



## داده‌برداری لیست‌مد برای کاهش پیوستار کامپتون

مهدی تورنگ<sup>۱</sup>، اصغر حدادی<sup>۱\*</sup>، میترا اطهری علاف<sup>۲</sup>، داریوش سرداری<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی پرتویزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵-۷۷۵، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی: ۱۴۵۱۵-۷۷۵، تهران، ایران

\*Email: haddadi14857@yahoo.com

### مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۱/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۵

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از یک آشکارساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یک آشکارساز یدورسیدیم پیوستار کامپتون کاهش داده شد. در روش داده‌برداری استفاده شده، به جای استفاده از واحدهای الکترونیکی زمان‌گیری و چیدمان‌های پیچیده هم‌فرودی، از روش لیست‌مد استفاده شد که در آن زمان هر رخداد نیز ثبت می‌شود. بیش‌ترین مقدار فاکتور فرونشانی در چشمه سزیوم-۱۳۷ نقطه‌ای عدد ۳/۳۸ به دست آمد. برای برپایی چیدمان به کار رفته در این تحقیق از واحدهای الکترونیک هسته‌ای آنالوگ استفاده شده و اثبات توانایی روش داده‌برداری لیست‌مد در کاهش پیوستار کامپتون در طیف گاما مورد نظر بوده است. در روش داده‌برداری لیست‌مد زمان هر رخداد نیز ثبت می‌شود و بنابراین پس از داده‌برداری می‌توان طیف را برای زمان‌های مختلف بازبایی کرد و نیازی به تکرار آزمایش نیست. با استفاده از این روش نمونه‌های رادیواکتیو با مقدار فعالیت کم را می‌توان آشکارسازی کرد.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز ژرمانیم فوق خالص، فرونشانی کامپتون، لیست‌مد، طیف گاما، رادیواکتیویته کم

## List mode data acquisition for Compton continuum suppression

M. Tourang<sup>1</sup>, A. Hadadi<sup>1\*</sup>, M. Athari-Allaf<sup>2</sup>, D. Sardari<sup>1</sup>

1. Department of Medical Radiation Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 14515-775, Tehran-Iran

2. Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 14515-775, Tehran-Iran

### Technical Paper

Received 22.1.2021, Accepted 23.2.2021

### Abstract

This research uses the portable HPGe and NaI(Tl) detectors for Compton continuum suppression. In the List mode data acquisition technique, we did not use timing module and complicated experimental setup that recorded the time stamp of each event. The maximum suppression factor (SF) in Cs-137 point source was 3.8. By using this technique, we can detect samples that contain very low radioactivity. The experimental setup in this research was based on analog nuclear electronic modules. The study's main goal was the ability of list-mode data acquisition in Compton continuum suppression. In this way, lower levels of radioactivity can be detected in any sample.

**Keywords:** HPGe detector, Compton suppression, List mode, Gamma spectrum, Low radioactivity



## ۱. مقدمه

آشکارساز استخراج شد. با این روش زمینه کامپتون برای قله‌ی رایونوکلید سرب-۲۱۰ تا حدود ۱۵٪ کاهش یافت. یکی از محاسن روش داده‌برداری لیست‌مد، امکان پس‌پردازش داده‌ها در همه‌ی بازه‌های زمانی است که به کاربر قدرت مانور زیادی می‌دهد [۴].

لیسیکا<sup>۳</sup> [۳] از حفاظ فعال و غیرفعال برای کاهش زمینه در یک سیستم شمارش گاما استفاده کرده است. رادیواکتیویته موجود در محیط اطراف و حفاظ سربی، پرتوهای کیهانی و رادون موجود در هوا در افزایش زمینه نمونه‌های فیلتر کاغذی نقش زیادی دارند. زمینه پیوستار کامپتون ناشی از فرار بخشی از انرژی پرتوهای گامای فرودی به آشکارساز است. بیش‌تر مشکلات پیوستار کامپتون مربوط به رادیونوکلیدهایی با انرژی کم مانند سرب-۲۱۰، توریم-۲۳۴، اورانیوم-۲۳۵ و رادیوم-۲۲۶ است که معمولاً غلظت کمی در نمونه‌های فیلتر هوا دارند. به‌نظر می‌رسد این رادیونوکلیدها بهترین انتخاب برای بررسی فرونشانی پیوستار کامپتون باشند.

مقدار حداقل فعالیت قابل آشکارسازی (MDA) برای قله‌های گامای برخی عناصر رادیواکتیو مانند سرب-۲۱۰، توریم-۲۳۴، اورانیوم-۲۳۵ و رادیوم-۲۲۶ در حالت ژرمانیم فوق‌خالص تنها و حالت ژرمانیم فوق‌خالص با سیستم فرونشانی کامپتون پادهم‌فرودی مقایسه شده است. در واقع MDA کم‌ترین شمارش خالصی است که با اطمینان برای گزارش فعالیت یک نمونه می‌توان گزارش کرد و افت‌وخیز آماری در آن دخیل نیست. در این تحقیق مشخص شد که در مد پادهم‌فرودی بین ۵ تا ۱۶ درصد MDA بهبود داده شده و FOM بین ۱۰ تا ۳۷ درصد بهبود یافته است.



شکل ۱. چیدمان هم‌فرودی دو آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص با داده‌برداری لیست‌مد.

کنترل رادیواکتیویته در محیط و مواد غذایی خیلی مهم و حیاتی است. با توجه به حساسیت این موضوع، برآورد دقیق فعالیت رادیونوکلیدها اهمیت بالایی دارد. یکی از روش‌های غیرمخرب در اندازه‌گیری رادیواکتیویته در نمونه‌های مختلف، طیف‌نگاری با آشکارساز فوق‌خالص ژرمانیم (HPGe) است. محدوده انرژی برای شناسایی رادیونوکلیدهای محیطی موردنظر معمولاً بین ۲۰۰۰-۳۰ keV و یا ۳۰۰۰-۳۰ keV است [۱]. با گسترش کاربرد پرتوها در زندگی مردم، اطمینان از عدم آلودگی محیط در اولویت قرار دارد. آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص یکی از آشکارسازهای مدرن و با قدرت تفکیک بالا جهت طیف‌نگاری گاما است [۲].

برخی فعالیت‌های هسته‌ای باعث پخش رادیونوکلیدها در جو می‌شوند. مقدار فعالیت رادیونوکلیدهای معلق در هوا جهت برآورد میزان پرتوگیری انسان‌ها از طریق استنشاق مواد پرتوزا محاسبه می‌شود. این رادیونوکلیدها ممکن است در فعالیت‌های هسته‌ای تولید شوند و یا از جمله رادیونوکلیدهای طبیعی و یا رادیونوکلیدهای تولید شده در اندرکنش‌های پرتوهای کیهانی باشند [۳].

گاهی ممکن است مقدار فعالیت رادیونوکلیدهای مصنوعی موجود در هوا، محیط و مواد غذایی خیلی ناچیز باشد و همان مقدار کم اکتیویته اگر از راه استنشاق و بلع وارد بدن گردد که منجر به پرتوگیری داخلی شود. از این‌رو برآورد همین مقادیر ناچیز از فعالیت رادیونوکلیدها هم اهمیت دارد. برخی روش‌های طیف‌نگاری برای کاهش پیوستار کامپتون و آشکارسازی مقادیر کم‌تر رادیونوکلیدها به‌کار گرفته می‌شوند.

در آنالیز نمونه‌های محیطی استفاده از روش هم‌فرودی باعث کم‌تر شدن حد آشکارسازی می‌شود [۴].

مارکوویچ<sup>۱</sup> و همکاران [۴] از دو آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص با سیستم داده‌برداری دیجیتال استفاده کرده‌اند که در حالت لیست‌مد با قدرت تفکیک زمانی ۱۰ ns کار می‌کند (شکل ۱). در این روش دو آشکارساز روبه‌روی هم قرار می‌گیرد و داده‌های هر دو آشکارساز به همراه زمان هر رخداد ثبت می‌شود. با پس‌پردازش<sup>۲</sup> داده‌ها و انتخاب رخدادهایی که در زمان مشخصی در هر دو آشکارساز ثبت شده است، می‌توان داده‌های اصلی را جدا کرد. پس از جمع‌آوری طیف در پنجره زمانی ۱/۲ μs پس‌پردازش داده‌ها انجام شد و جمع هم‌فرودی طیف دو

3. Magdalena Długosz-Lisiecka [2017]

1. Nikola Marković [2016]  
2. Post Processing



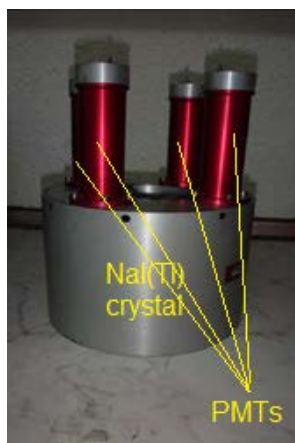
چندکاناله (MPA) استفاده شده قابلیت ثبت زمان هر رخداد<sup>۴</sup> را دارد و برای چیدمان مشخصی می‌توان طیف هم‌فرودی را به صورت نرم‌افزاری بازتولید<sup>۵</sup> کرد. با این روش نیازی به داده‌برداری مجدد نیست و با یک بار داده‌برداری می‌توان برای زمان‌های مختلف هم‌فرودی طیف را بازبازی کرد.

برای برپایی چیدمان در این تحقیق از دو آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص قابل حمل (شکل ۲) و آشکارساز یدور سدیم حلقوی (شکل ۳) استفاده شده است.

برای داده‌برداری به‌جای چیدمان پیچیده زمان‌گیری، از چیدمان نسبتاً ساده زیر استفاده شده است (شکل ۴). واحدهای الکترونیکی استفاده شده در این آزمایش در جدول ۱ لیست شده است.



شکل ۲. آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص قابل‌حمل استفاده شده ساخت شرکت ORTEC.



شکل ۳. آشکارساز یدورسدیم حلقوی استفاده شده ساخت شرکت SCIONIX (قطر داخلی ۸٫۵ cm، قطر خارجی ۱۸ cm و ارتفاع ۱۴ cm).

پتاسیم-۴۰، برلیوم-۷، سدیم-۲۲ و سرب-۲۱۰ از جمله رادیونوکلیدهای طبیعی موجود در هوا هستند [۵]. در برخی مقالات اشاره شده که رادیونوکلیدهای طبیعی برلیوم-۷ و سرب-۲۱۲ در نمونه‌های هوا وجود دارند [۶، ۷]. در اتمسفر رادیونوکلیدهای متنوعی وجود دارند. تشخیص رادیونوکلیدهای طبیعی و مصنوعی از نظر بررسی حوادث هسته‌ای خیلی اهمیت دارد. در حوادث رآکتوری، پاره‌های شکافت در هوا پخش شده و تا کیلومترها دورتر قابل شناسایی هستند. برای رصد سوانح و شناسایی رادیونوکلیدهای تولید شده در سوانح مانند سزیم-۱۳۴، سزیم-۱۳۷ و ید-۱۳۱ می‌توان از نمونه‌بردارهای هوای حجم بالا و آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص استفاده کرد [۸، ۹].

برای کاهش زمینه کامپتون در داخل کشور مقالاتی ارائه شده است. در این مقالات با استفاده از واحدهای الکترونیکی زمان‌گیری و استفاده از چیدمان نسبتاً پیچیده، حد آشکارسازی کاهش داده شده است [۱۰-۱۲].

برای بالابردن حساسیت آشکارساز ژرمانیم فوق‌خالص و آشکارسازی رادیونوکلیدهای با فعالیت کم‌تر، می‌توان با استفاده از یک آشکارساز فرونشانی (مانند یدورسدیم حلقوی) پیوستار کامپتون را کاهش داد. در این تحقیق داده‌برداری و فرونشانی پیوستار کامپتون با روش لیست‌مد انجام شده است.

## ۲. چیدمان آزمایش

برای بهبود شرایط آشکارسازی و هم‌چنین بالابردن حد تشخیص می‌توان از چیدمان فرونشانی پیوستار کامپتون استفاده کرد. در روش‌های معمول برای فرونشانی کامپتون، علاوه بر این‌که از واحدهای الکترونیکی زیادی مانند  $TAC^1$ ،  $G.D.G^2$ ،  $TSCA^3$ ، Universal coincidence و غیره استفاده می‌شود که ممکن است به راحتی در دسترس نباشند، چیدمان استفاده شده فقط برای زمان هم‌فرودی خاصی (مثلاً ۲ میکروثانیه) بسته می‌شود و در صورتی که زمان هم‌فرودی دیگری مد نظر باشد، باید آزمایش تکرار شود که بسیار زمان‌بر است [۱۳-۱۵].

در روش جدید استفاده شده در این تحقیق از روش داده‌برداری لیست‌مد استفاده شده است. در این روش تحلیل‌گر

4. Time Stamp  
5. Replay

1. Time to Amplitude Converter  
2. Gate and Delay Generator  
3. Timing SCA



برای به دست آوردن نسبت قله به کامپتون و انرژی مرکزی سزیم-۱۳۷ از انرژی ۶۴۴ تا ۶۸۱ keV توسط نرم افزار آنالیز GammaVision انتخاب شده و سطح زیر قله استخراج شد. در ابتدا بدنه آشکار ساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل با فواصل یک سانتی متری علامت گذاری شد و پس از آن با جابه جا کردن محل نسبی دو آشکار ساز، نقطه بهینه برای بیشترین فرونشانی پیوستار کامپتون با استفاده از یک چشمه نقطه ای سزیم-۱۳۷ استخراج شد.

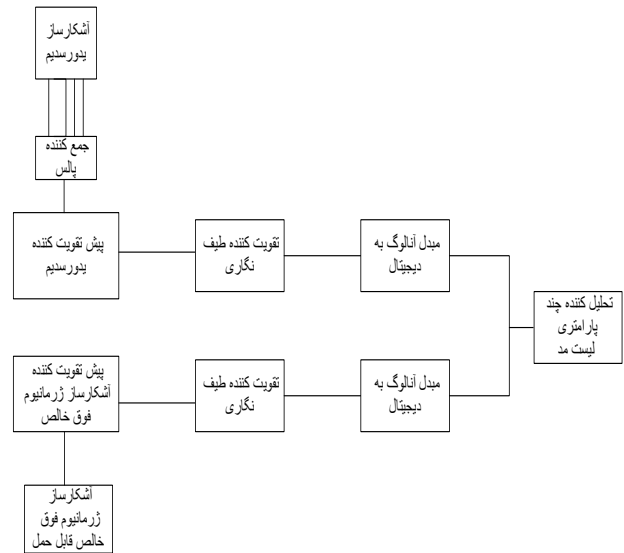
### ۳. نتایج

با آماده سازی چیدمان اندازه گیری با استفاده از یک چشمه نقطه ای سزیم-۱۳۷ نقطه بهینه فاصله نسبی دو آشکار ساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یدور سدیم حلقوی به دست آمد. در جدول ۲ محاسبات مربوط به فاکتور فرونشانی (SF) در فواصل نسبی مختلف دو آشکار ساز نشان داده شده است.

در شکل ۵ نمایی از نرم افزار و طیف باز تولید شده برای فاصله نسبی ۸ cm با چشمه نقطه ای سزیم-۱۳۷ نشان داده شده است. شکل بالا (الف) طیف آشکار ساز ژرمانیم فوق خالص به تنهایی را نشان می دهد. شکل وسط (ب) طیف آشکار ساز یدور سدیم حلقوی به تنهایی را نشان می دهد. شکل پایین (ج) طیف هم فرودی دو آشکار ساز در فاصله زمانی ۱ μs را نشان می دهد که محور افقی (۱ channel) نشان دهنده طیف یدور سدیم در حالت هم فرودی، محور عمودی (۲ channel) نشان دهنده طیف ژرمانیم فوق خالص در حالت هم فرودی و محور سوم که به شکل رنگ نشان داده شده، نشان دهنده شمارش در هر یک از این آشکار سازها در حالت هم فرودی است.

جدول ۲. محاسبه مقدار SF در فواصل نسبی دو آشکار ساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یدور سدیم حلقوی

فاصله (cm)	نسبت قله به کامپتون (P/C) (بعد از فرونشانی)	فاکتور فرونشانی (SF)
۱	۲۳٫۲۳	۱٫۶۲
۲	۲۷٫۸۰	۱٫۸۰
۳	۳۳٫۷۴	۲٫۰۵
۴	۴۱٫۲۵	۲٫۳۱
۵	۵۰٫۷۸	۲٫۶۴
۶	۶۰٫۲۳	۲٫۹۸
۷	۶۶٫۵۳	۳٫۱۷
۸	۷۲٫۸۵	۳٫۳۸
۹	۶۹٫۱۰	۳٫۱۹
۱۰	۳۲٫۵۴	۲٫۵۲
۱۱	۴۵٫۸۲	۲٫۸۰
۱۲	۳۴٫۲۳	۱٫۸۶



شکل ۴. شماتیک چیدمان هم فرودی استفاده شده با داده برداری لیست مد.

جدول ۱. واحدهای الکترونیکی استفاده شده

ردیف	نام واحد الکترونیکی	مدل	شرکت سازنده
۱	تقویت کننده طیف نگاری	۴۷۲	اورتک <sup>۱</sup>
۲	مبدل آنالوگ به دیجیتال	۴۰۰۰	انستیتو فیزیک کاربردی <sup>۲</sup>
۳	پیش تقویت کننده	۳۰۰۱	انستیتو فیزیک کاربردی
۴	منبع تغذیه - جمع کننده	HV ۱۰۰۰ (۴-۱)	سایونیکس <sup>۳</sup>
۵	تحلیل کننده چند پارامتری لیست مد	۴۳۰۰	انستیتو فیزیک کاربردی

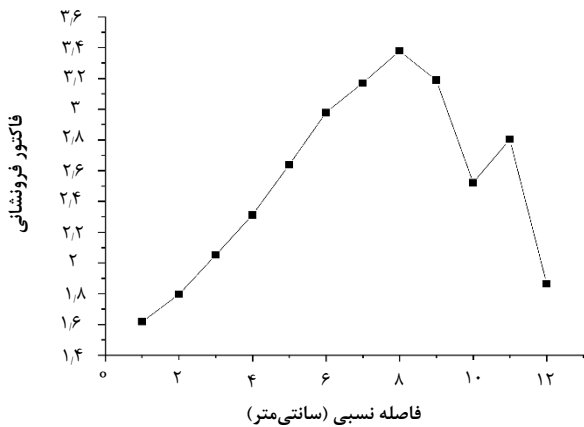
برای به دست آوردن فاکتور فرونشانی<sup>۴</sup> (SF) و مقایسه آن با طیف معمولی از نسبت قله به کامپتون<sup>۵</sup> ( $\frac{P}{C}$ ) بعد از فرونشانی (HPGe gated) به نسبت قله به کامپتون قبل از فرونشانی (HPGe single) استفاده شد (رابطه ۱) [۱۱-۱۷].

$$SF = \frac{\left(\frac{P}{C}\right)_{gated}}{\left(\frac{P}{C}\right)_{single}} \quad (1)$$

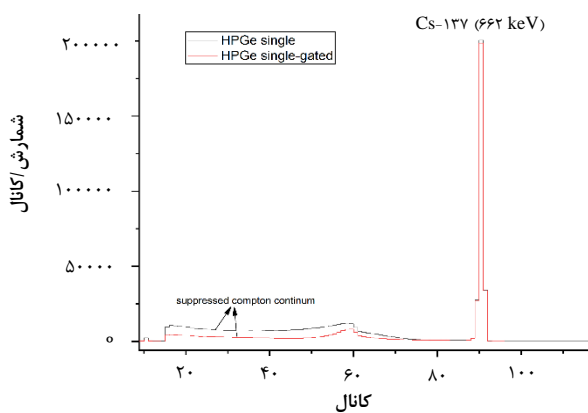
که در آن SF فاکتور فرونشانی، P مقدار شمارش در قله اصلی سزیم-۱۳۷ و C مقدار شمارش پیوستار کامپتون همین قله از انرژی ۳۵۸ تا ۳۸۲ keV تقسیم بر تعداد کانال های موجود در این ناحیه است. اندیس gated برای طیف پادهم فرودی آشکار ساز ژرمانیم فوق خالص و آشکار ساز یدور سدیم حلقوی است. اندیس single برای طیف ژرمانیم فوق خالص به تنهایی است.

1. ORTEC
2. IAP
3. Scionix
4. Suppression Factor
5. Peak to Compton Ratio





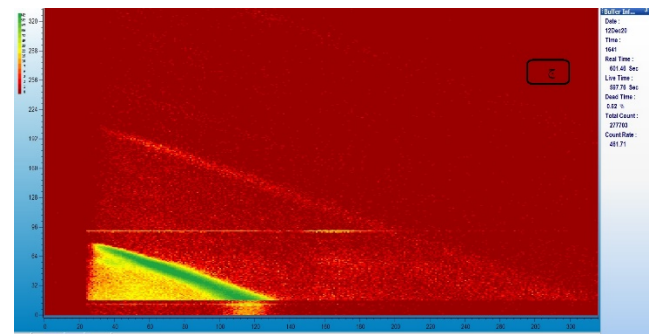
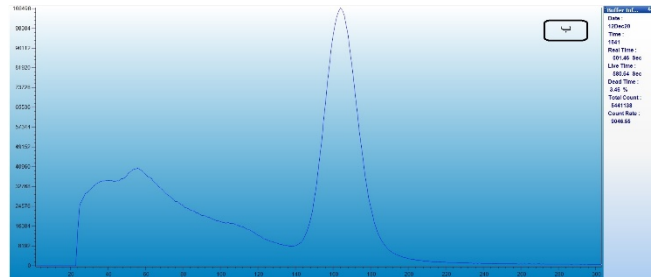
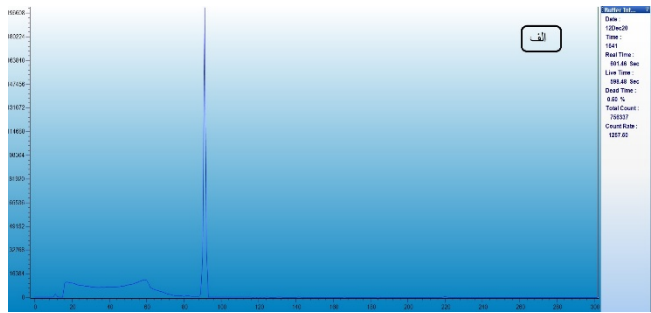
شکل ۶. فاکتور فرونشانی (SF) در فواصل مختلف نسبی دو آشکارساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یدورسديم حلقوی.



شکل ۷. طیف اصلی و طیف فرونشاندن شده چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ با دو آشکارساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یدورسديم حلقوی.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش داده‌برداری لیست‌مد برای طیف‌نگاری معرفی شد که با استفاده از قابلیت ثبت زمان هر رخداد می‌توان پس‌پردازش داده‌ها را انجام داد. با این روش جدید برای چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ فاکتور فرونشانی (SF) عدد ۳٫۳۸ به‌دست آمد. فاکتور فرونشانی در مراجع ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به ترتیب ۱٫۹، ۱٫۴۴ و ۱٫۴۲ به‌دست آمده است. در آزمایشات انجام شده در این مقالات آشکارساز اصلی یدورسديم بوده و آشکارساز فرونشاندن سوسوزن پلاستیک و یدورسديم بوده است که به‌طور کامل دور آشکارساز اصلی را احاطه نکرده بود. در این تحقیق آشکارساز اصلی ژرمانیم فوق خالص قابل حمل بوده و آشکارساز فرونشاندن، یدورسديم حلقوی بوده است که به‌طور کامل اطراف آشکارساز اصلی را احاطه کرده بود. با استفاده از این روش برای رصد سوانح هسته‌ای می‌توان رادیونوکلیدهای با فعالیت کم را



شکل ۵. الف) طیف آشکارساز ژرمانیم فوق خالص برای سزیم-۱۳۷، ب) طیف آشکارساز یدور سديم حلقوی برای سزیم-۱۳۷، ج) طیف بازتولید شده چیدمان فرونشانی پیوستار کامپتون برای چشمه سزیم-۱۳۷.

در شکل ۶ فاکتور فرونشانی (SF) در فواصل مختلف نسبی دو آشکارساز ژرمانیم فوق خالص قابل حمل و یدورسديم حلقوی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود در نقطه‌ای از آشکارساز ژرمانیم فوق خالص که با عدد ۸ cm نشان‌دار شده، بیش‌ترین فاکتور فرونشانی مشاهده شد. در این نقطه بیش‌ترین فوتون فرار کرده از آشکارساز ژرمانیم فوق خالص بر اثر اندرکنش کامپتون توسط آشکارساز یدورسديم آشکارسازی می‌شود و بنابراین بیش‌ترین فرونشانی کامپتون را خواهیم داشت.

در شکل ۷ مقایسه‌ای از طیف اصلی و طیف فرونشاندن شده آشکارساز ژرمانیم فوق خالص برای چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ نشان داده شده است.



7. N. Alkhomashi, et al, *Measurements of surface air Be-7 concentrations in Saudi Arabia*, *Applied Radiation and Isotopes*, **165**, 109305 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109305>.
8. Ari-Pekka Leppänen, et al, *Artificial radionuclides in surface air in Finland following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **126**, 273-283 (2013).
9. N. Alkhomashi, FI. Almasoud, *Indication of the radioactive fallout in Riyadh, Saudi Arabia following the Fukushima nuclear accident*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **152**, 70-74 (2016).
10. V. Doostmohammadi, et al, *In: Proceedings of NSI, (NSI, Isfahan, 2015)*, (In Persian).
11. Z. Hazami, et al, *In: Proceedings of NSI, (NSI, Yazd, 2012)*, (In Persian).
12. H. Doostizadeh, et al, *In: Proceedings of NSI, (NSI, Rasht, 2014)*, (In Persian).
13. B.E. Tomlin, R. Zeisler, R.M. Lindstrom,  *$\gamma\gamma$  coincidence spectrometer for instrumental neutron-activation analysis*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* **589**, 243-249 (2008).
14. W. Scates, et al, *Optimization studies of a Compton suppression spectrometer using experimentally validated Monte Carlo simulations*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* **556**, 498-504 (2006).
15. J. Parus, et al, *A dual purpose Compton suppression spectrometer*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **258** (1), 123-132 (2003).
16. H.M. Badran, T. Sharshar, *An experimental method for the optimization of anti-Compton spectrometer*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* **435**, 423-432 (1999).
17. M.A. Bacchi, et al, *INAA with Compton suppression: How much can the analysis of plant materials be improved?*, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 271 (2), 345-351 (2007).

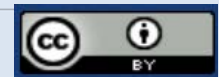
نیز آشکارسازی کرد. چیدمان به کار رفته در این تحقیق استفاده از واحدهای الکترونیک هسته‌ای آنالوگ است. در این تحقیق برای اولین بار در کشور با چیدمان نسبتاً ساده‌ای با روش داده‌برداری لیست‌مد، پیوستار کامپتون کاهش داده شده است. در صورت دسترسی به دیجیتایزر، چیدمان آشکارسازی خیلی ساده‌تر خواهد شد و کافی است خروجی پیش‌تقویت‌کننده‌ها مستقیماً به دیجیتایزر متصل شده و داده‌برداری لیست‌مد انجام شود. استفاده از داده‌برداری دیجیتالی در اولین خروجی آشکارساز (پیش‌تقویت‌کننده) و استفاده از تجهیزاتی با قدرت تفکیک زمانی بالاتر نسبت به تحلیل‌گر چندکاناله استفاده شده در بازیابی طیف‌ها و رسیدن به حد آشکارسازی کمتر خیلی مؤثر خواهد بود.

### مراجع

1. A. Ceccatelli, P. DeFelice, A. Fazio, *Development of simulated air filters for gamma-ray spectrometry proficiency testing*, *Applied Radiation and Isotopes*, **68**, 1240-1246 (2010).
2. C.C. Conti, I.C.P. Salinas, H. A detailed procedure to simulate an HPGe detector with MCNP5, *Progress in Nuclear Energy*, **66**, 35-40 (2013).
3. Magdalena Długosz-Lisiecka, *Application of modern anticoincidence (AC) system in HPGe  $\gamma$ -spectrometry for the detection limit lowering of the radionuclides in air filters*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **169-170**, 104-108 (2017).
4. Nikola Marković, Per Roos, Sven Poul Nielsen Nikola, *Digital gamma-gamma coincidence HPGe system for environmental analysis*, *Applied Radiation and Isotopes* (2016), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.12.017>.
5. P. Růž'k, et al, *Low level air radioactivity measurements in Prague, Czech Republic*, *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 969-973 (2009).
6. Paolo Tristan F. Cruz, et al, *Assessment of temporal variations of natural radionuclides Beryllium-7 and Lead-212 in surface air in Tanay, Philippines*, *Journal of Environmental Radioactivity*, **105989**, 208-209 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.105989>.

### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

مهدی تورنگ، اصغر حدادی، میترا اطهری علاف، داریوش سرداری (۱۴۰۱)، داده‌برداری لیست‌مد برای کاهش پیوستار کامپتون، ۹۹، ۱۶۵-۱۷۰

**DOR:** 20.1001.1.17351871.1401.43.1.18.1

**Url:** [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1361.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1361.html)

