کاهش زمینه و بهبود طیف با فرونشانی کامپتون بوسیله تکنیک غیرهمزمانی

INC29-1020

سارا شوریان[۱]، حمید جعفری

دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

سیستم‌های طیف‌نگاری گاما دارای دو محدودیت بهره آشکارساز و زمینه می‌باشند که افزایش بهره آشکارساز همیشه از نظر اقتصادی به‌صرفه نبوده و لذا راه معمول، کاهش زمینه است. یکی از منابع اصلی زمینه در طیف‌نگاری گاما، مربوط به پراکندگی کامپتون می‌باشد. در این کار، نتایج سه پیکربندی فرونشانی کامپتون و کاهش اثر زمینه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده است. عملکرد غیرهمزمانی آشکارسازهای محافظ NaI (یا BGO) زمینه کل آشکارساز HPGe را کاهش می‌دهد. با شیلد نمودن سیستم غیرهمزمانی توسط یک حفاظ سربی، می‌توان از ثبت ناخواسته پرتوهای زمینه تا حدود زیادی جلوگیری نموده و طیف را بهبود بخشید. تکنیک فرونشانی کامپتون برای کاهش تابش زمینه کاملاً سودمند واقع شده و نتایج نشان داد که با اعمال روش غیرهمزمانی با پیکربندی حلقوی می‌توان پیوستار کامپتون را حدود ۱۰ برابر کاهش داد. همچنین، استفاده از پیکربندی چاه در کاهش پیوستار کامپتون تاثیر چشمگیری نداشته اما بهره فوتوپیک را به حدود ۲/۷ برابر افزایش داد.

کلیدواژه‌ها: بهبود طیف، حذف کامپتون، تکنیک غیرهمزمانی، طیف‌نگاری

Background Reduction and Spectral Enhancement by Compton Suppression Using Anticoincidence Technique

Sarah Shoorian *, Hamid Jafari

Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

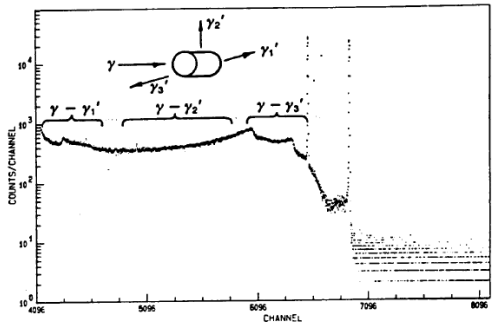
The two main constraints of gamma spectroscopy's are the detector gain and background; increasing the detector gain wouldn't always be cost-effective, hence the usual way would be to reduce background. The results of three configurations concerning Compton suppression and reduction of the background effect are presented using the Monte Carlo simulations. The anti-coincidence action of the NaI (or BGO) detectors lowers the total background of the HPGe detector. Undesirable background recording can be prevented, providing a Pb shield for the anticoincidence system. The anti-Compton technique turned out to be quite advantageous for the reduction of the background radiation and results indicate that applying an annular anticoincidence setup to the system could reduce Compton continuum about ten times. In addition, using a well configuration didn't affect Compton continuum significantly, but it enhanced photopeak efficiency by a factor of 2.7.

Keywords: Spectral Enhancement, Compton Suppression, Anticoincidence Technique, Spectroscopy.

* Email: sa.shoorian@mail.sbu. ac.ir

۱. مقدمه

طیف‌نگاری دقیق گاما بطور گسترده توسط آشکارسازهای HPGe انجام می‌شود. محدودیت سیستم طیف‌نگاری گاما توسط دو عامل تعیین می‌شود: بهره آشکارساز و زمینه آن. برای دست‌یابی به بهره‌های بالاتر، باید از آشکارسازهای بزرگتر استفاده نمود، اما قیمت این آشکارسازها بالا بوده و لذا راه معمول، کاهش زمینه است. یکی از منابع اصلی زمینه در طیف‌نگاری گاما، مربوط به پراکندگی کامپتون می‌باشد. هنگامی‌که فوتون‌ها در آشکارساز دچار پراکندگی کامپتون شوند، تنها بخشی از انرژی آن‌ها به آشکارساز منتقل شده، و در ساخت پالس اصلی فوتوپیک سهیم نخواهند بود؛ در نتیجه در کانال انرژی‌های پایین‌تر و جزء زمینه قرار خواهند گرفت. شکل رابطه بین زاویه پراکندگی و پیوستار کامپتون را در طیف یک آشکارساز Ge متداول نشان می‌دهد. عدم تشخیص فوتون‌های پراکنده‌شده در هر کدام از جهات، نرخ فرونشانی را در ناحیه کامپتون مربوطه تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۱. زوایای پراکندگی کامپتون و پیوستار کامپتون[۱]

یک روش عملی برای حل این مشکل، قرار دادن یک آشکارساز دیگر در اطراف آشکارساز اصلی و کارکرد این دو آشکارساز در حالت غیرهمزمانی است. پالس‌های همزمان دو آشکارساز، غالبا ناشی از پراکندگی کامپتون بوده، و با عدم شمارش این پالس‌ها، زمینه کاهش پیدا خواهد کرد[۲]. آشکارساز غیرهمزمان (ACD[1]) به‌گونه‌ای طراحی می‌شود تا بخش اعظم ذرات باردار را، که در آزمایشات پرتو گاما نقش زمینه را دارند، حذف کند. استفاده از یک آشکارساز سوسوزن پلاستیکی غیرهمزمان روشی کم هزینه، با قابلیت اطمینان و بهره بالا برای حذف زمینه می‌باشد[۳]. مدار فرونشانی کامپتون، اگر به درستی تنظیم نشود، ممکن است رویدادهای فوتوپیک را نیز حذف کرده، بازده شمارش را کاهش داده و عملکرد را بدتر کند. باید خاطر نشان نمود که در این روش فرونشانی کامپتون، بهره همیشه کاهش خواهد داشت، و اگر پرتوهای گاما بصورت آبشاری ساطع شوند (مانند ^{134}Cs)، این کاهش بهره چشم‌گیر خواهد بود. در نتیجه، روش غیرهمزمانی، برای رادیوایزوتوپ‌هایی که بصورت آبشاری واپاشی می‌کنند، مناسب نمی‌باشد[۲].

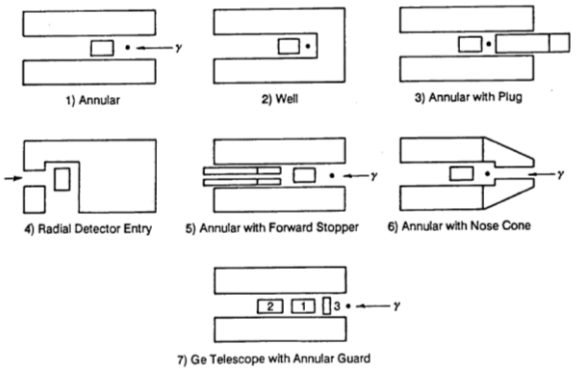
۲. روش کار

همانگونه که گفته شد برای بهبود تشخیص قله‌های گاما با شدت پایین، باید با استفاده از یکی از تکنیک‌های فرونشانی کامپتون، پیوستار کامپتون را کاهش داد. سیستم فرونشانی کامپتون شامل یک آشکارساز Ge، معمولا یک HPGe، و شمارنده محافظ در اطراف[2] آن می‌باشد. همچنین از یک شیلد، معمولا سرب، برای کاهش سهم زمینه از چشمه‌های گامای محیطی در اطراف آشکارساز محافظ استفاده می‌شود. برای اکثر سیستم‌های فرونشانی کامپتون، شمارنده محافظ زاویه 4π را برای ثبت گاماهای پراکنده‌شده که از کریستال Ge فرار می‌کنند، پوشش می‌دهد[۴].

بهره آشکارساز محافظ به چگالی و ضخامت ماده سازنده آشکارساز بستگی دارد. NaI(Tl) و BGO بطور گسترده در طیف‌نگاری‌های فرونشانی کامپتون مورد استفاده قرار می‌گیرند. چگالی بیشتر BGO، ۷/۱۳ gr/cm^3، باعث ضریب تضعیف خطی بالاتری در مقایسه با NaI(Tl)، با چگالی ۳/۶۶۷ gr/cm^3، می‌شود. در نتیجه، برای دست‌یابی به فرونشانی یکسان، ابعاد آشکارساز محافظ BGO در مقایسه با NaI کوچکتر خواهد بود[۱].

[1] Anti-Coincidence Detector
[2] Surrounding Guard Counter

پیکربندی‌های معمول Ge و آشکارسازهای محافظ در **شکل ۲** نشان داده شده است. پیکربندی‌هایی که با (•) مشخص شده‌اند، مناسب شمارش نمونه می‌باشند. سایر پیکربندی‌ها که با (γ→) نمایش داده شده‌اند، مسیر ورود پرتو گاما را نشان داده و برخی از پیکربندی‌ها مناسب هر دو نوع استفاده می‌باشند.



شکل ۲. پیکربندی‌های متفاوت Ge / آشکارساز محافظ[۱]

۱. محافظ حلقوی[۱] - متداول‌ترین طراحی بوده و دربردارنده زوایای فرار بزرگ می‌باشد.
۲. محافظ چاه[۲] - اگر یک سیستم برای جابجایی راحت و ایمن آشکارسازها برای ورود نمونه مهیا باشد، مناسب شمارش نمونه است.
۳. محافظ حلقوی به همراه توپی[۳] - افزودن توپی در بالای نمونه لبه‌های کامپتون را به شدت کاهش خواهد داد.
۴. آشکارساز با ورودی شعاعی[۴] - یک ناحیه محافظ ضخیم در جهت پراکندگی مستقیم باعث کاهش زمینه کم انرژی می‌شود.
۵. حلقوی با متوقف‌کننده مستقیم[۵] - آشکارسازهای شبه‌استوانه‌ای کوچک به بهبود بهره پراکندگی مستقیم کمک می‌کنند.
۶. حلقوی با مخروط دماغه[۶] - یک مخروط دماغه با قطر کاهش‌یافته، بهره پراکندگی رو به عقب را افزایش می‌دهد.
۷. تلسکوپ Ge با محافظ حلقوی[۷] - یک تلسکوپ دو یا سه جزئی، یک محافظ Ge برای پراکندگی مستقیم (۲) و رو به عقب (۳) فراهم می‌کند[۱].

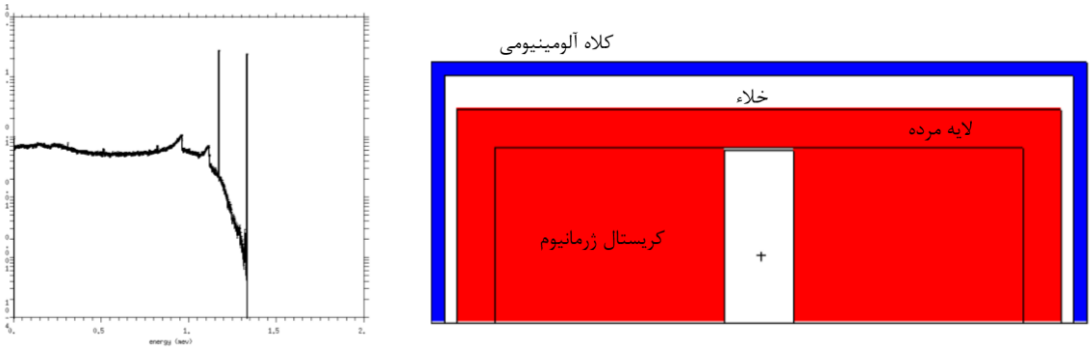
آشکارساز اصلی سیستم فروشانی کامپتون، آشکارساز HPGe، مطابق اطلاعات درج شده در جدول ۱ توسط کد MCNPX شبیه‌سازی شده است. هندسه این آشکارساز که توسط MCNP Visual Editor رسم شده است، در شکل ۳ تصویر سمت راست - مشاهده می شود. جهت اطمینان از درستی هندسه آشکارساز، یک چشمه ^{60}Co در یک سانتی‌متری آشکارساز قرار داده شده و نمونه‌برداری در بازه انرژی ۰/۰۱ الکترون‌ولت تا ۲ مگاالکترون‌ولت و با گام‌های ۱ کیلوالکترون‌ولت انجام شده است. شکل طیف چشمه ^{60}Co آشکارساز شبیه‌سازی‌شده که توسط Reflection رسم شده است، در شکل ۳ تصویر سمت چپ - نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای آشکارساز HPGe جهت شبیه‌سازی

پارامتر	ابعاد (cm)
ضخامت کلاه[۸] آلومینیومی	۰/۱۵
شعاع کلاه آلومینیومی	۳,۷

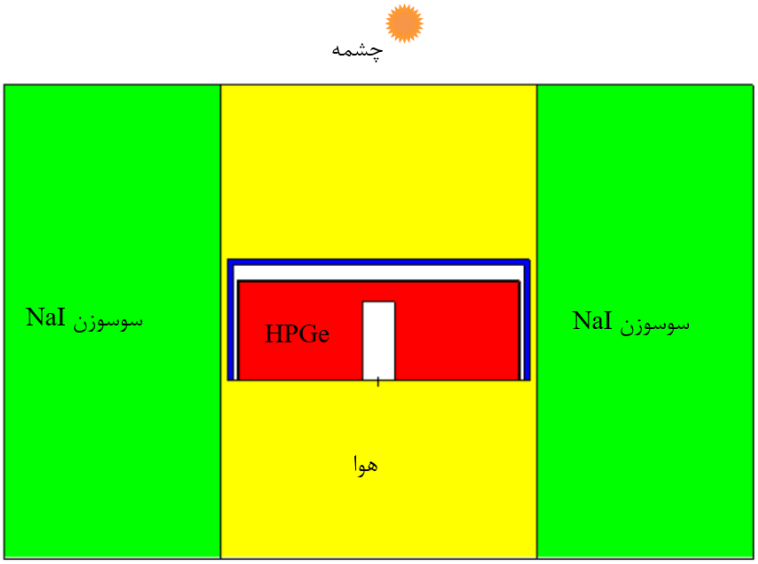
[1] Annular Guard
[2] Well Guard
[3] Annular Guard with Plug
[4] Radial Detector Entry
[5] Annular with Forward Stopper
[6] Annular with Nose Cone
[7] Ge Telescope with Annular Guard
[8] Cap

ضخامت لایه مرده آلومینیومی	۰,۰۴۵
فاصله کریستال تا کلاه	۰,۴
ارتفاع کریستال ژرمانیوم	۲,۵
شعاع کریستال ژرمانیوم	۳,۵۵
ارتفاع حفره مرکزی	۲,۰۲۵
شعاع حفره مرکزی	۰,۴



شکل ۳. تصویر راست: هندسه آشکارساز HPGe – تصویر چپ طیف ^{60}Co ثبت‌شده در آشکارساز HPGe

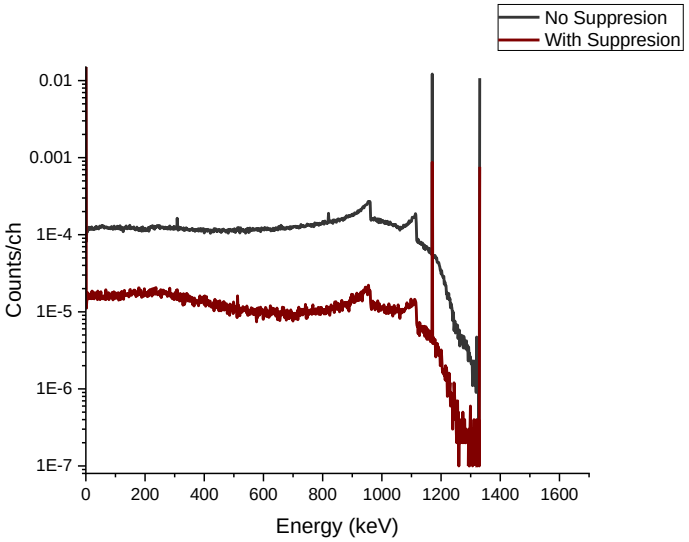
در گام اول، ساختار محافظ حلقوی با آشکارساز سوسوزن NaI بعنوان آشکارساز محافظ، مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه این سیستم در شکل ۴ نشان داده شده است. در این پیکربندی، آشکارساز اصلی، HPGe نشان‌داده شده در شکل ۳ با مشخصات آمده در جدول ۱ می‌باشد که یک آشکارساز سوسوزن NaI آن را احاطه کرده است. برای ثبت طیف کاهش‌یافته، از تالی f8 به همراه کارت ft و گزینه PHL (ft8 PHL 1 6 1 1 16 1) استفاده شده است. گزینه PHL یک تالی ارتفاع پالس غیرهمزمان در دو ناحیه (آشکارساز) که با تالی f6 مشخص می‌شوند را مدل می‌کند.



شکل ۴. هندسه سیستم غیرهمزمانی با پیکربندی محافظ حلقوی

شکل طیف ^{60}Co ثبت‌شده در HPGe بدون حضور آشکارساز محافظ و اعمال روش غیرهمزمانی و پس از اعمال روش همزمانی با پیکربندی حلقوی در شکل ۵ آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود و پیش‌تر هم گفته شد، استفاده از

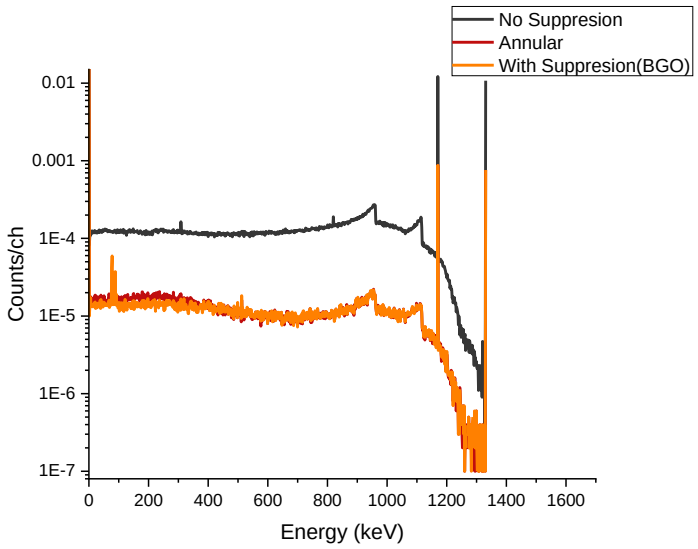
تکنیک غیرهمزمانی، علاوه بر کاهش پیوستار کامپتون، فوتوپیک را نیز حدود ۱/۵ مرتبه کاهش داده و باعث افت بهره آ شکار ساز می شود. با قرار دادن آ شکار ساز سو سوزن NaI با ضخامت ۵/۵ cm در اطراف HPGe می‌توان پیو ستار کامپتون را حدود ده برابر کاهش داد که این امر در تطابق با [۴] نیز می‌باشد.



شکل ۵. طیف ^{60}Co ثبت‌شده در آشکارساز پیش و پس از اعمال روش غیرهمزمانی با پیکربندی محافظ حلقوی

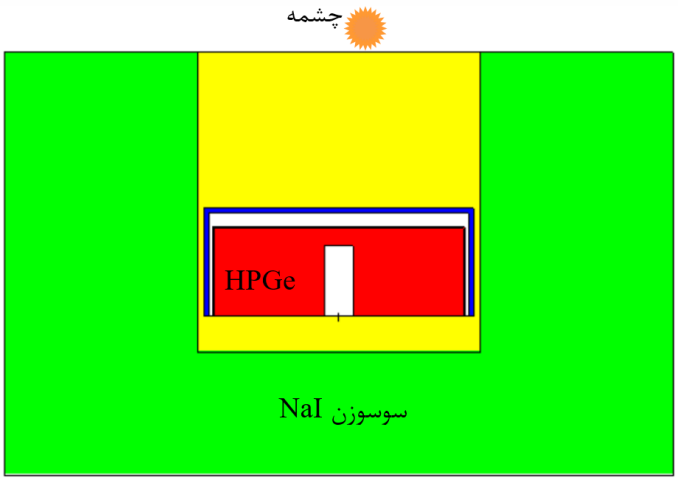
در گام بعد، در ساختار محافظ حلقوی، آشکارساز BGO که دارای چگالی بالاتری نسبت به NaI می‌باشد، بعنوان آ شکار ساز محیطی جایگزین NaI شده تا تاثیر چگالی بر طیف ثبت شده مورد برر سی قرار گیرد. آ شکار ساز BGO با ضخامتی برابر با NaI، ۵/۵ cm، در این پیکربندی قرار داده شده ا ست. طیف ^{60}Co ثبت شده در HPGe بدون اعمال روش غیرهمزمانی و پس از اعمال روش همزمانی با آشکارساز BGO، در شکل ۶ آمده است.

همانگونه که م شاهده می شود آ شکار ساز BGO، رفتاری م شابه NaI دا شته و پیو ستار کامپتون را کاهش می‌دهد. در سایر شبیه‌سازی‌ها، با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات مربوط به BGO (برای کاهش خطا nps آن نسبت به حالت نشان داده شده در شکل ۶، یک مرتبه افزایش داده شد که پس از ۸ ساعت تنها حدود ۱/۲٪ از برنامه اجرا شد) آشکارساز محافظ NaI در نظر گرفته شده است.



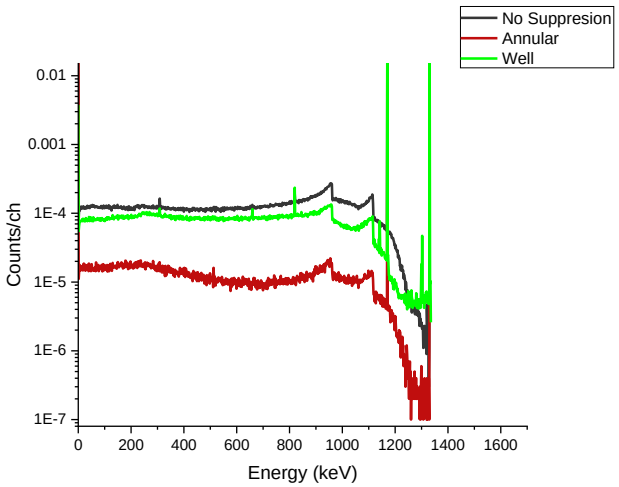
شکل ۶. طیف ^{60}Co ثبت‌شده در آشکارساز پیش و پس از اعمال روش غیرهمزمانی با آشکارساز BGO در پیکربندی حلقوی

در ادامه پیکربندی چاه، با محافظ NaI با شرایط یکسان با پیکربندی حلقوی برای بررسی اثر افزودن آشکارساز محافظ در جهت پراکندگی مستقیم فوتون شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. شکل این پیکربندی که توسط MCNP Visual Editor رسم شده است، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. پیکربندی چاه برای اعمال روش غیرهمزمانی

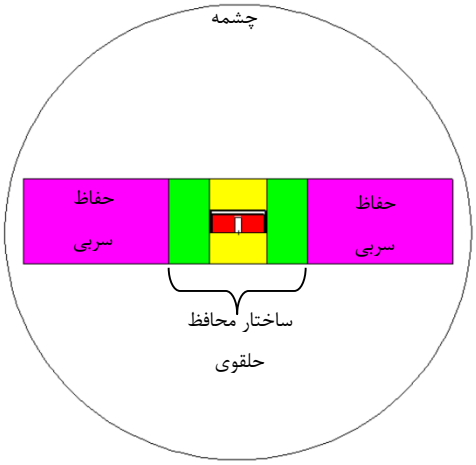
طیف ^{60}Co ثبت‌شده در HPGe بدون اعمال روش غیرهمزمانی و پس از اعمال روش همزمانی با آشکارساز NaI، برای دو پیکربندی حلقوی و چاه در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده، اعمال روش غیرهمزمانی با پیکربندی چاه، باعث کاهش پیوستار کامپتون، حدود ۳۰٪ در بهترین حالت، می‌شود ولی فرونشانی کامپتون در این پیکربندی نسبت به پیکربندی حلقوی حدود ۱۰ برابر کمتر می‌باشد. از طرفی در پیکربندی چاه، نه تنها فوتوپیک تضعیف نشده، بلکه تقریبا ۲/۷ برابر می شود و بهره تمام پیک تنزل پیدا نخواهد کرد. لذا در کاربردهایی که بهره تمام پیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، استفاده از این پیکربندی بر حلقوی ارجحیت خواهد داشت.



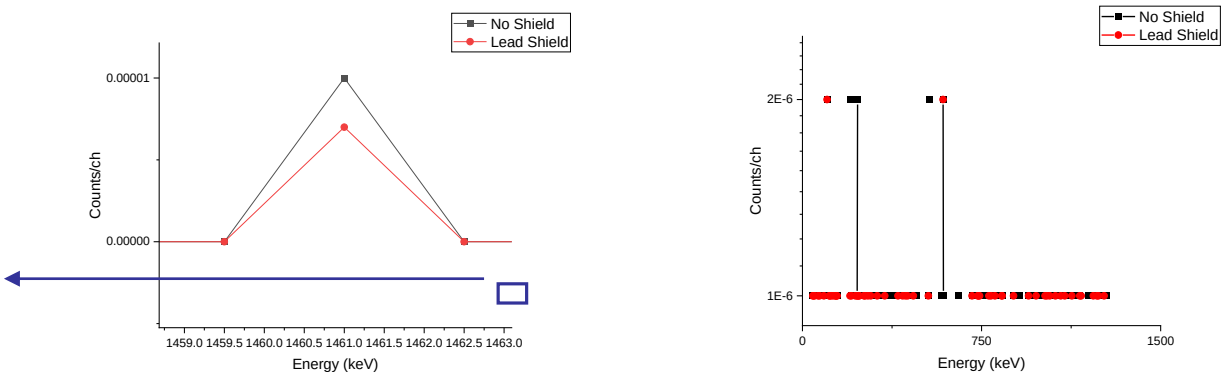
شکل ۸. طیف ^{60}Co ثبت‌شده در آشکارساز با اعمال روش غیرهمزمانی در پیکربندی چاه

تکنیک فرونشانی کامپتون برای کاهش اجزای زمینه نیز موثر می‌باشد؛ هرچند، برخی از تابش‌های زمینه که دارای انرژی بالایی هستند، از آشکارساز محافظ عبور کرده و در HPGe ثبت می شوند. چنین پرتوهایی را می‌توان با استفاده از شیلد سربی، تضعیف نمود[۴]. برای بررسی اثر شیلد بر طیف ثبت شده در آشکارساز، یک چشمه سطحی ^{40}K که یک سیستم غیرهمزمانی حلقوی را احاطه کرده باشد، تعریف شده است. طیف ^{40}K با حضور شیلد سربی ۵ cm [۴] (مطابق شکل ۹)، و بدون آن محاسبه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با شیلد

نمودن سیستم غیرهمزمانی توسط یک حفاظ سربی، می‌توان از ثبت ناخواسته پرتوهای زمینه تا حدودی، در مورد ^{40}K و ۵ cm سرب حدود ۳۰٪، جلوگیری نمود.



شکل ۹. هندسه سیستم غیرهمزمانی با پیکربندی محافظ حلقوی و شیلد سربی



شکل ۱۰. تاثیر استفاده از شیلد سربی

3. نتیجه‌گیری

استفاده از پیکربندی چاه در سیستم غیرهمزمانی فرونشانی کامپتون، باعث کاهش حدود ۳۰٪ پیوستار کامپتون و افزایش ۱/۷ برابری بهره فوتوپیک می‌شود؛ لذا در مواردی که شدت چشمه کم بوده و بهره فوتوپیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بهتر است از این پیکربندی استفاده نمود. اما در مواردی‌که شدت چشمه به اندازه کافی بالا بوده و کاهش بهره فوتوپیک باعث ایجاد مشکل نشود، با بکارگیری پیکربندی حلقوی به همراه یک شیلد سربی می‌توان زمینه و پیوستار کامپتون را کاهش داده و طیف را بهبود بخشید.

4. مراجع

1. CANBERRA, *Compton Suppression ... Made Easy*, in *Application Note*.
2. Levinson, S., et al., *Background reduction of a HPGe-BGO anti-Compton system and its application to soil contamination monitoring*. 2004.
3. Thompson, D., *Anti-Coincidence Detector For GLAST*. 2002: United States.
4. Tsutsumi, M., et al., *Design of an Anti-Compton Spectrometer for Low-Level Radioactive Wastes using Monte Carlo Techniques.* Journal of Nuclear Science and Technology, 2002. **39**(9): p. 957-963.