



طراحی و شبیه‌سازی آشکارساز فوزویج بتا-گاما با استفاده از بسته نرم‌افزار GEANT4

رحیمی، محمدحسن - فقهی، سید امیرحسین* - خرسندی، مجید - جعفری، حمید

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

اکثر ایزوتوپ‌های بتازا، یک پرتو گاما گسیل می‌کنند. طیف‌نگاری همزمان این تابش‌ها باعث تقویت شناسایی می‌شود. آشکارساز فوزویج که از چند لایه سوسوزن تشکیل می‌شوند؛ یک سیستم شناسایی همزمان نمونه است. در این پژوهش آشکارساز فوزویج سه لایه با کد GEANT4 شبیه‌سازی شد و علاوه بر آن با استفاده از تمایز زمان خیزش پالس، جداسازی پالس‌های بتا و گامای همزمان انجام شد، بطوری که در طیف بتا کمترین شمارش گاما موجود باشد. نتایج این پژوهش نشان داد، می‌توان پالس‌های با زمان خیزش کمتر از آستانه ۲۶ نانوثانیه‌ای را به عنوان پالس بتا و پالس‌هایی با زمان خیزش بالای ۶۵ نانوثانیه را به عنوان پالس گاما در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: آشکارساز فوزویج، پرتو بتا، پرتو گاما، زمان خیزش پالس، GEANT4

مقدمه:

ورود مواد پرتوزا به محیط در اثر آزمایش سلاح هسته‌ای یا از یک راکتور هسته‌ای منجر به آلودگی‌های هسته‌ای محیط می‌شود؛ که برای انسان و محیط‌زیست خطرناک است [۱]. با استفاده از آنالیز و شناسایی نمونه‌های محیطی و مواد هسته‌ای، در مقادیر بسیار کم محصولات شکافت، می‌توان این مواد را شناسایی کرد. با آشکارسازی همزمان پرتوهای گسیلی از مواد می‌توان نوع ماده پرتوزا و مقدار آن را نیز شناسایی نمود [۲]. به منظور آشکارسازی همزمان چند پرتو می‌توان از آشکارساز فوزویج استفاده کرد، که در آن چند سوسوزن مختلف با اتصال اپتیکی به هم متصل شده‌اند و در نهایت به یک لامپ تکثیرگر فوتون متصلند. از تفاوت در شکل پالس ایجاد شده در هر سوسوزن می‌توان به منشا پالس پی برد [۳]. بسیاری از محققان با استفاده از آشکارسازهای فوزویج، در توسعه سیستم‌های آشکارساز انواع پرتوهای همزمان مشغول هستند. یک نمونه از این آشکارسازها توسط فارسانی و همکارانش، طراحی شده است؛ فوزویج سه لایه‌ای که برای جداسازی بتا-گاما، تداخل طیفی را به حداقل می‌رساند. آنها در این سیستم از سوسوزن‌های BC400 و $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ برای آشکارسازی بتا و پس از آن از $\text{NaI}(\text{Tl})$ برای آشکارسازی گاما بهره بردند و در بین آن‌ها از شیشه کوارتز برای اتصال اپتیکی استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این طراحی میزان پرتوهای تداخلی در لایه بتا را به حداقل رساندند [۴]. در این پژوهش ما نیز آشکارساز فوزویج بتا-گاما را با سوسوزن‌هایی که پاسخ بهتری نسبت به



کم کردن آلودگی گاما در لایه بتا داشته باشند پیشنهاد داده و در ضمن از روش زمان خیزش که پالس‌ها را با تمایز بهتری جدا می‌کند، استفاده کرده ایم.

روش کار :

الف) نحوه عملکرد فزویچ

آشکارسازهای فزویچ از چند لایه سوسوزن متفاوت که دارای ثابت‌های زمانی متفاوت می‌باشند، تشکیل می‌شود. این تفاوت به گونه‌ای است که پالس‌های خروجی از فوتوکاتد قابل تمایز از هم باشند و مشخص نماید که اندرکنش در چه لایه‌ای از سوسوزن‌ها انجام شده است، تا به توان پرتوها را از هم تمایز داد. برای آشکارسازی همزمان بتا و گاما چون پرتو گاما در لایه مربوط به بتا اندرکنش می‌دهد، باعث آلودگی در طیف بتا می‌شود که باید آن را حذف نمود. یک روش مؤثر برای این منظور، استفاده از سه لایه سوسوزنی و روش زمان خیزش است، که با آن می‌توان این آلودگی را به حداقل رساند.

ب) تعیین سوسوزن‌های مناسب

برای آشکارسازی همزمان بتا و گاما باید آشکارساز فزویچ را به گونه‌ای طراحی کرد که هر سوسوزن به یک نوع پرتو مربوط باشد؛ همچنین برای افزایش بازدهی آشکارساز سوسوزن اول و دوم باید برای بتا و سوسوزن سوم برای پرتوگاما مناسب باشد. سوسوزن‌های باید به گونه‌ای باشد که ثابت‌های زمانی آنها نیز متفاوت باشد [۴]. باتوجه به شرایط موردنظر سوسوزن‌ها با مشخصات جدول (۱) انتخاب شدند.

جدول (۱): مشخصات سوسوزن‌های مورد استفاده

سوسوزن‌ها	چگالی g/cm ³	زمان‌واپاشی ns	زمان‌خیزش ns	بیشینه طول موج گسیلی (nm)	ضریب شکست	بازده‌نوری مطلق (photon/MeV)
BC-400	۱/۰۳۲	۲/۴	۰/۹	۴۳۲	۱/۵۸	۱۱۰۰۰
YAG	۴/۵۵	۲۳۰	۵	۵۵۰	۱/۸۲	۸۰۰۰
CsI(Tl)	۴/۵۱	۶۸۰	۲۵	۵۴۰	۱/۸۰	۵۴۰۰۰

ج) جداسازی پالس به روش زمان خیزش

بنا بر تعریف زمان رسیدن پالس از ۱۰ درصد دامنه به ۹۰ درصد دامنه را زمان خیزش نامیده می‌شود. بسته به اینکه منشأ نور رسیده به فوتوکاتد از کدام سوسوزن باشد زمان خیزش پالس متفاوت می‌شود. بدین ترتیب با تعیین یک آستانه جداکننده زمان خیزش، می‌توان پالس‌های گاما را از بتا جدا نمود [۳].

د) کدها و نرم‌افزارها

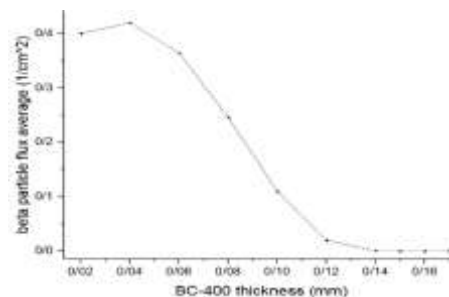
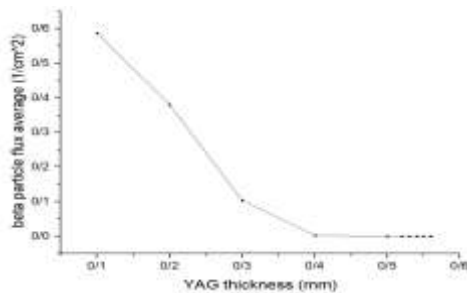


از کد MCNPX 2.6 که یک کد به روش مونت کارلو می‌باشد، جهت تعیین ضخامت‌ها و طراحی آشکارساز استفاده شده از بسته نرم‌افزاری GEANT4 برای اعتبارسنجی نتایج کد قبلی و تولید نورسوسوزنی یا همان تولید پالس در فوتوکاتد و برای جداسازی پالس‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

نتایج :

الف) تعیین ضخامت مناسب سوسوزن‌ها

در این پژوهش آشکارساز فوزویچی طراحی می‌شود که تا انرژی $3/2$ مگاالکترون ولت برای بتا جواب‌گو باشد، تا اکثر چشمه‌های بتا و گاماها همزمان را پوشش دهد. اگر یک لایه برای پرتو بتا اختصاص می‌یافت، به صورت برخط نمی‌شد، پرتوهای گامایی که در این سوسوزن اندرکنش می‌دهند را از بتا تمایز داد، بدین منظور از دو سوسوزن برای پرتو بتا استفاده شد تا شمارش گاما در طیف بتا به حداقل برسد. با استفاده از کد MCNPX ضخامت سوسوزن BC-400 را برای بتاهای 100 کیلوالکترون‌ولت (این انرژی به صورت دلخواه برای ایجاد پالس متفاوت گذاشته می‌شود) و با استفاده از شار ذرات بتا عبوری از سوسوزن به دست می‌آوریم. همان‌طور که در نمودار شکل ۱ مشخص است شار عبوری ذرات از طرف خروجی پرتو با افزایش ضخامت کاهش می‌یابد و در ضخامت $0/16$ میلی‌متر به صفر می‌رسد، پس ضخامت مورد نظر تعیین می‌شود. برای سوسوزن دوم نیز برای الکترون‌هایی با تک انرژی $3/2$ مگاالکترون‌ولت؛ شار عبوری در حضور سوسوزن اول با افزایش ضخامت به صفر رسید؛ همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، ضخامت $5/4$ میلی‌متری برای YAG حاصل گردید. ضخامت‌ها با استفاده از تالی‌های دیگر در MCNPX و شار عبوری در کد GEANT4 اعتبارسنجی گردید و همین نتایج حاصل شد.

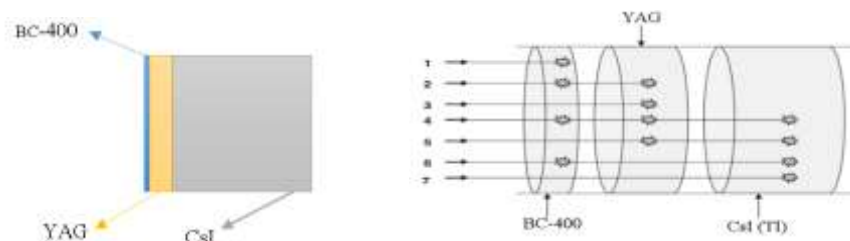


شکل (۱): تغییرات شار عبور الکترون 100 keV در BC-400 و الکترون $3,2$ MeV در YAG برای

تعیین ضخامت مناسب سوسوزن‌ها

در خصوص CsI(Tl) هرچه ضخامت بزرگتر باشد، بازدهی آشکارسازی بهتر است؛ بنابراین ضخامت این سوسوزن را طبق آنچه در اکثر طراحی‌های آشکارسازهای فوزویچ مرسوم است، برابر $2/54$ cm قرار می‌دهیم.
ب) احتمال پالس‌های تولیدی

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید، پرتو می‌تواند به هفت صورت با سوسوزن‌ها اندرکنش کند، بنابراین هفت نوع پالس داریم.

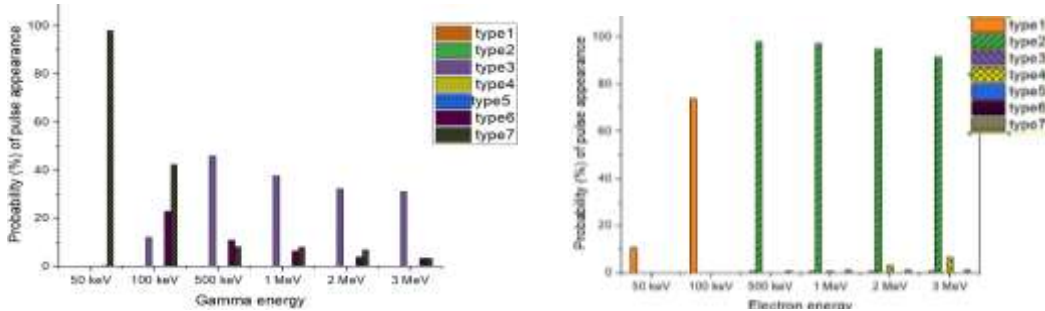


شکل (۲): نحوه قرار گیری سوسوزن‌ها و ۷ نوع سناریو اندرکنش پرتو با آنها

با به دست آوردن احتمال برهمکنش هر کدام از پرتوهای فرودی در هر کدام از سوسوزن‌ها با کد MCNPX و روابط مربوط به احتمال مجموعه‌ها می‌توان احتمال هریک از هفت پالس را به صورت جداگانه برای پرتو گاما و بتا با انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت محاسبه کرد که نتایج در جدول (۲) آورده شده است. برای مثال پالس نوع ۱ مربوط به پالسی است که پرتو فقط با سوسوزن اول اندرکنش می‌کند و احتمال این پالس برای پرتو بتا ۰/۷۳٪ و برای پرتو گاما ۰/۰۸٪ است. همچنین پالس نوع ۲ مربوط به پالس‌هایی است، که زمان‌خیزش آن از دو قسمت کند و تند حاصل از اندرکنش با سوسوزن اول و دوم است و احتمال پالس برای بتا ۹۷/۳۳٪ و برای گاما ۰/۰۱٪ است. پالس‌هایی که از این دو نوع هستند به عنوان پرتو بتا با کمترین آلودگی گاما جمع‌آوری می‌شود. پالس نوع ۳ نیز که حاصل از سوسوزن سوم به تنهایی است فقط برای پرتو گاما جمع‌آوری می‌شود و پرتو بتایی در آن موجود نیست. ما بقی پالس‌ها که احتمال مربوط به هر دو پرتو برای آن وجود دارد؛ را جمع‌آوری نمی‌کنیم. این داده‌ها عملکرد بهتر این سیستم نسبت به نمونه ساخته شده توسط گروه فارسونی [۴] با توجه به تغییر سوسوزن‌ها را نشان می‌دهد. جدول (۲): احتمال پالس‌ها با توجه به نوع اندرکنش با سوسوزن‌ها برای پرتو بتا و گاما با انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت

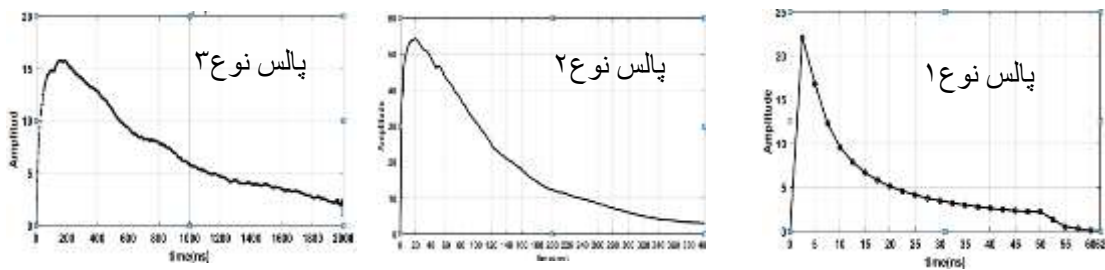
پالس نوع	لایه‌های سوسوزن			احتمال کل (%)		جمع‌آوری پالس به عنوان:
	BC-400	YAG	CsI(Tl)	بتا	گاما	
۱	*			۰/۷۳	۰/۰۸	بتا
۲	*	*		۹۷/۳۳	۰/۰۱	بتا
۳			*	۰	۳۷/۹۲	گاما
۴	*	*	*	۰/۸۲	۰/۰۱	رد می‌شود
۵		*	*	۰/۰۱	۶/۴	رد می‌شود
۶	*		*	۰/۰۱	۰/۰۶	رد می‌شود
۷		*		۱/۰۹	۸/۰۱	رد می‌شود

برای تمامی انرژی‌ها دیگر بتا و گاما نیز می‌توان همین نتیجه را با توجه به شکل (۳) گرفت. فقط در انرژی‌های پایین پرتو گاما (زیر ۱۰۰ کیلو الکترون ولت) احتمال اندرکنش در لایه سوم پایین است که چشمه‌های بتا-گاما با انرژی کم گاما محدود هستند.



شکل (۳): احتمال پالس‌های مختلف در انرژی‌های مختلف الکترون و گاما

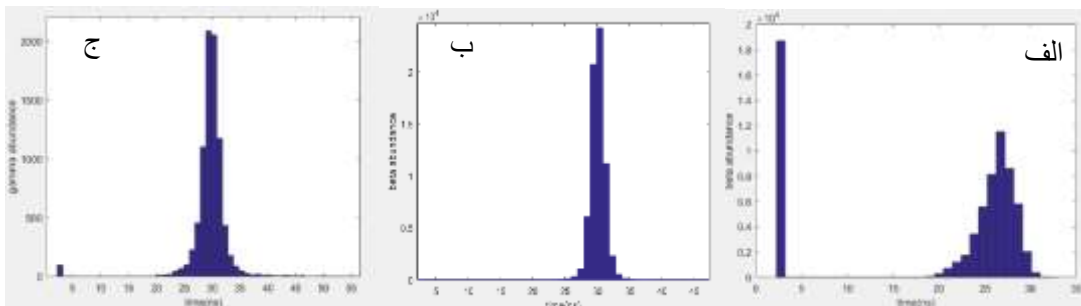
سه نوع از نمونه پالس‌های نوع ۱ و ۲ و ۳ که جمع‌آوری می‌شود را در شکل (۴) مشاهده می‌کنید.



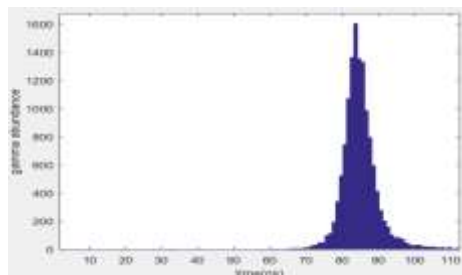
شکل (۴): سه نمونه از پالس‌های جمع‌آوری شونده (پالس نوع ۱ و نوع ۲ مربوط به بتا و پالس نوع ۳

زمان خیزش پالس

با استفاده از بسته نرم‌افزاری GEANT4 و در نظر گرفتن خصوصیات اپتیکی و ویژگی‌های بازتاب نور یا بازتاب پرتو فرودی، پالس‌های حاصل از پرتو بتا در سوسوزن اول و دوم و نیز پالس‌های بتای مربوط به اندرکنش‌هایی که فقط در سوسوزن دوم رخ می‌دهد، را به دست آورد و با برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار متلب زمان خیزش آن مشخص گردید. همانگونه که در شکل (۵) نیز مشخص است پالس‌هایی با زمان خیزش کمتر از ۲۶ نانوثانیه سهمی کمتر از یک درصد در پالس‌های مربوط به اندرکنش بتا فقط در لایه دوم را دارند، لذا با توجه به شکل (۵ الف) پالس‌هایی که از نوع ۱ و ۲ هستند دارای زمان خیزش کمتر از ۲۶ نانوثانیه می‌باشند. برای جدا کردن بتا آستانه ۲۶ نانوثانیه تعیین شد. پالس‌های زیر این آستانه همانطور که قبلاً گفته شد، دارای کمترین آلودگی گاما می‌باشند و در شکل (۵ ج) هم مشخص است که کمتر از یک درصد پالس‌های گاما در این محدوده هستند. بنابراین نتایج به دست آمده در جدول (۱) مورد تایید می‌باشد.



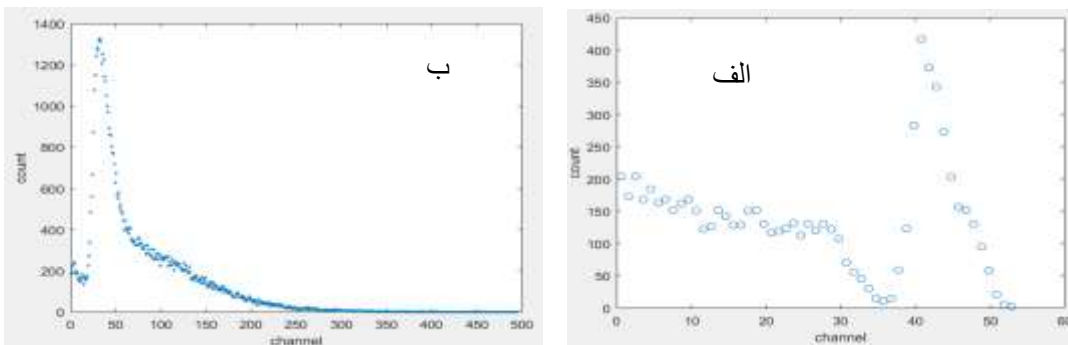
شکل (۵): محدوده زمان خیزش پالس برای پرتو بتا در صورت ثبت پالس در سوسوزن BC-400 و YAG (الف) و فقط در YAG (ب). محدوده زمان خیزش پالس‌های مربوط به اندرکنش گاما با BC-400 و YAG (ج)



شکل (۶): محدوده زمان خیزش پالس‌های مربوط به اندرکنش گاما با CsI



برای تعیین آستانه گاما، باید پالس‌هایی در نظر گرفته شوند که زمان خیزش آن‌ها حاصل از اندرکنش گاما فقط با لایه سوم است. بنابراین طبق شکل (۶) زمان خیزش ۶۵ نانوثانیه به عنوان آستانه جداکننده گاما تعیین شد. بدین ترتیب پالس‌های بزرگتر از این آستانه به عنوان گاما ثبت می‌شود. با قرار دادن یک چشمه گسیلنده که هم بتا و هم گاما در مقابل آشکارساز گسیل می‌کند و جدا سازی پالس‌های حاصل از آن می‌توان طیف هرکدام از پرتوها را به صورت جداگانه دریافت کرد و از روی انرژی فوتوپیک گاما و انرژی بیشینه طیف بتا می‌توان نوع ایزوتوپ را مشخص نمود. در شکل (۷) طیف جداسازی شده بتا و گاما برای چشمه ^{137}Cs در محیط شبیه‌سازی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۷): (الف) طیف گاما مربوط به ^{137}Cs و (ب) طیف بتا آن پس از جداسازی

بحث و نتیجه گیری :

بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده؛ آشکارساز فوزویچ بتا-گاما را می‌توان با سه لایه سوسوزنی BC-400 و YAG و CsI(Tl) طراحی کرد و با روش‌های جداکننده پالس که یک نوع آن در این پژوهش آورده شده است، پالس‌ها را از یکدیگر جدا نمود. در این پژوهش مشخص شد که با تعیین آستانه ۲۶ نانوثانیه‌ای می‌توان پالس‌هایی که زمان خیزش کمتر این مقدار را دارند به عنوان بتا و پالس‌هایی با زمان خیزش بالای ۶۵ نانوثانیه را به عنوان پالس گاما در نظر گرفت. بدین ترتیب شمارش گاما در طیف بتا نداریم و می‌توان برای مقاصد فیزیک بهداشت برای تعیین تعداد شمارش پرتو بتا بدون شمارش گاما در نمونه از آن بهره برد.

مراجع :

[۱] Thein, M., et al., Delivery of transuranic elements by rain to the Mediterranean Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980. 44(8): p. 1091-1097.

[۲] رجبی، طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی آشکارساز فوزویچ. دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۵



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



-
- [۳] Chandrikamohan, P. and T.A. DeVol, Comparison of pulse shape discrimination methods for phoswich and CsI:Tl detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007. 54(2): p. 398.
- [۴] Farsoni A.T., Simultaneous beta/gamma digital spectroscopy ,in Nuclear Engineering and Radiation Health Physics2006, Oregon State University.