به بیشینه موضعی را با مشکل مواجه می‌سازد. برای رفع این مشکل، لازم است یک طیف صاف، از طریق برازش یک منحنی مناسب یا استفاده از روش‌های هموارسازی^۱، به دست آید.

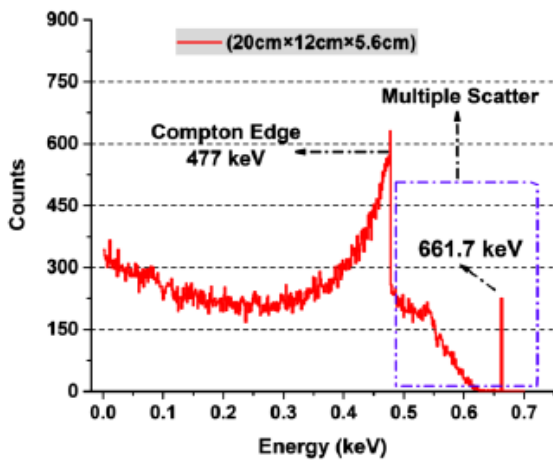
در اینجا، برای تعیین خطای محاسبات، عملیات هموارسازی طیف پیوستار کامپتون برای هر یک از سوسوزن‌ها، سه بار با روش‌های مختلف، در محیط نرم‌افزار TableCurve-2D نسخه 5.01، تکرار گردیده و مقدار میانگین با خطای استاندارد به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است. در جدول ۲، نسبت لبه کامپتون به بیشینه موضعی حاصل از این محاسبات و میزان پهن‌شدگی در لبه کامپتون، برای هر یک از سوسوزن‌ها آمده است. همانطوری که مشاهده می‌گردد، موقعیت لبه بر روی طیف پیوستار کامپتون نسبت به بیشینه موضعی، به مشخصات هندسی سوسوزن وابسته است، با اینحال، ارائه یک رابطه مشخص در این خصوص ممکن نگردیده است.

بررسی مقادیر مربوط به WHCE نشان می‌دهد که، میزان پهن‌شدگی در لبه کامپتون به ابعاد هندسی سوسوزن به ویژه به پهنای (Width) رابطه عکس دارد. به عنوان مثال، در

¹ Smoothing

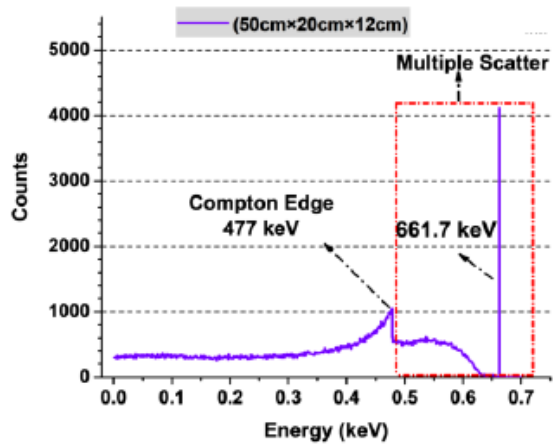
انرژی سوسوزن پلاستیک در ابعاد بزرگ نسبت به ابعاد کوچک سوسوزن می باشد.

جدول (۱): موقعیت قله در طیف نور جمع آوری شده الکترون با انرژی ۴۷۷ keV، با برازش منحنی گوسی.



Scintillation Dimensions (Length×Width×Thickness)	Electron Peak Position	R-Square
۲۰×۱۲×۵/۶ cm ^۳	۲۱۸/۹۵±۰/۱۷	۰/۹۸۷
۲۰×۱۷×۵/۶ cm ^۳	۱۷۰/۰۱±۰/۱۶	۰/۹۸۴
۲۸×۱۰×۵/۶ cm ^۳	۲۴۳/۰۱±۰/۱۸	۰/۹۸۴
۳۸×۷/۵×۵/۶ cm ^۳	۲۸۵/۳۸±۰/۱۹	۰/۹۸۴
۳۶×۲۴/۴×۵/۶ cm ^۳	۱۰۰/۹۹±۰/۱۵	۰/۹۸۴
۵۰×۲۰×۱۲ cm ^۳	۸۸/۵۹±۰/۱۸	۰/۹۸۶

جدول (۲): موقعیت لبه کامپتون نسبت به بیشینه موضعی در پیوستار کامپتون و میزان پهن شدگی در لبه کامپتون.



Scintillation Dimensions (Length×Width×Thickness)	Compton Edge to Local Maximum (%)	WHCE (keV)
۲۰×۱۲×۵/۶ cm ^۳	۹۵/۳۷±۰/۳۷	۷۹
۲۰×۱۷×۵/۶ cm ^۳	۹۵/۴۵±۰/۴۹	۸۶
۲۸×۱۰×۵/۶ cm ^۳	۹۰/۰۴±۰/۸۶	۶۷
۳۸×۷/۵×۵/۶ cm ^۳	۸۶/۴۳±۰/۴۰	۵۵
۳۶×۲۴/۴×۵/۶ cm ^۳	۹۴/۵۹±۰/۸۹	۱۰۳
۵۰×۲۰×۱۲ cm ^۳	۹۴/۷۹±۰/۵۸	۱۱۵

۲.۳. سهم پراکندگی چندگانه کامپتون

شکل (۱): طیف انرژی گامای جذب شده در دو سوسوزن پلاستیک با ابعاد مختلف.

در شکل ۱، برای نمونه، طیف انرژی جذب شده ناشی از گامای ۶۶۱/۷ keV در دو سوسوزن با ابعاد ۲۰×۱۲×۵/۶ cm^۳ و ۵۰×۲۰×۵/۶ cm^۳ آمده است. مشاهده می گردد که با تغییر ابعاد سوسوزن پراکندگی کامپتون چندگانه، که به صورت قله تمام انرژی ۶۶۱/۷ keV نیز ظاهر شده، نسبت به کل طیف انرژی جذب شده تغییر چشمگیری یافته است.

جدول (۳): سهم پراکندگی چندگانه در طیف انرژی جذب شده در سوسوزن های پلاستیک با ابعاد مختلف.

در جدول ۳، درصد پراکندگی کامپتون چندگانه نسبت به کل شمارش ها در هریک از سوسوزن های مورد مطالعه آمده است. ملاحظه می گردد، میزان پراکندگی چندگانه نسبت به کل طیف ثبت شده در دو سوسوزن فوق به ترتیب ۱۳/۳٪ و ۲۹/۲۸٪ می شود. در واقع، افزایش حجم سوسوزن باعث افزایش میزان پراکندگی چندگانه می گردد. این موضوع یکی از عوامل بدتر شدن قدرت تفکیک، به عبارتی، پهن شدگی بیشتر طیف

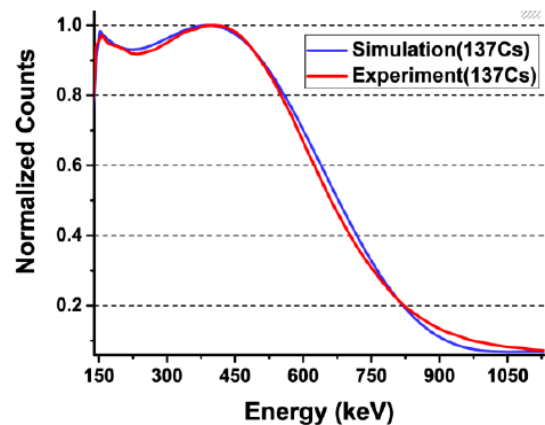
Scintillation Dimensions (Length×Width×Thickness)	Multiple Scatter (%)
۲۰×۱۲×۵/۶ cm ^۳	۱۳/۳۰
۲۰×۱۷×۵/۶ cm ^۳	۱۴/۷۱
۲۸×۱۰×۵/۶ cm ^۳	۱۴/۱۳
۳۸×۷/۵×۵/۶ cm ^۳	۱۳/۳۵
۳۶×۲۴/۴×۵/۶ cm ^۳	۱۹/۷۴
۵۰×۲۰×۱۲ cm ^۳	۲۹/۲۸

۳.۳. مقایسه شبیه سازی با اندازه گیری تجربی

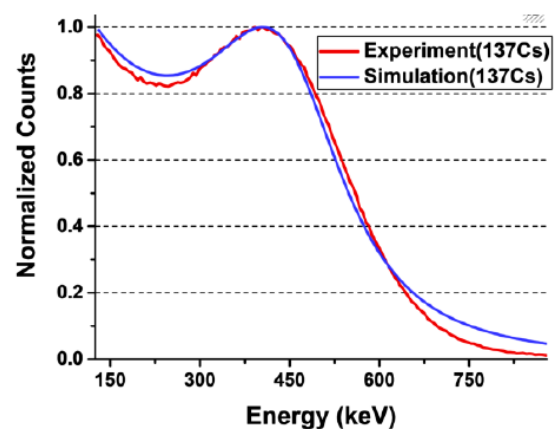
بر مبنای طیف انرژی تجربی چشمه ¹³⁷Cs در سوسوزن پلاستیک با ابعاد ۳۶×۲۴/۴×۵/۶ cm^۳، بهینه سازی پارامترهای

ورودی شبیه‌سازی مانند میزان سختی سطوح سوسوزن و اعمال اثرات پراکندگی ناشی از مواد اطراف سیستم آشکارسازی در محیط آزمایشگاه صورت پذیرفت.

در شکل ۷، طیف شبیه‌سازی حاصله و طیف تجربی به صورت بهنجار شده روی هم قرار داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد، نتایج محاسبات شبیه‌سازی ترابرد نور با اندازه‌گیری طیف تجربی بعد از کالیبراسیون انرژی انطباق خوبی با هم دارند. بر مبنای شبیه‌سازی اصلاح شده، طیف شبیه‌سازی چشمه ^{137}Cs با ترابرد نور در سوسوزن با ابعاد $38 \times 7 / 5 \times 5 / 6 \text{ cm}^3$ اخذ گردید و با طیف تجربی تطبیق داده شده است. در شکل ۸، نتایج این انطباق آمده است.



شکل (۷): انطباق طیف شبیه‌سازی با طیف اندازه‌گیری تجربی در سوسوزن با ابعاد $36 \times 24 / 4 \times 5 / 6 \text{ cm}^3$.



شکل (۸): انطباق طیف شبیه‌سازی با طیف اندازه‌گیری تجربی در سوسوزن با ابعاد $38 \times 7 / 5 \times 5 / 6 \text{ cm}^3$.

مشاهده می‌گردد، طیف شبیه‌سازی در این حالت نیز تطابق خوبی با طیف تجربی دارد. از این رو، نتایج حاصل از محاسبات شبیه‌سازی صورت گرفته در سوسوزن بزرگ مورد تایید می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

کالیبراسیون انرژی بدون داشتن موقعیت لبه کامپتون در طیف انرژی یک سوسوزن پلاستیک بزرگ ناممکن بوده و بدون کالیبراسیون انرژی امکان استفاده از اطلاعات انرژی طیف انرژی گاما تقریباً ممکن نخواهد بود. در حالت واقعی، برعکس حالت ایده‌آل، موقعیت لبه کامپتون در طیف انرژی سوسوزن پلاستیک در نقطه‌ای غیر از بیشینه موضعی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از کد شبیه‌سازی GATE، طیف انرژی تابش گاما ناشی از اندرکنش با سوسوزن‌های پلاستیک با ابعاد مختلف، با اعمال ترابرد فوتون‌های اپتیکی به‌دست آمد. موقعیت و میزان پهن شدگی در لبه کامپتون و بهره جمع‌آوری نور برای هر یک از سوسوزن‌های پلاستیک مکعب مستطیلی، از روی طیف حاصله استخراج شد. با توجه به نتایج حاصله، مشخص گردید که موقعیت لبه کامپتون نسبت به بیشینه موضعی در طیف سوسوزن به مجموعه ابعاد هندسی سوسوزن وابسته می‌باشد.

همچنین، مشخص گردید، قدرت تفکیک در لبه کامپتون با توجه به ابعاد سوسوزن تغییر می‌نماید، در این خصوص، پارامتر پهنای یا به عبارتی فاصله سطوح جانبی از PMT اثر تعیین‌کننده‌تری داشت. کاهش پهنای سوسوزن باعث افزایش بهره جمع‌آوری نور گردید. این نکته می‌تواند برای طراحی یک آشکارساز سوسوزن پلاستیک با هندسه مناسب برای دستیابی به بهره نوری و قدرت تفکیک انرژی مناسب مفید باشد.

۵. مراجع

- [1] G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, (2010).
- [2] N. Tsoulfanidis. Measurement and Detection of Radiation, CRC press, (2010).
- [3] V.M. Varier. Nuclear Radiation Detection, Measurements and Analysis, Alpha Science, (2009).
- [4] M.A. Alkis. Threat of Nuclear Terrorism: Towards an Effective Nuclear Security Regime, Sosyal Bilimler Enstitüsü, (2017).
- [5] V. Antonuccio, M. Bandieramonte, U. Becciani, D. L. Bonanno, G. Bonanno, D. Bongiovanni, P.G. Fallica, S. Garozzo, A. Grillo, P. La Rocca and E. Leonora.. The Muon Portal Project: Design and Construction of a Scanning Portal based on Muon Tomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 845 (2017) 322–325.
- [6] P. Ghorbani, D. Sardari, R. Azimirad and M. Hosntalab. Assessment of Optical Photon Collection in a Large Plastic Scintillator using GEANT4-GATE Code, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 158 (2018) 305–311.
- [7] K. Guthe. The Global Nuclear Detection Architecture and the Deterrence of Nuclear Terrorism, Comparative Strategy, 33 (2014) 424–450.
- [8] G. Dietze. Energy Calibration of NE-213 Scintillation Counters by γ -Rays, IEEE Transactions on Nuclear Science, 26 (1979) 398–402.
- [9] P. Kuijper, C. Tiesinga and C. Jonker. Light Attenuation in Scintillation Counters, Nuclear Instruments and Methods, 42 (1) (1966) 56–60.
- [10] L. Beghian, S. Wilensky and W. Burrus. A Fast Neutron Spectrometer Capable of Nanosecond Time Gating, Nuclear Instruments and Methods, 35(1) (1965) 34–44.
- [11] A. Bertin, A. Vitale and A. Placci. A System of Large Liquid Scintillation Counters used with a Simplified Neutron-Gamma Discrimination Technique, Nuclear Instruments and Methods, 68(1) (1969) 24–38.
- [12] R. Honecker and H. Grässler. Detection Efficiency of a Plastic Scintillator for Neutrons between 0.2 and 3 MeV, Nuclear Instruments and Methods, 46(2) (1967) 282–288.
- [13] H. Knox and T. Miller. A Technique for Determining Bias Settings for Organic Scintillators, Nuclear Instruments and Methods, 101(3) (1972) 519–525.
- [14] M.J. Safari, F. Abbasi Davani, H. Afarideh, S. Jamili and E. Bayat. Discrete Fourier Transform Method for Discrimination of Digital Scintillation Pulses in Mixed Neutron-Gamma Fields. IEEE Transactions on Nuclear Science, 63(1) (2016) 325–332.
- [15] J. Nilsson and M. Isaksson. The Design of a Low Activity Laboratory Housing a Whole Body Counter consisting of Large Plastic Scintillators and the Work towards a Flexible Monte Carlo Calibration, Progress in Nuclear Science and Technology, 4 (2014) 427–431.
- [16] J. Nilsson and M. Isaksson. A Monte Carlo Calibration of a Whole Body Counter using the ICRP Computational Phantoms, Radiation Protection Dosimetry, 163(4) (2014) 458–467.
- [17] J. Nilsson, V. Cuplov and M. Isaksson. Identifying Key Surface Parameters for Optical Photon Transport in GEANT4/GATE Simulations. Applied Radiation and Isotopes, 103(2015) 15–24.