

جداسازی طیف نوترون و گاما با استفاده از روشی مبتنی بر فیلترهای دیجیتال

مهدی ولی پور*، سیدابوالفضل حسینی

دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۱۱۱۴، تهران - ایران

*Email: mahdiv619@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۳ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۴/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۱۴

چکیده

در این مطالعه، از کد مبتنی بر روش مونت کارلو Geant4 برای شبیه‌سازی مجموعه‌ی آشکارساز NE-213 دو اینچی و چشمه‌ی Am-Be موجود در دانشکده مهندسی انرژی شریف، استفاده شد و طیف گاما و نوترون این چشمه در آشکارساز مذکور از طریق شبیه‌سازی به دست آمد. سپس، جهت مقایسه و تحلیل نتایج، طیف گاما و نوترون در یک چیدمان آزمایشگاهی مشابه به روش جداسازی آنالوگ تفکیک کسر ثابت به دست آمد؛ در ادامه، سه نمونه فیلتر دیجیتال در نرم‌افزار متلب تعریف شدند تا نتایج اعمال آن‌ها بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی انجام شده توسط Geant4، بررسی شود. در این مقاله، مطالعه بر روی فیلترهای دیجیتالی مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح انجام شد و با مقایسه‌ی نتایج حاصل به ازای مقادیر مختلف متغیرهای مؤثر در هر فیلتر با نتایج حاصل از آزمایش انجام شده در آزمایشگاه، مقادیر بهینه‌ای برای متغیرهای مرتبط با هر فیلتر به دست آمد. با بررسی‌های صورت گرفته، برای فیلتر مثلثی به ازای $k=11$ ، برای فیلتر دوزنقه‌ای به ازای $k=10$ و $L=5$ و برای فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح به ازای $k=10$ و $L=20$ بهترین نتایج به دست آمد. در نهایت این نتیجه به دست آمد که در بحث کیفیت جداسازی، فیلتر دوزنقه‌ای می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد.

کلیدواژه‌ها: جداسازی طیف نوترون-گاما، فیلترهای دیجیتالی، Geant4، چشمه‌ی Am-Be، آشکارساز NE-213

Discrimination of neutron and gamma spectrum using a method based on digital filters

M. Valipour*, S.A. Hosseini

Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.BOX: 1114-14565, Tehran – Iran

Research Article

Received: 13.1.2023, Revised: 10.7.2023, Accepted: 5.8.2023

Abstract

In this study, the Monte Carlo-based simulation code, Geant4, was applied to model the 2-inch NE-213 detector and Am-Be source available at Sharif University Faculty of Energy. The neutron and gamma spectrum for this source in the NE-213 detector could be achieved. Furthermore, a circuit based on the analog Constant Fraction Method (CFM) was used in the laboratory to get the neutron and gamma spectrum of the same source to be used for further comparisons. For the next step, three digital filters named Triangular, Trapezoidal, and Flat Top Cusp were scripted in MATLAB not only to see how each filter performs in the discrimination of these two spectrums but also to find the optimum values for the effective parameters in each of the filters by comparing the filter outputs with the results obtained from the constant fraction method in lab. As it turned out, in the triangular filter for $k=11$, the trapezoidal filter for $k=10$ and $L=5$, and in the flat top cusp filter for $k=10$ and $L=20$, the most accurate results were obtained. By comparing the results for these values in each filter, it was shown that the trapezoidal filter performed the most effectively in spectrum discrimination.

Keywords: Neutron-gamma discrimination, Digital filters, Geant4, Am-Be source, NE-213 scintillation detector



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، در امر پردازش پالس‌ها و سیستم‌های داده‌برداری در طیف‌نگاری هسته‌ای، استفاده از سیستم‌هایی که براساس پردازش دیجیتال سیگنال‌ها کار می‌کنند، گسترش یافته است. در این‌گونه سیستم‌ها، معمولاً سیگنال خروجی دریافتی از پیش تقویت‌کننده، مستقیماً توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال، به صورت داده‌های دیجیتالی درآمده و پردازش‌های مورد نیاز روی آن انجام می‌گیرد [۱]. جداسازی طیف مربوط به نوترون از گاما در شرایطی که از چشمه‌ای تابش هم‌زمان نوترون و گاما را داریم، از طریق جداسازی شکل تپ^۱ مربوط به هر یک از آن‌ها صورت می‌گیرد. این جداسازی شکل تپ بر اساس پاسخی است که آشکارساز برای رویدادهای مربوط به نوترون و گاما از خود بروز می‌دهد. با برهم‌کنش پرتوهای گاما در آشکارساز، الکترون آزاد می‌شود در حالی که با اندرکنش نوترون با هسته‌های عناصر موجود در آشکارساز، پروتون‌های تولید شده را خواهیم داشت. البته سرعت جمع‌آوری الکترون‌ها در آشکارساز سریع‌تر از پروتون‌هاست؛ به همین دلیل، تپ ناشی از الکترون‌ها نسبت به تپ ناشی از پروتون‌ها، زمان خیز^۲ سریع‌تری دارد.

جداسازی طیف نوترون و گاما به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که به‌طور کلی آن‌ها را به دو دسته‌ی روش‌های آنالوگ و دیجیتال تقسیم‌بندی می‌کنند. از جمله روش‌های آنالوگ استفاده شده می‌توان به روش گذر از صفر، روش زمان‌گیری لبه‌ی صعودی و روش زمان پرواز اشاره کرد [۲-۴]؛ در رابطه با روش‌های دیجیتال جداسازی طیف، برخلاف روش‌های آنالوگ، نتوان دسته‌بندی دقیق و خاصی را مدنظر قرار داد چراکه جداسازی به روش دیجیتال به روش‌های مختلفی صورت گرفته و قابل انجام است اما به‌طور کلی می‌توان تمامی این روش‌های دیجیتال مورد استفاده جهت جداسازی طیف را به دو دسته‌ی روش‌های دامنه‌ی زمانی^۳ یا فرکانسی^۴ طبقه‌بندی کرد [۵]. از جمله برخی از روش‌هایی که تا به حال مورد بررسی قرار گرفته‌اند می‌توان به روش انتگرال بار دیجیتال، روش خوشه‌بندی^۵ (با استفاده از الگوریتم‌های K-Means و K-Medoids) [۶]، فیلترهای مرتبط با یک‌دیگر^۶ [۷] یا استفاده از فیلترهای دیجیتال اشاره کرد. در بحث پردازش سیگنال‌ها، فیلتر دیجیتال به سیستمی گفته می‌شود که یک عملیات ریاضی را بر روی یک

سری از داده‌های نمونه‌برداری شده‌ی گسسته در طی زمان، انجام می‌دهد که شاخصه‌ای را در آن سیگنال ورودی، بهبود ببخشد یا تغییر خاصی را در آن به وجود آورد. در حالی که یک فیلتر آنالوگ، به‌صورت یک یا تعدادی از قطعات فیزیکی است که باید در مدار مورد نظر قرار بگیرد و تغییرات مد نظرش را بر روی سیگنالی پیوسته در طی زمان، انجام دهد [۵، ۸، ۹].

در این مطالعه، با هدف اعمال سه فیلتر دیجیتالی متفاوت و بررسی نتایج حاصل از هر فیلتر در بحث جداسازی طیف نوترون و گاما و نیز یافتن مقادیری بهینه برای متغیرهای مؤثر در هر یک از این سه فیلتر که بهترین نتیجه‌ی جداسازی را رقم بزنند ابتدا با در نظر گرفتن مدار آزمایش مربوط به روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت در آزمایشگاه، طیف نوترون و گامای چشمه‌ی Am-Be با فعالیت ۵۰۰ میلی‌کوری در آشکارساز NE-۲۱۳ با ابعاد دو اینچی به‌دست آمد. در ادامه با انجام شبیه‌سازی طیف نوترون و گامای چشمه‌ی Am-Be در آشکارساز NE-۲۱۳ با شرایطی مشابه آن‌چه در آزمایشگاه مد نظر قرار گرفته بود، با استفاده از کد مونت‌کارلوی Geant4 که قابلیت‌های آن پیش‌تر بررسی و مورد تأیید بوده است [۱۰]، طیف نوترون و گامای مربوط به چشمه حاصل شد. سپس با نگارش دستورات مرتبط با فیلترهای دیجیتالی مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح در نرم‌افزار محاسباتی MATLAB، به اعمال آن‌ها بر روی داده‌های دریافتی از طریق شبیه‌سازی پرداخته شد تا بتوان مقادیر بهینه‌ای برای متغیرهای مؤثر در هر یک از فیلترها یافت که بهترین نتیجه‌ی جداسازی را رقم بزنند. هم‌چنین مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از هر فیلتر به ازای مقادیر بهینه‌ی متغیرهای مرتبط با هر یک، انجام خواهد شد.

۲. روش انجام کار

۱.۲ آشکارساز NE-۲۱۳

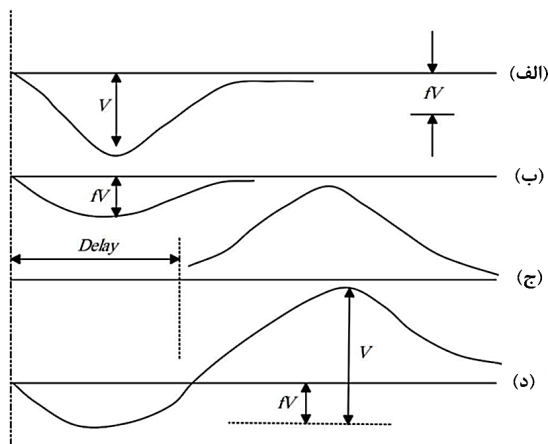
از آشکارساز NE-۲۱۳، با توجه به برخورداری بودن این آشکارساز از ترکیبات هیدروژن‌دار و نیز عدد اتمی متوسط پایین و هم‌چنین به خاطر پاسخ زمانی نسبتاً سریع، جهت آشکارسازی نوترون‌ها (غالباً از طریق پروتون و کربن پس زده شده) و تابش‌های گاما (از طریق اندرکنش‌های کامپتون) استفاده می‌شود [۱۱]. این آشکارساز قابلیت خوبی جهت شناسایی نوترون و گاما در میدان‌هایی که تابش هم‌زمان نوترون و گاما رخ می‌دهد، دارد که ویژگی‌های آن در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، لطفی و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۲]، با استفاده از آشکارسازهای NE-۲۱۳، UGLLT^۷

1. Pulse Shape Discrimination
2. Rise Time
3. Time Domain
4. Frequency Domain
5. Clustering
6. Matched Filtering

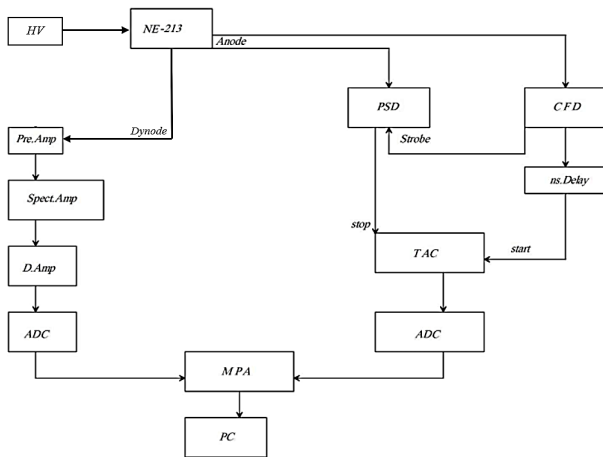


جدول ۱. مشخصات سوسوزن NE-۲۱۳ [۱۴]

مقدار	خصوصیات
$0.874 \frac{g}{cm^3}$	چگالی
٪۷۸ آنتراسین	درصد نور خروجی
۴۲۵ Nm	بیشترین طول موج گسیل شده
۳.۲ ns	زمان واپاشی
4.82×10^{22}	تعداد اتم H در واحد cm^3
3.98×10^{22}	تعداد اتم C در واحد cm^3
۱.۲۱۲	نسبت تعداد H به C
2.87×10^{23}	تعداد الکترون در واحد cm^3
۱.۵۰۵	ضریب شکست (nD)



شکل ۱. شمایی از مراحل مختلف روش کسر ثابت.



شکل ۲. مدار بسته شده در روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت.

در این مدار، آغاز زمان‌گیری که همان نقطه‌ی گذر از صفر باشد، توسط CFD مشخص می‌شود. سپس با تعیین زمان ورود پالس توسط CFD، قطعه‌ی PSD زمان پایان دریافت پالس را مشخص می‌کند؛ حال، اختلاف زمانی این دو پالس پس از یک تأخیر زمانی، به کمک قطعه‌ی TAC تبدیل به دامنه ولتاژ

و $UGAB^1$ به بررسی جداسازی طیف نوترون و گامای چشمه‌ی Am-Be در هریک از آشکارسازها و با استفاده از سه روش گذر از صفر^۲، انتگرال بار^۳ و انتگرال بار فیلتر شده^۴، برای هر یک از این سه آشکارساز پرداختند. با توجه به نتایجی که ایشان به‌دست آورده‌اند، از بین سه آشکارساز مورد بررسی، NE-۲۱۳، بهترین نتیجه را از جهت کیفیت جداسازی صورت گرفته با توجه به ضرایب شایستگی به‌دست آمده برای هر آشکارساز، حاصل نمود.

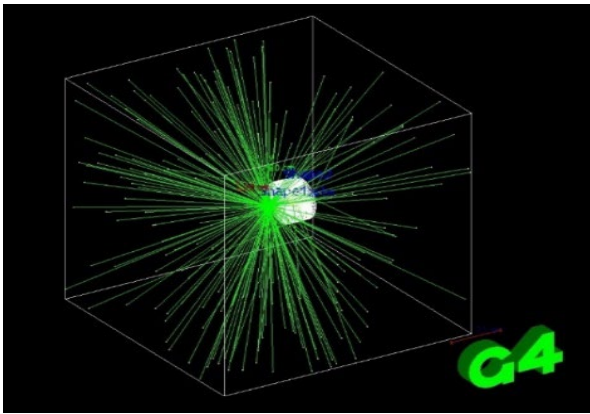
به همین دلیل و نیز با توجه به پژوهش‌هایی که پیش‌تر انجام شده‌اند [۱۳]، برای انجام بررسی‌های مرتبط با موضوع این مطالعه، از آشکارساز NE-۲۱۳ استفاده می‌شود. آشکارساز سوسوزن NE-۲۱۳ از مولکول‌های کربن و هیدروژن به صورت ترکیبات زایلن ساخته می‌شود که در جدول ۱ به مشخصات این آشکارساز اشاره شده است.

۲.۲ جداسازی طیف نوترون و گاما با استفاده از روش تفکیک کسر ثابت در این مطالعه، آزمایش انجام شده به روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت^۵ صورت گرفته است. روش تفکیک کسر ثابت برای پالس‌های با دامنه‌ی پایین و فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین باید از پالس‌های داینود آشکارساز استفاده شود البته با توجه به این‌که پالس داینود آشکارساز از پالس آند آن خیلی ضعیف‌تر است باید پیش از ورود به قسمت بعدی مدار، از پیش‌تقویت‌کننده عبور کند. در این روش، سپس پالس اولیه توسط یک فیلتر ثابت f تضعیف شده، تأخیر داده شده و معکوس می‌شود. تأخیر اعمال شده معمولاً بیش‌تر از زمان صعود پالس است. سپس این دو پالس، با هم جمع شده و نتیجه‌ی نشان داده شده در قسمت «د» در شکل ۱، حاصل می‌شود.

برای این آزمایش، قطعات و دستگاه‌های متعددی هم‌چون آشکارساز NE-۲۱۳ با ابعاد دو اینچی متصل به تکثیرکننده‌ی فوتونی PMT، چشمه‌ی Am-Be با فعالیت ۵۰۰ میلی‌کوری، ماژول CFD مدل CFP - ۲۰۱۷، ماژول PSD^۶ مدل PSD تغذیه‌ی ولتاژ بالا مدل IAP-۸۱۰۰ جهت تغذیه‌ی آشکارساز و میدل آنالوگ به دیجیتال (۱۰) مدل IAP-۴۰۱۰ در مداری مشابه آن‌چه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، استفاده شد.

1. Ultima Gold Low Level Tritium
2. Zero Crossing Method
3. Charged Integration
4. Filtered Charged Integration
5. Constant Fraction Method
6. Pulse Shape Discriminator
7. Time to Amplitude Converter





شکل ۴. مجموعه‌ی جهان تعریف شده و آشکارساز با حضور چشمه که در کد Geant4 شبیه‌سازی شده‌اند.

در امر شبیه‌سازی با استفاده از کدهای مونت کارلویی هم‌چون Geant4، به جهت حصول خطای بسیار پایین در نتایج، معمولاً شمارش بالای ده میلیون ذره مناسب تلقی می‌شود اما با توجه به این‌که چشمه قرار است تابش نوترون و گاما را از خود بروز دهد، تعداد ذرات اولیه برای این شبیه‌سازی، به میزان پنجاه میلیون ذره در نظر گرفته شد. هم‌چنین در این شبیه‌سازی، برای تعریف فهرست فیزیکی^۲ مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی در کد Geant4، از مدل استاندارد که به‌صورت پیش‌فرض در دیتابیس Geant4 موجود است و شامل فرایندهای الکترومغناطیسی نیز می‌باشد، استفاده شد.

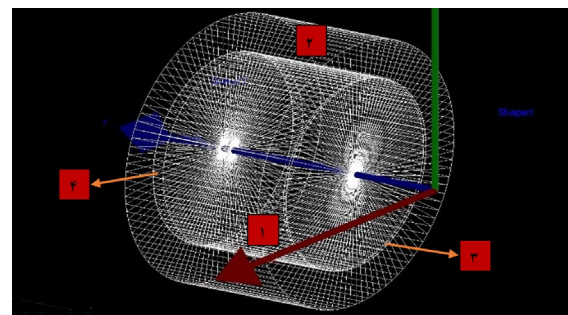
۴.۲ جداسازی با استفاده از فیلترهای دیجیتال

تابه‌حال، از فیلترهای دیجیتال برای بررسی چگونگی جداسازی طیف‌های مختلف در این زمینه، کم‌تر استفاده شده اما فیلترهایی هم‌چون فیلترهای مثلثی^۳، دوزنقه‌ای^۴ و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح^۵ برای جداسازی طیف آمیخته‌ای از نوترون و گاما که برای چشمه‌هایی هم‌چون Am-Be داریم و هم‌چنین توانایی کاهش نویز بسیار خوب این فیلترها برای پالس‌هایی با نویز بالا هم‌چون طیف آمیخته‌ی نوترون و گاما که نویز بالایی را برای ذرات با انرژی‌های پایین‌تر داریم، بسیار کاربردی خواهد بود [۱]. هم‌چنین می‌توان به این مورد اشاره کرد که هنگامی که چشم‌پوشی از میزان نویز داده‌ها امکان‌پذیر باشد، استفاده از فیلترهایی هم‌چون فیلتر قله‌ای محدود شده^۶ برای پالسی که میزان نویز آن در مقایسه با طول آن قابل چشم‌پوشی باشد، انتخاب مناسبی خواهد بود؛ هم‌چنین، استفاده از فیلتری هم‌چون فیلتر مثلثی، هنگامی که نویز این داده‌ها نسبت به طول

می‌شود. با اتصال دو قطعه‌ی ADC مدار آزمایش به واحد MPA و اتصال این تحلیل‌گر چند کاناله به کامپیوتر، خروجی نهایی مدار حاصل شد.

۳.۲ شبیه‌سازی انجام شده توسط کد Geant4

برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلویی، از ابزار Geant4 ویرایش ۱۰/۷ استفاده شد؛ در این ابزار تمامی دستورات به زبان C++ نوشته می‌شود. در نگارش کد مربوط به این شبیه‌سازی، با هدف تعریف هندسه‌ها و چشمه تا حد امکان مشابه آن‌چه در آزمایشگاه مورد استفاده و بررسی قرار گرفت، فضایی استوانه‌ای شکل به‌عنوان قسمت اصلی آشکارساز ۲۱۳-NE با قطر ۵/۰۸ cm و ارتفاع ۷/۶۲ cm که شامل مواد تشکیل‌دهنده‌ی آن، با مشخصاتی که در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفت، در نظر گرفته شد و هم‌چنین از دوتیغه‌ی استوانه‌ای شکل نیز به‌عنوان پوششی شیشه‌ای از جنس پیرکس در دو قسمت جلویی (به ارتفاع ۰/۱۵۶۸ cm) و پشت (به ارتفاع ۰/۶۳۵ cm) آشکارساز و نیز تیغه‌ای استوانه‌ای شکل از جنس آلومینیوم به‌عنوان پوشش اطراف استوانه (به شعاع داخلی ۲/۵۴ cm و شعاع خارجی ۳/۱ cm که با این شرایط می‌تواند پوشش‌دهنده‌ی مجموعه‌ی شیشه‌ها و محفظه‌ی ۲۱۳-NE باشد و ارتفاع ۸/۴۱۲ cm در نظر گرفته شد و جهان مورد نیاز شبیه‌سازی به‌صورت هندسه‌ای مکعبی شکل به ضلع ۱۰۰ cm از جنس هوای معمولی که مرکز این مکعب در مبدأ مختصات قرار بگیرد، در نظر گرفته شد؛ هم‌چنین چشمه‌ی Am-Be با فعالیت ۵۰۰ میلی‌کوری، مشابه آن‌چه در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفت، از نوع gps^1 که تابش را همسانگرد به تمام فضای اطراف خود ساطع می‌کند، در نظر گرفته شد. در ادامه، شکل‌های ۳ و ۴، شمایی از آشکارساز تعریف شده در کد، بدون حضور چشمه و با حضور چشمه (البته با در نظر گرفتن تعداد ذرات اولیه‌ی محدود برای رسم بهتر گرافیکی شکل) را نشان می‌دهند.



شکل ۳. هندسه‌ی مجموعه‌ی آشکارساز شبیه‌سازی شده؛ (۱) قسمت ماده‌ی سوسونز؛ (۲) محفظه‌ی پوشش‌دهنده‌ی مجموعه‌ی آشکارساز؛ (۳) پنجره‌ی جلویی و (۴) پنجره‌ی پشت آشکارساز.

1. G4General Particle Source

2. Physics List
3. Triangular Filter
4. Trapezoidal Filter
5. Flat Top Cusp Filter
6. Truncated Cusp Filter

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (4), Serial Number 109, 2024, P 46-56

مجله علوم و فنون هسته‌ای
دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۴۶-۵۶



ادامه، این سه فیلتر به صورت آنچه که در روابط ۲ (فیلتر مثلثی)، ۳ (فیلتر دوزنقه‌ای) و ۴ (فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح) عنوان شده‌اند، بر روی این پالس‌های تغییر یافته اعمال خواهند شد [۱۵، ۱].

$$z(n) = z(n-1) + y(n) - 2y(n-k) + y(n-2k) \quad n \geq 1 \quad (2)$$

$$z(n) = z(n-1) + y(n) - y(n-k) - y(n-k-l) \quad n \geq 1 \quad (3)$$

$$z(n) = z(n-1) + p(n) - y(n-l) + y(n-l-k) - [y(n-k) + y(n-l)]k \quad n \geq 1 \quad (4)$$

$$p(n) = p(n-1) + y(n) - y(n-l) - y(n-l-k) \quad p(0) = 0 \quad (4)$$

در این روابط، متغیر z پالس نهایی حاصل از فیلترهای مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح است؛ متغیر y نیز از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید. متغیرهای k و L نیز اعدادی صحیح هستند که قله‌ی پالس خروجی را مشخص می‌کنند. در هر سه فیلتر با تغییر مقدار متغیر k ، اساسی‌ترین تغییر در ارتفاع پالس ایجاد شده توسط فیلتر خواهد بود؛ البته در فیلتر دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، با تغییر متغیر L علاوه بر ارتفاع قله‌ی پالس، پهنای سطح فوقانی فیلتر دوزنقه‌ای نیز تغییر می‌کند [۱۶]. با توجه به این‌که پالس آند آشکارساز برای گاما، نسبت به نوترون، زودتر به سمت صفر میل می‌کند، قله‌ی مربوط به گامای این فیلترها بالاتر از قله‌ی نوترون قرار خواهد گرفت.

۳. نتایج

۳.۱ نتایج اولیه‌ی به دست آمده از شبیه‌سازی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی اولیه‌ی انجام شده در کد Geant4 برای طیف‌های نوترون و گامای حاصل از چشمه‌ی Am-Be با مشخصاتی که پیش‌تر در بخش ۲.۲ عنوان شده بود، مطابق آنچه در شکل ۵ مشاهده می‌شود به دست آمد.

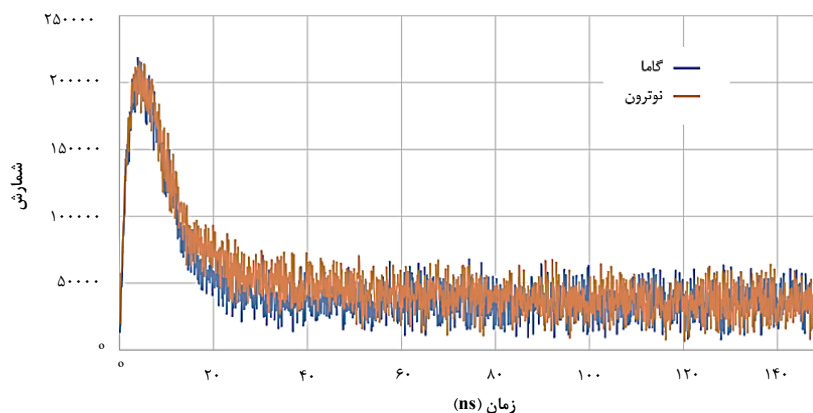
پالس قابل چشم‌پوشی نباشد، برای نویزگیری این پالس، می‌تواند مناسب‌تر باشد [۱۵].

فیلترهایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرند، فیلترهای مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح خواهند بود. با انجام دو پردازش اولیه‌ای که متوالی و وابسته به یکدیگر هستند، بر روی پالس‌های نوترون و گامای دریافتی، که در این پژوهش از داده‌های به دست آمده از طریق شبیه‌سازی حاصل شدند، به اعمال این فیلترها پرداخته شده و نتایج حاصل از هر فیلتر مورد بررسی قرار گرفت.

مراحلی که در روند اعمال این فیلترها انجام می‌شود در ادامه در شکل‌های ۵ الی ۷ قابل مشاهده است. با توجه به این اشکال، پالس‌های جداگانه‌ی مربوط به نوترون و گاما که توسط آشکارساز ثبت می‌شود باید در ابتدا به صورت تابعی که جهت استفاده در رابطه‌ی مربوط به فیلترهای مدنظر مورد نیاز است، تبدیل شود. با توجه به این‌که قسمت مورد اختلاف در طیف نوترون و گامای دریافتی از چشمه‌های معمول مورد استفاده‌ی تولیدکننده‌ی نوترون و گاما هم‌چون Am-Be یا ^{252}Cf در بعد از قله و در قسمت نزولی نمودار است، بدون این‌که مشکلی یا تأثیری در نتیجه‌ی حاصل از فیلترها به وجود آید می‌توان قسمت پیش از نقطه‌ی قله‌ی پالس را با ضرب کردن در یک تابع پله، تبدیل به صفر نمود. رابطه‌ای که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است:

$$y(n) = M - x(n) \quad (1)$$

که در این رابطه، متغیر y همان پالس تغییر یافته و متغیر x همان پالس اولیه است. هم‌چنین پارامتر M مقدار بیشینه‌ی پالس اولیه‌ی دریافتی (که همان x باشد) است. این پالس تغییر یافته سپس برای استفاده در فیلترهای مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح مورد استفاده قرار می‌گیرد. در



شکل ۵. طیف دریافتی نوترون و گاما حاصل از شبیه‌سازی با Geant4.



جدول ۲. متغیرهای لازم در رابطه‌ی مربوط به پالس‌های نوترون و گامای

خروجی آشکارساز ۲۱۳-NE [۱۵]

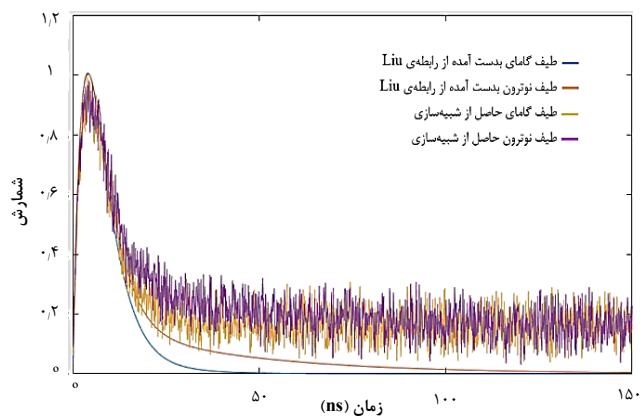
نوع پرتو	گاما	نوترون
A	۱۰,۵۳۰	۱۱,۳۲۰
B	۰,۰۱۷	۰,۰۱۷
θ (ns)	۴,۳۶۸	۴,۳۱۷
λ_s (ns)	۳,۴۸۲	۳,۵۳۷
λ_l (ns)	۱۱,۵۲۰	۳۸,۱۴۰
λ_o (ns)	۰,۳۳۱	۰,۲۸۶

در شکل ۶، این پالس‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با پالس‌های حاصل از شبیه‌سازی توسط Geant4 به نمایش گذاشته شده‌اند. البته جهت محاسبه‌ی ساده‌تر خطا، نمودارها به سطح زیرشان، نرمالایز شدند. با بررسی صورت گرفته، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با اختلافی در حدود ۱۵ درصد نسبت به پالس‌های نوترون و گامای ارائه شده توسط Liu، برای بررسی انتخاب شده‌اند. حال با توجه به رابطه‌ی ۱، تبدیل این پالس‌های دریافتی به پالس‌های تغییر یافته صورت می‌گیرد که نتیجه‌ی این تغییر شکل پالس، به صورت شکل ۷ خواهد بود.

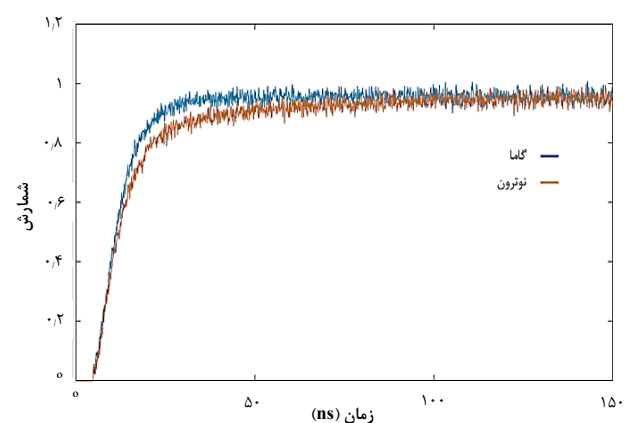
۲.۳ نتایج به‌دست آمده بعد از اعمال فیلترهای مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح

در مرحله‌ی نهایی به اعمال فیلترهای مثلثی، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح بر روی این پالس تغییر یافته، پرداخته می‌شود. ابتدا فیلتر مثلثی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به روابط مربوط به فیلترهای عنوان شده، در فیلتر مثلثی با تغییر دادن متغیر k باید به دنبال مقداری بهینه برای این متغیر باشیم چراکه مطابق آن چه در رابطه‌ی ۲ برای فیلتر مثلثی عنوان شد، تنها پارامتر قابل تغییر، متغیر k است؛ چگونگی انتخاب مقدار بهینه بدین صورت است که نتیجه‌ی فیلتر مربوطه به گونه‌ای باشد که علاوه بر این که مقدار ضریب شایستگی بهتری حاصل شود، ارتفاع قله‌های ایجاد شده توسط آن و شمارشی که در زیر هریک از این قله‌ها ثبت می‌شود نیز، نزدیک‌ترین مقادیر را به قله‌هایی که از طریق آزمایش در آزمایشگاه به‌دست آمده، داشته باشد. در ادامه در شکل ۸، نتایج فیلتر مثلثی که به ازای مقادیر مختلفی برای k مورد بررسی قرار گرفته، قابل مشاهده است؛ در شکل‌های ۸ الی ۱۲، قله‌های سمت چپ که ارتفاع بیشتری دارند مربوط به گاما و قله‌های سمت راست در هر شکل، مربوط به طیف نوترون هستند.

بعد از فیلتر مثلثی، فیلتر دوزنقه‌ای و فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح مورد بررسی قرار می‌گیرند. معیار انتخاب مقادیر



شکل ۶. صحت‌سنجی پالس حاصل از شبیه‌سازی توسط کد Geant4.



شکل ۷. طیف پالس‌های تغییر یافته‌ی نوترون و گامای حاصل از شبیه‌سازی.

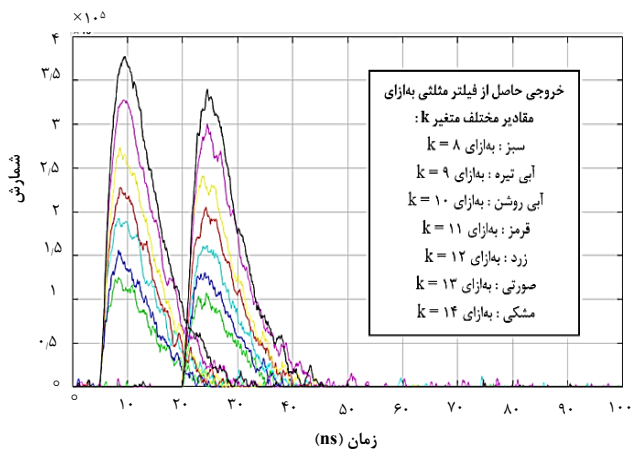
البته در ابتدا باید پالس‌های شبیه‌سازی شده صحت‌سنجی شوند تا بتوان از آن‌ها در سایر مراحل پژوهش استفاده نمود. برای این کار پالس‌های نوترون و گامای شبیه‌سازی شده با شکل پالس خروجی آشکارساز ۲۱۳-NE که توسط Liu و همکاران [۱۷] با بررسی آزمایشگاهی و روش‌های آموزش هوش مصنوعی^۱ به‌دست آمده است، صحت‌سنجی می‌شود. رابطه‌ای که ایشان به دست آورده‌اند، رابطه‌ای به صورت نمایی با شش متغیر است که به صورت رابطه‌ی ۵ به‌دست آمده است:

$$r(t) = A \left[\exp\left(-\frac{t-t_0}{\theta}\right) - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\lambda_s}\right) \right] + B \exp\left(-\frac{t-t_0}{\lambda_l}\right) \quad (5)$$

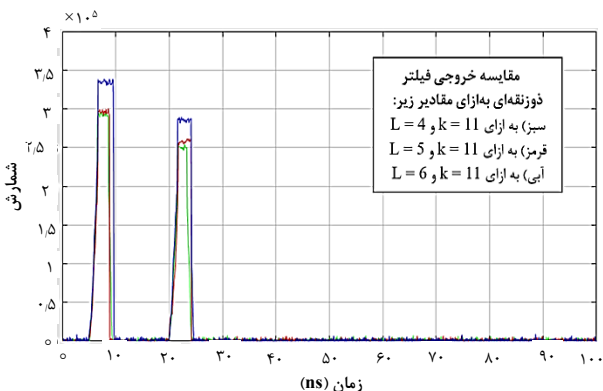
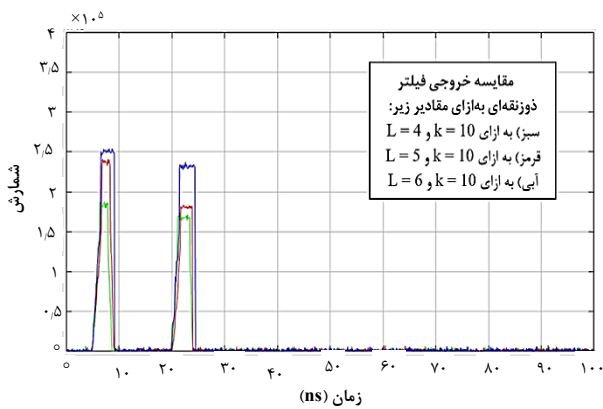
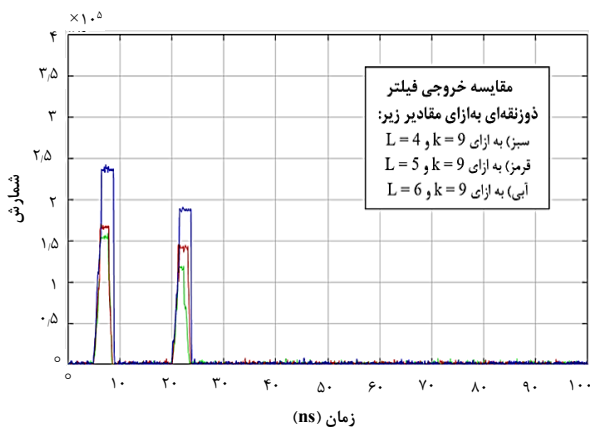
در این رابطه، پارامترهای A ، B ، λ_s ، λ_l ، θ و t_0 برای طیف‌های نوترون و گاما مطابق جدول ۲، تعیین شده است.

1. Artificial Neural Network





شکل ۸. نتایج حاصل از اعمال فیلتر مثلثی برای مقادیر مختلف متغیر k .



شکل ۹. نتایج به دست آمده توسط فیلتر دوزنقه‌ای برای مقادیر مختلف متغیر k و L .

بهینه برای متغیرهای فیلترهای دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح نیز مشابه آن چه که برای فیلتر مثلثی مدنظر قرار گرفت، خواهد بود البته مورد دیگری نیز باید مدنظر قرار گیرد و آن، این مسأله است که سطح صافتری برای ضلع بالایی طیف‌های حاصل در هر فیلتر، به دست آید. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب، نتایج فیلتر دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح را که به ازای مقادیر مختلفی برای k و L مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهند.

۳.۳ معیار مقایسه‌ی ضریب شایستگی

معیار سنجش ضریب شایستگی^۱ که با استفاده از رابطه‌ی ۶ حاصل می‌شود، معیار سنجش کیفیت جداسازی صورت گرفته خواهد بود که در این رابطه، D ، فاصله‌ی بین نوک قله‌های گاما و نوترون و $FWHM_n$ و $FWHM_\gamma$ نیز به ترتیب، پهنا در ارتفاع‌های نیم‌بیشنه‌ی قله‌های گاما و نوترون هستند.

$$FOM = \frac{D}{FWHM_n + FWHM_\gamma} \quad (6)$$

۴.۳ نتیجه‌ی دریافتی از مدار بسته شده در آزمایشگاه

همان‌طور که در بخش ۲.۲ توضیح داده شد، بعد از بستن مداری مطابق شکل ۲، دریافت خروجی مدار از واحد MPA و نمایش آن در کامپیوتر، نموداری مطابق شکل ۱۱ به دست آمد.

۵.۳ تحلیل نتایج حاصل از هر سه فیلتر

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره‌ای مختصر انجام شد، برای تعیین مقادیر بهینه برای متغیرهای مرتبط با هر فیلتر، علاوه بر این که باید ضرایب شایستگی مرتبط با نتایج حاصل از هر فیلتر به ازای مقادیر مختلف متغیرهای مرتبط با آن‌ها، مدنظر قرار بگیرد باید شمارش‌های زیر قله‌ها نیز مورد توجه باشد تا بتوان نتیجه‌گیری دقیق‌تری را انجام داد. در ادامه، در جدول‌های ۳ و ۴، شمارش‌های ثبت شده در زیر قله‌های نوترون و گاما حاصل از اعمال فیلتر مثلثی و نیز ضرایب شایستگی به دست آمده به ازای مقادیر مختلف متغیر k در این فیلتر، آورده شده‌اند.

1. Figure Of Merit (FOM)



جدول ۳. شمارش‌های ثبت شده در زیر قله‌های نوترون و گاما برای نتایج حاصل از فیلتر مثلثی به ازای مقادیر مختلف متغیر k

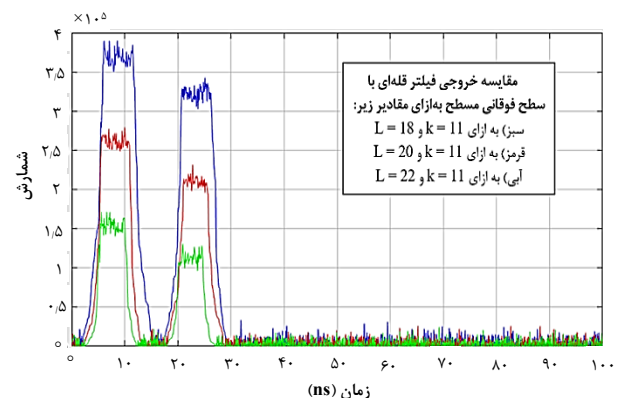
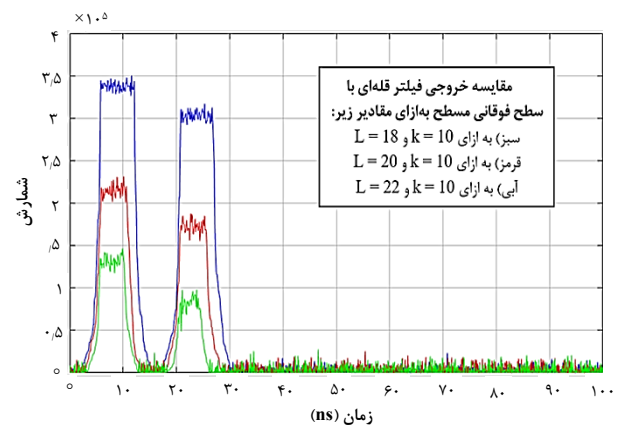
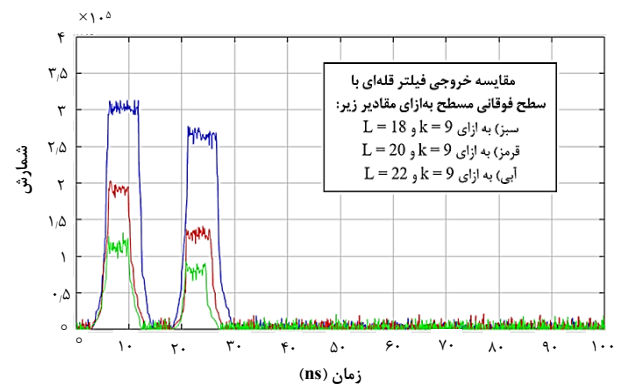
مقادیر متغیر k	فیلتر دیجیتالی مثلثی		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
	گاما	نوترون	
۸	۱۱۴۳۹۵۸۵	۸۸۷۹۲۷۰	
۹	۱۳۴۴۱۴۶۱	۱۱۳۷۳۲۳۲	
۱۰	۱۹۲۹۴۴۸۷	۱۴۷۹۳۸۴۴	شمارش ثبت شده در
۱۱	۲۱۵۴۷۷۹۶	۱۸۹۹۵۲۶۳	زیر قله‌های گاما برابر
۱۲	۲۶۲۲۵۷۹۱	۲۲۸۰۳۳۳۴	(۵۳۵۶۴۸۱) و برای
۱۳	۳۳۷۶۴۲۴۸	۳۰۱۱۳۲۳۴	نوترون (۳۸۹۱۲۰۲)
۱۴	۳۹۰۲۲۳۴۹	۳۳۳۰۴۷۲۶	است.

جدول ۴. مقادیر ضرایب شایستگی برای نتایج حاصل از فیلتر مثلثی برای مقادیر مختلف متغیر k

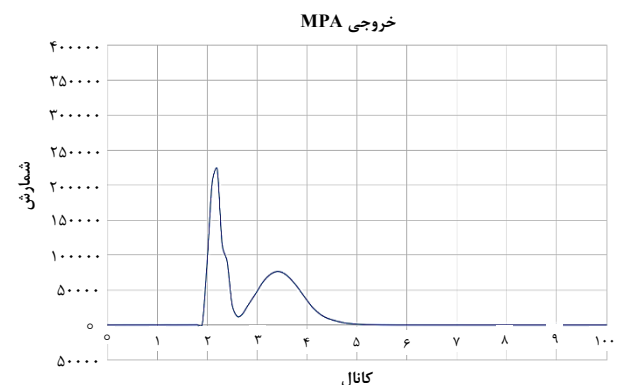
مقادیر متغیر k	فیلتر دیجیتالی مثلثی		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
	مقادیر متغیر k	فیلتر دیجیتالی مثلثی	
۸	۰٫۷۸۶	مقدار ضریب	
۹	۰٫۸۲۳	شایستگی حاصل	
۱۰	۰٫۶۳۷	شده، طبق این روش	
۱۱	۰٫۸۱۱	آنالوگ که فارغ از	
۱۲	۰٫۸۱۹	پارامترهای مرتبط با	
۱۳	۰٫۷۸۴	این فیلتر است، برابر	
۱۴	۰٫۷۶۰	(۰٫۸۰۰) است.	

جدول ۵ و ۶، شمارش‌های ثبت شده در زیر قله‌های نوترون و گاما حاصل از اعمال فیلتر دوزنقه‌ای و نیز ضرایب شایستگی به‌دست آمده به ازای مقادیر مختلف متغیرهای k و L در این فیلتر را نشان می‌دهند. همچنین در جداول ۷ و ۸، این موارد برای فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح قابل مشاهده است.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ الی ۱۰ برای هر یک از فیلترها به صورت مقایسه‌ای به ازای مقادیر مختلف k مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار متغیر k در فیلتر مثلثی و در فیلترهای دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح با تغییر مقادیر k و L ، گرچه مقادیر ضرایب شایستگی به‌دست آمده، تغییر یافته اما نزدیک بودن شمارش و ارتفاع مربوط به قله‌های نوترون و گاما در هر فیلتر با قله‌های حاصل از طریق آزمایش انجام شده در آزمایشگاه نیز باید مدنظر قرار گیرد؛ بدین سبب، اگرچه آن‌طور که طبق داده‌های جداول ۴، ۶ و ۸ به نظر می‌رسد مقدار $k = 9$ در فیلتر مثلثی، مقادیر $k = 9$ و $L = 4$ در فیلتر دوزنقه‌ای و مقادیر $k = 10$ و $L = 18$ در فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، مقادیر بهینه‌ی مورد نظر باشند اما با توجه به نکاتی که



شکل ۱۰. نتایج به‌دست آمده توسط فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح برای مقادیر مختلف متغیر k و L .



شکل ۱۱. خروجی دریافتی از MPA.

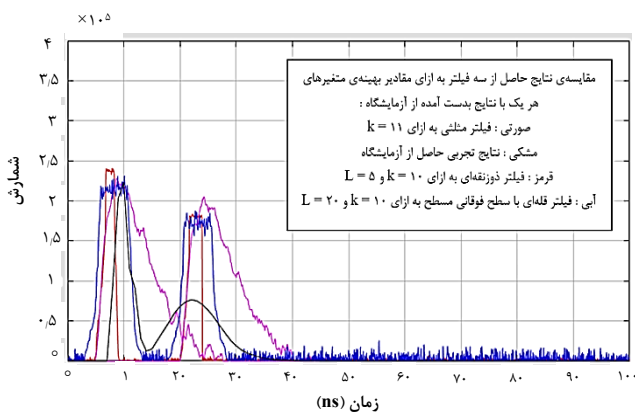


جدول ۷. شمارش‌های ثبت شده در زیر قله‌های نوترون و گاما برای نتایج حاصل از فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح به ازای مقادیر مختلف k و L

مقادیر متغیر k	مقادیر متغیر L	فیلتر دیجیتالی قله‌ای با سطح فوقانی مسطح		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
		نوترون	گاما	
۹	۱۸	۴۱۱۵۳۲۰	۶۴۵۱۳۵۷	شمارش ثبت شده
	۲۰	۷۴۷۴۱۰۴	۱۰۵۵۹۶۳۶	در زیر قله‌های
	۲۲	۱۸۳۷۷۸۸۷	۲۱۳۹۷۰۹۷	گاما برابر (۵۳۵۶۴۸۱) و
۱۰	۱۸	۴۱۸۹۲۵۹	۷۷۹۳۶۱۱	برای نوترون (۳۸۹۱۲۰۲)
	۲۰	۱۱۱۴۴۸۵۲	۱۳۹۷۶۰۶۶	است.
	۲۲	۲۳۳۲۳۳۴۲	۲۶۳۳۲۳۳۸	
۱۱	۱۸	۶۳۵۹۵۱۱	۹۱۳۰۶۵۰	
	۲۰	۱۳۶۱۲۰۱۸	۱۷۷۴۴۲۰۲	
	۲۲	۲۴۴۲۰۰۵۴	۲۹۷۵۵۲۰۳	

جدول ۸. مقادیر ضرایب شایستگی برای نتایج حاصل از فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح برای مقادیر مختلف متغیر k و L

مقادیر متغیر k	مقادیر متغیر L	فیلتر دیجیتالی قله‌ای با سطح فوقانی مسطح		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
		مقدار ضریب شایستگی حاصل شده، طبق این روش آنالوگ که فارغ از پارامترهای مرتبط با این فیلتر است، برابر (۰٫۸۰۰)	مقدار ضریب شایستگی حاصل شده، طبق این روش آنالوگ که فارغ از پارامترهای مرتبط با این فیلتر است، برابر (۰٫۸۰۰)	
۹	۱۸	۱٫۴۹۳		
	۲۰	۱٫۴۸۸		
	۲۲	۱٫۱۸۰		
۱۰	۱۸	۱٫۵۵۲		
	۲۰	۱٫۲۵۸		
	۲۲	۱٫۰۷۵		
۱۱	۱۸	۱٫۳۷۷		
	۲۰	۱٫۲۵۳		
	۲۲	۱٫۰۶۵		



شکل ۱۲. نتایج حاصل از سه فیلتر به ازای مقادیر بهینه متغیرهای هر یک و خروجی به‌دست آمده از آزمایشگاه در یک نمودار.

پیش‌تر در ابتدای بخش ۵.۳ نیز عنوان شد که باید در نظر گرفته شوند، مقادیر $k = 11$ برای خروجی فیلتر مثلثی، مقادیر $k = 10$ و $L = 5$ در فیلتر دوزنقه‌ای و مقادیر $k = 10$ و $L = 20$ در فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، به‌عنوان مقادیر بهینه و مناسب در نظر گرفته شدند.

در شکل ۱۲، به مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از اعمال فیلترهای مثلثی، قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، دوزنقه‌ای و آنچه از طریق آزمایش عملی در آزمایشگاه به‌دست آمده، پرداخته شده است.

جدول ۵. شمارش‌های ثبت شده در زیر قله‌های نوترون و گاما برای نتایج حاصل از فیلتر دوزنقه‌ای به ازای مقادیر مختلف متغیر k و L

مقادیر متغیر k	مقادیر متغیر L	فیلتر دیجیتالی دوزنقه‌ای		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
		نوترون	گاما	
۹	۴	۲۲۹۲۳۵۴	۳۶۰۵۳۳۲	شمارش ثبت شده در
	۵	۳۵۳۷۰۸۵	۳۹۴۷۵۹۵	زیر قله‌های گاما برابر (۵۳۵۶۴۸۱) و برای
	۶	۵۲۲۸۷۶۹	۷۰۰۰۵۳۴	نوترون (۳۸۹۱۲۰۲) است.
۱۰	۴	۴۲۹۳۲۵۸	۴۹۴۴۳۸۷	
	۵	۵۰۷۵۴۴۴	۵۸۳۲۱۴۰	
	۶	۷۸۸۱۶۶۸	۸۱۴۹۴۲۵	
۱۱	۴	۶۵۴۴۹۸۷	۸۲۲۹۸۹۱	
	۵	۷۷۰۰۵۶۰	۷۹۳۹۹۵۰	
	۶	۹۱۷۹۰۷۶	۱۱۶۶۲۳۰۹	

جدول ۶. مقادیر ضرایب شایستگی برای نتایج حاصل از فیلتر دوزنقه‌ای برای مقادیر مختلف متغیرهای k و L

مقادیر متغیر k	مقادیر متغیر L	فیلتر دیجیتالی دوزنقه‌ای		روش آنالوگ تفکیک کسر ثابت
		مقدار ضریب شایستگی حاصل شده، طبق این روش آنالوگ که فارغ از پارامترهای مرتبط با این فیلتر است، برابر (۰٫۸۰۰)	مقدار ضریب شایستگی حاصل شده، طبق این روش آنالوگ که فارغ از پارامترهای مرتبط با این فیلتر است، برابر (۰٫۸۰۰)	
۹	۴	۳٫۴۵۸		
	۵	۳٫۱۹۲		
	۶	۳٫۰۳۷		
۱۰	۴	۳٫۱۱۹		
	۵	۳٫۲۹۸		
	۶	۲٫۷۳۱		
۱۱	۴	۲٫۶۹۶		
	۵	۲٫۹۴۳		
	۶	۲٫۵۵۴		



مراجع

1. Tiwari A.K, Raut R, Basu K, Ghugre S.S, Dutta A, Sinha A.K. Digital Pulse Processing Simulations in MATLAB® & OCTAVE for Nuclear Spectroscopy. In Proceedings of the DAE Symp. *On Nucl. Phys.* 2012;57:944.
2. Alexander T.K, Goulding F.S. An amplitude-insensitive system that distinguishes pulses of different shapes. *Nuclear Instruments and Methods.* 1961;13:244-246.
3. Bayaat E. M.Sc. thesis, *Sharif University of Technology.* 2002 [In Persian].
4. Bose S, Chatterjee M.B, Sinha B.K, Bhattacharyya R. Neutron-gamma discrimination based on leading edge shape measurement. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1988;270(2-3):487-491.
5. Aghabozorgi S. M.Sc. thesis, *Sharif University of Technology.* 2014 [In Persian].
6. Hartigan J.A, Wong M.A. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the royal statistical society. series c (applied statistics).* 1979;28(1):100-108 (1979).
7. Korolczuk S, Linczuk M, Romaniuk R, Zychor I. Development of a digital method for neutron/gamma-ray discrimination based on matched filtering. *Journal of Instrumentation.* 2016;11(09):C09013.
8. Kim C, Yeom J.Y, Kim G. Digital n- γ pulse shape discrimination in organic scintillators with a high-speed digitizer. *Journal of Radiation Protection and Research.* 2019;44(2):53-63.
9. Korolczuk S, Linczuk M, Romaniuk R, Zychor I. Development of a digital method for neutron/gamma-ray discrimination based on matched filtering. *Journal of Instrumentation.* 2016;11(09):C09013.
10. Allison J, Amako K, Apostolakis J.E.A, Araujo H.A.A.H, Dubois P.A, Asai M.A.A.M, Yoshida H.A.Y.H. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 2006;53(1):270-278.
11. Klein H, Brooks F.D. Scintillation detectors for fast neutrons. *PoS.* 2006;097.
12. Lotfi Y, Moussavi-Zarandi S.A, Ghal-Eh N, Bayat E. A comparison on three neutron-gamma discrimination methods used with NE213, UGLLT and UGAB scintillators. *Radiation Physics and Chemistry.* 2020;171:108701.
13. Esposito B, Riva M, Marocco D, Kaschuck Y. A digital acquisition and elaboration system for nuclear fast pulse detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 2007;572(1):355-357.
14. BC-501, BC-501A, BC-519 Liquid Scintillators. www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/liquid-scintillators/neutron-gamma-psd-bc-501a-bc-519.

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی کیفیت جداسازی حاصل از سه فیلتر دیجیتال‌مانند، دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح و یافتن مقادیر بهینه‌ای برای متغیرهای مؤثر در هر یک از این سه فیلتر پرداخته شد. در فیلتر مثلثی و دوزنقه‌ای، شروع پالس تقریباً مشابه یک‌دیگر است اما در خروجی فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، شروع و فرود پالس تقریباً به صورت نمایی است. در چگونگی فرود از قله‌ای ایجاد شده‌ی مربوط به گاما و نوترون، فیلتر مثلثی ضعیف‌تر از دو فیلتر دیگر عمل کرده است که همین مورد مسبب کم‌تر بودن ضریب شایستگی فیلتر مثلثی نسبت به فیلتر دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح است. در فیلتر مثلثی، متغیری که می‌تواند در تغییر نتیجه‌ی آن تأثیرگذار باشد، متغیر k و در فیلتر دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، متغیرهای k و L مربوط به هر یک از این دو فیلتر هستند که در هر سه فیلتر، متغیر k بیش‌ترین تأثیر را در ارتفاع پالس ایجاد شده خواهد داشت درحالی‌که با تغییر پارامتر L ، تأثیر بیش‌تری را در عرض سطح فوقانی فیلترهای دوزنقه‌ای و قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، شاهد خواهیم بود؛ البته در رابطه با فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح، با تغییر متغیر L به ازای یک مقدار ثابت k ، تأثیر بیش‌تری بر روی ارتفاع پالس و پهنای قسمت مسطح به وجود آمده در قسمت بالایی پالس تشکیل شده، نسبت به فیلتر دوزنقه‌ای، قابل مشاهده است.

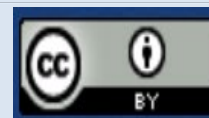
همان‌طور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، قله‌های مربوط به گاما و نوترون حاصل از اعمال فیلتر دوزنقه‌ای و فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح با دقت بیش‌تری نسبت به فیلتر مثلثی حاصل شده است چراکه آن‌طور که از شکل ۱۲ نیز قابل استنباط است و همچنین مطابق آن‌چه در جداول ۴، ۶ و ۸ برای مقادیر ضریب شایستگی مربوط به هر یک از سه فیلتر مورد استفاده مشاهده می‌شود، فیلتر دوزنقه‌ای بهترین عملکرد را در بحث جداسازی داشته و در مرتبه‌ی بعدی فیلتر قله‌ای با سطح فوقانی مسطح عملکرد مناسبی را نشان می‌دهد. فیلتر مثلثی نیز، در مقایسه با این دو فیلتر، عملکرد ضعیف‌تری از خود بروز داده است.



15. Nakhostin M. A new digital method for high precision neutron-gamma discrimination with liquid scintillation detectors. *Journal of Instrumentation*. 2013;8(05):P05023.
16. Boghrati B, Moussavi-Zarandi A, Esmaceli V, Nabavi N, Ghergherehchi M. On gamma-ray spectrometry pulses real time digital shaping and processing. *Instruments and Experimental Techniques*. 2011;54(5):715.
17. Liu G, Aspinall M.D, Ma X, Joyce M.J. An investigation of the digital discrimination of neutrons and γ rays with organic scintillation detectors using an artificial neural network. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009;607(3):620-628.

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

ولی پور، مهدی، حسینی، سیدابوالفضل. (۱۴۰۳)، جداسازی طیف نوترون و گاما با استفاده از روشی مبتنی بر فیلترهای دیجیتال. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۹ (۳)، ۴۶-۵۶.

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1588.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1588>

