

بررسی اثر نفتالن در ترکیب سوسوزن پلاستیک با خاصیت جداسازی شکل پالس

لاله یونسی^۱، مهدی صالحی باروق^{۱*}، شروین احمدی^۲، وحید اسماعیلی ثانی^۱ و اسمعیل بیات^۳

^۱گروه مهندسی هسته‌ای-مهندسی پرتو پزشکی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

^۲پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران.

^۳گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

*تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، گروه مهندسی هسته‌ای-مهندسی پرتو پزشکی، کدپستی: ۱۴۶۹۶-۶۹۱۹۱.

پست الکترونیکی: me.salehi@iaui.ac.ir

چکیده

ضرورت ساخت آشکارسازهایی با ابعاد بزرگ، بازدهی مطلوب، قدرت تفکیک بالا و قیمت کم، در دو دهه اخیر منجر به تحقیقات گسترده‌ای در ساخت سوسوزن‌های پلاستیکی شده است. بهینه‌سازی این نوع سوسوزن از موضوعات تحقیقاتی روز دنیا است. در این پژوهش از مونومر استایرن، دی‌فنیل اکسازول (PPO) به‌عنوان فلوروفور اولیه، فنیل اکسازول بنزن (POPOP) به‌عنوان فلوروفور ثانویه و نفتالن در ساخت سوسوزن پلاستیک استفاده شد. ساخت نمونه‌ها بر اساس فرایند پلیمریزاسیون با روش حرارتی بدون آغازگر صورت گرفته است. نتایج طیف سنجی گاما با استفاده از چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co نشان داد که با افزودن نفتالن در ساخت سوسوزن پلاستیک، بهره نوری به ترتیب ۵/۷ و ۲/۷ درصد افزایش می‌یابد. جداسازی پرتوهای گاما و نوترون با استفاده از روش گذر از صفر به‌وسیله چشمه ^{252}Cf نشان داد که برای نمونه شامل ۱۵ درصد وزنی PPO بدون حضور نفتالن، FOM و نسبت قله به دره در بایاس ۱۰۰۰ keVee به ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۴/۱۸ و برای نمونه شامل ۱۵ درصد وزنی PPO و ۴ درصد وزنی نفتالن، برابر ۱/۰۵ و ۸/۷۱ است.

کلیدواژگان: سوسوزن پلاستیکی، فلوروفور اولیه، فلوروفور ثانویه، نفتالن، جداسازی.

۱. مقدمه

سوسوزن‌های پلاستیکی در زمینه‌های مختلف پزشکی و صنعت، و برای اهداف علمی در مؤسسات تحقیقاتی در بخش‌هایی مانند تصویربرداری پزشکی، تشخیص تشعشعات یونیزان و طیف سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲،۱]. در طراحی آشکارسازهای فیزیک ذرات سوسوزن‌های پلاستیکی نقش بسیار مهمی را بر عهده دارند. از ساده‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی تا

آشکارسازهایی همانند آشکارساز نوترینو از این نوع سوسوزن‌ها استفاده می‌شود [۳]. به موازات تنوع و پیچیده شدن آزمایش‌ها، سوسوزن‌های پلاستیکی مختلف ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع سوسوزن‌ها به دلیل وضوح مناسب، زمان‌بندی سریع، ساختار ساده، سبک و مستحکم به‌عنوان یکی از آشکارسازهای محبوب معرفی شده‌اند. یکی از چالش‌های حائز

اهمیت در حوزه آشکارسازی، آزمودن روش‌های مختلف در ساخت سوسوزن‌های پلاستیک است.

سوسوزن‌های پلاستیکی کامپوزیتی شامل یک ماتریس پلیمری است که دارای مواد سوسوزنی است. نقش سوسوزن‌های اولیه^۱ در یک سوسوزن پلاستیک تبدیل انرژی پرتوهای یونیزان برخوردار به فوتون‌هایی در ناحیه فرابنفش است که سوسوزن‌های ثانویه^۲، نور فرابنفش را به ناحیه نور مرئی انتقال می‌دهند [۴]. در چنین وضعیتی فوتون‌های نوری تولید شده با بازدهی بیش‌تری به الکترون تبدیل و تقویت می‌شود و پالس خروجی حاصل می‌گردد [۵]. بدین ترتیب سوسوزن پلاستیک باید ساختاری حاوی سوسوزن‌های اولیه و ثانویه داشته باشد. مونومرهای^۳ با ساختار حلقه بنزنی همانند استایرن و وینیل تولوئن در ساخت سوسوزن‌های پلاستیک به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سوسوزن‌های پلاستیکی در واقع محصول یک زنجیره هستند که هر یک نقش اساسی در اهداف آشکارسازی پرتو را ایفا می‌کنند. این زنجیره از فناوری‌های مختلف مرتبط با فیزیک هسته‌ای و ذرات، شیمی، فوتونیک، الکترونیک آنالوگ و دیجیتال و علوم کامپیوتر بهره می‌گیرد [۳].

در ساخت سوسوزن‌های پلاستیک از فلوروفورهای مختلف استفاده می‌شود. فلوروفورهایی همانند دی فنیل اکسازول (PPO)^۴ و دی وینیل بنزن (DVB)^۵ به‌عنوان سوسوزن اولیه و فنیل اکسازول بنزن (POPOP)^۶ و متیل استایریل بنزن (Bis-MSB)^۷ به‌عنوان سوسوزن ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای افزایش احتمال برهمکنش گاما در سوسوزن‌های پلاستیک، می‌توان مواد حاوی سرب را به ترکیب سوسوزن پلاستیکی اضافه کرد [۶]. افزودن بیسموت تلاش دیگری برای

بهبود کارایی آشکارساز با افزایش عدد اتمی مؤثر است [۷]. افزودن بور و گادولینیم به سوسوزن‌های پلاستیکی، حساسیت آشکارساز را برای نوترون‌های حرارتی افزایش می‌دهد [۹،۸].

جداسازی شکل سیگنال نوترون و گاما، یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که برای آشکارسازی نوترون‌های پرنانرژی در حضور تابش زمینه گاما مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بر اختلاف شکل علامت‌های سوسوزنی در برانگیختگی‌های ناشی از پرتوهای گاما و نوترون در سوسوزن‌های آلی استوار است. تلاش‌هایی برای غلبه بر محدودیت‌های استفاده از سوسوزن‌های مایع (همانند نیاز به ظرف نگهدارنده، قابلیت اشتعال و سمیت) برای تشخیص قابلیت جداسازی شکل پالس (PSD)^۸ با توسعه این ویژگی خاص در سوسوزن‌های پلاستیکی مبتنی بر پلی استایرن (PS) و پلی وینیل تولوئن (PVT) صورت گرفته است [۱۰]. از سال ۲۰۱۰، پژوهشگران متوجه شدند که شاید بتوان با افزایش مؤثر درصد سوسوزن اولیه احتمال برهم‌کنش‌های سه‌گانه-سه‌گانه را افزایش داد. با بالا بردن دانسیته حالات سه‌گانه، امکان همپوشانی اوربیتال‌های فلوروفورها افزایش یافته و آن‌ها خواهند توانست حالات برانگیخته بیش‌تری را مبادله کنند، و بنابراین نابودی سه‌گانه-سه‌گانه می‌تواند به‌طور مؤثری عمل کرده و امکان خاصیت تبعیض پالس به‌وجود آید [۳].

در سال ۲۰۱۲، زایتسوا و همکاران، سوسوزن‌های پلاستیکی با قابلیت جداسازی شکل سیگنال نوترون و گاما ساختند [۱۱]. در سال ۲۰۱۳، از تزریق Li^۶ به ماتریس پلیمر، نوعی سوسوزن پلاستیکی ساختند که قابلیت جداسازی سه‌گانه نوترون حرارتی / نوترون سریع / گاما را داشت [۱۲]. در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ هممل و همکاران، با شرکت در یک پروژه وسیع

⁵ Divinylbenzene

⁶ 1,4-Bis(5-phenyl-2-oxazolyl) benzene

⁷ 1,4-Bis(2-methylstyryl)benzene

⁸ Pulse shape discrimination

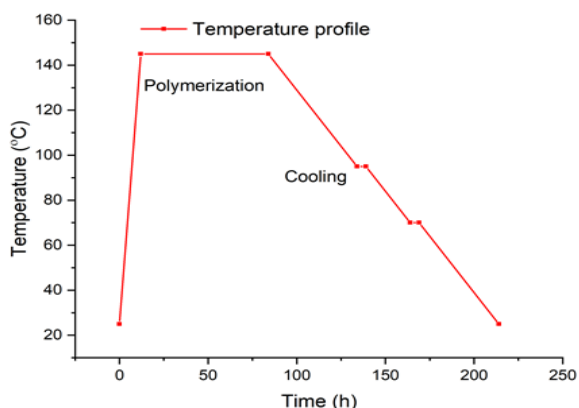
¹ Primary Fluorophore

² Secondary Fluorophore

³ Monomers

⁴ 2,5-Diphenyloxazole

احتمالی از فلوروفرها حذف شود. سپس ۳۷/۵ گرم PPO و ۰/۱۲۵ گرم POPOP در ۲۵۰ گرم مونومر استایرن در بالن شیشه‌ای به وسیله استیرر، با دمای 60°C به مدت ۲ ساعت حل شدند. ترکیب حاصل در استوانه شیشه‌ای ریخته شده و داخل راکتور (کوره) قرار داده شد. راکتور توسط گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ سه بار شستشو داده شد. در هر شستشو، فشار گاز به وسیله پمپ خلاء روتاری، به آرامی از ۸۰ torr به کمتر از ۲ torr رسید. تنظیمات دما توسط کنترل کننده‌های PID^۴، بر طبق پروفایل دمایی در شکل ۱ تنظیم شده و فرایند پلیمریزاسیون تحت گاز آرگون با فشار ۱ bar در مدت حدود ۹ روز کامل شد.



شکل(۱): پروفایل دمایی فرآیند پلیمریزاسیون حرارتی طی ۲۱۴ ساعت.

نمونه پس از ۲۱۴ ساعت از راکتور خارج شده و پس از برشکاری، سطح نمونه پرداخت و پولیش شد.

برای دومین نمونه روش ساخت به این ترتیب بود که ۹ گرم PPO، ۰/۰۳ گرم POPOP و ۲/۴ گرم نفتالن در ۶۰ گرم مونومر استایرن در بالن شیشه‌ای به وسیله استیرر، در دمای 45°C به مدت ۲ ساعت حل شدند و دقیقاً همانند روش به کار رفته برای نمونه اول، نمونه دوم در راکتور تحت گاز آرگون قرار داده شده و پس از ۲۱۴ ساعت از راکتور خارج شده و تحت برش و پولیش قرار گرفت. برای درصد بالای PPO در سوسوزن‌های

با نام نوترومانیا^۱ به منظور توسعه سوسوزن‌های پلاستیکی، ترکیبات مختلف و متنوعی از پلاستیک‌ها را مورد بررسی قرار دادند. فرمولاسیون کلی آن‌ها استفاده از مونومرها، غلظت بالایی از فلوروفور اولیه و افزودن فلوروفور ثانویه بود [۱۴،۱۳].

یونسی و همکاران در سال ۲۰۲۳ سوسوزن‌های پلاستیکی بر پایه استایرن و متیل استایرن ساختند [۱۵،۱۶]. نتایج آن‌ها نشان داد که بهینه بهره نوری در سوسوزن پلاستیکی با ۱۵ درصد وزنی PPO ایجاد می‌شود، اما خاصیت جداسازی شکل پالس ارتباط مستقیم با درصد PPO دارد [۱۵].

استفاده از نفتالن در سوسوزن‌های مایع باعث افزایش خاصیت جداسازی شکل پالس می‌شود. بر اساس نتایج اثر نفتالن در سوسوزن مایع، در این پژوهش با افزودن نفتالن به ترکیبات مورد استفاده در ساخت سوسوزن پلاستیکی و تعیین درصد بهینه آن، خاصیت جداسازی شکل پالس مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. ساخت نمونه‌ها

مواد اولیه شامل دی‌فنیل اکسازول (PPO) و فنیل اکسازول بنزن (POPOP) محصول شرکت سیگمالدریج^۲، نفتالن محصول شرکت مرک^۳ و استایرن صنعتی خریداری شد. اولین نمونه سوسوزن پلاستیک در پایه استایرن با ۱۵ درصد وزنی PPO و ۰/۰۵ درصد POPOP نسبت به استایرن، ساخته شد. روش ساخت به این شکل بود که در ابتدا برای فیلتراسیون مونومر، استایرن از یک ستون حاوی آلومینا عبور داده شد تا آب، الکل و TBC^۴ از مونومر جدا شده و سپس مونومر از صافی سرمایی عبور داده شد. پودرهای PPO و POPOP به مدت ۳ ساعت در آون تحت خلاء با دمای 50°C قرار داده شد تا رطوبت

⁴ 4-tert-Butylcatechol

⁵ Proportional integral derivative

¹ Neutromania

² Sigma Aldrich

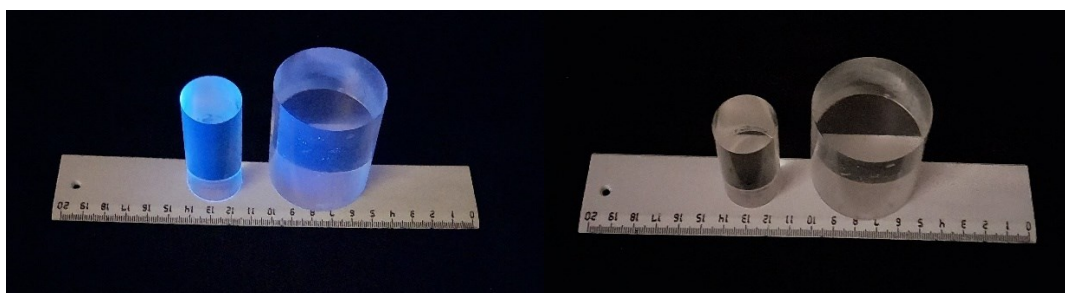
³ Merck

پلاستیک، افزایش درصد نفتالن باعث چسبندگی نمونه به جداره شیشه‌ای شده و نرم‌شدگی در نمونه‌های سوسوزن پلاستیکی با ۱۵ درصد وزنی PPO ایجاد می‌شود. برای ۴ درصد نفتالن در نمونه چسبندگی و نرم‌شدگی ایجاد نشده و بهینه میزان نفتالن

در ساخت نمونه بود. جدول ۱ درصد مواد به کار رفته را نشان می‌دهد. در شکل ۲ تصویر نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول (۱): نوع و درصد مواد به کار رفته در هر نمونه.

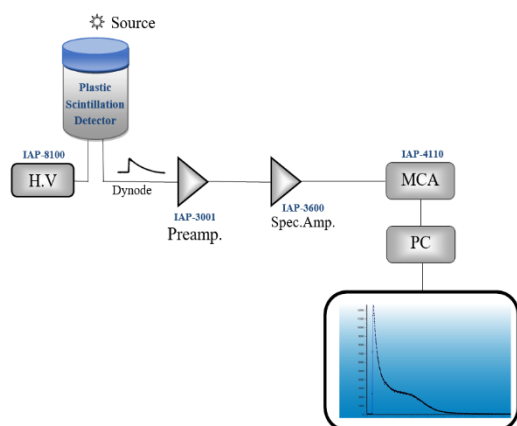
نفتالن	سوسوزن ثانویه (POPOP)	سوسوزن اولیه (PPO)	ابعاد نمونه‌ها (cm) قطر × (cm) ارتفاع	نام نمونه
-	۰/۱۲۵ (گرم) ۰/۰۵ %	۳۷/۵ (گرم) ۱۵ %	۵×۵	PS-PPO ۱۵%
۴% (۲/۴ گرم)	۰/۰۳ (گرم) ۰/۰۵ %	۹ (گرم) ۱۵ %	۵×۲/۵	PS-N-PPO ۱۵%



شکل (۲): نمونه‌های سوسوزن پلاستیکی ساخته شده: در نور مرئی و تحت نور UV، نمونه سمت راست ۱۵% PS-PPO و نمونه سمت چپ

۱۵% PS-N-PPO.

مقایسه بهره‌نوری سوسوزن‌های پلاستیک استفاده شود. برای بررسی و مقایسه بهره نوری سوسوزن‌های ساخته شده، سوسوزن پلاستیک تجاری ۸۹-UPS، معادل NE۱۰۲A ساخت شرکت AMCRYS، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۳): مدار طیف سنجی گاما با سوسوزن‌های پلاستیکی.

۲.۲. آزمون سوسوزنی نمونه‌ها

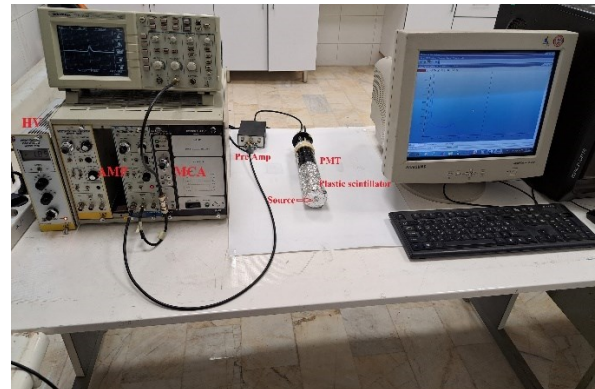
نمونه‌ها با استفاده از گریس سیلیکونی ۶۳۰-BC با PMT مدل Hamamatsu-R1۸۲۸-۰۱ جفت شدند. فویل آلومینیومی برای بازتاب و محافظ نور استفاده شد. یک تقسیم کننده ولتاژ نوع B با خروجی آند و داینود استفاده شد. بلوک دیاگرام مدار طیف سنجی نشان داده شده در شکل ۳ برای مقایسه بازده نور نمونه‌های ساخته شده، مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، لبه کامپتون چشمه‌های ^{۱۳۷}Cs با آهنگ پرتوزایی μCi و ^{۶۰}Co با آهنگ پرتوزایی $۰/۳ \mu\text{Ci}$ تحت شرایط یکسان ثبت شد. کانال مطابق با ۸۹٪ شمارش در بخش نزولی طیف پیوستار کمپتون^۱، به‌عنوان لبه کمپتون در نظر گرفته شد [۱۷]. کانال متناظر با لبه کمپتون در طیف ارتفاع پالس، می‌تواند برای

¹ Compton

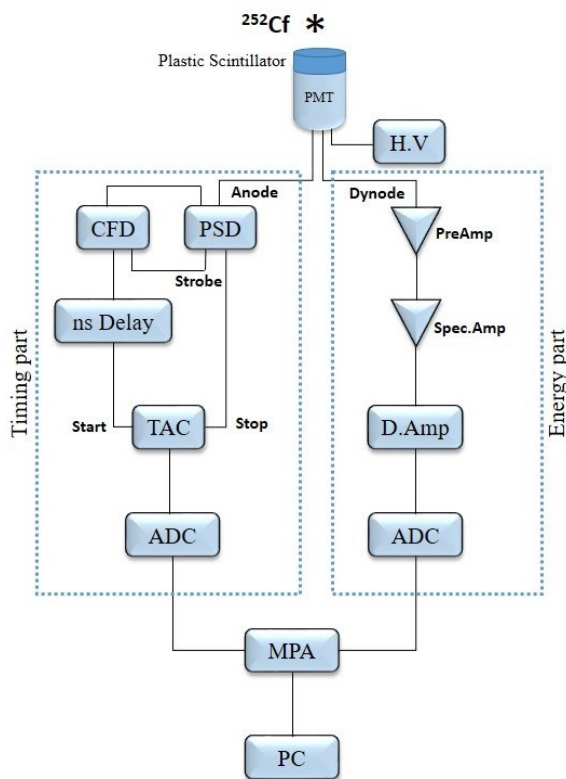
تنظیم شود. این مقدار آستانه بر حسب انرژی معادل الکترون، با کالیبره کردن دامنه پالس با منابع گاما مانند ^{24}Am ، ^{60}Co ، ^{22}Na و ^{137}Cs ، بیان شده و انرژی بایاس نامیده می‌شود.

جداسازی نوترون-گاما برای یک چشمه ^{252}Cf با آهنگ پرتوایی $200\ \mu\text{Ci}$ در بایاس‌های مختلف انجام گرفت و میزان بایاس توسط کالیبراسیون محور انرژی با چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co تعیین گردید. برای مقایسه کیفی جداسازی نوترون و گاما در نمونه‌های ساخته شده از یک سل در ابعاد $2'' \times 2'' \times 0.2''$ سوسوزن مایع NE-۲۱۳ استفاده شد.

در شکل ۴ تصویر مدار طیف‌نگاری، نمونه مونتاژ شده روی PMT و نحوه قرار گرفتن چشمه نشان داده شده است.



شکل (۴): تصویر مدار طیف‌نگاری با نمونه‌های سوسوزن پلاستیک.



شکل (۵): مدار جداسازی نوترون-گاما را با استفاده از روش گذر از صفر.

کیفیت جداسازی نوترون-گاما معمولاً بر حسب عدد شایستگی FOM^۱ برابر فاصله جدایی بین قله‌های نوترون و گاما تقسیم بر مجموع پهنای نیم ارتفاع قله‌های نوترون و گاما و نسبت قله به دره^۲ برابر میانگین مجموع شمارش قله‌های گاما و

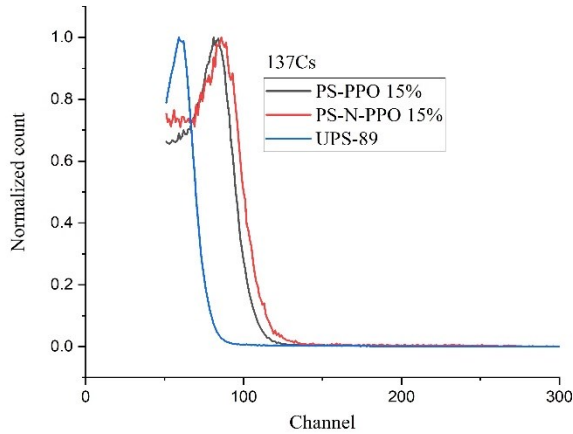
برای بررسی ویژگی‌های تبعیض شکل پالس (PSD) نمونه‌ها، جداسازی نوترون-گاما با استفاده از یک مدار آنالوگ بر اساس روش گذر از صفر تعیین شد [۱۸]. شکل ۵ مدار جداسازی نوترون-گاما را با استفاده از روش گذر از صفر نشان می‌دهد. شاخه سمت چپ مدار بخش زمانی است و زمان افت (نزول) پالس‌های آند را اندازه‌گیری می‌کند. در آشکارساز آلی با ویژگی PSD، نوع سنگین‌تر ذرات با یونیزاسیون بیشتر، پالس‌هایی با زمان فروافت طولانی‌تر ایجاد می‌کنند. بنابراین نوترون که با پس زدن پروتون تشخیص داده می‌شود از گاما که توسط الکترون کامپتون آشکار می‌شود، در محور زمان جدا می‌شود. شاخه سمت راست مدار، ارتفاع پالس‌های داینود را اندازه‌گیری می‌کند و انرژی ذخیره شده ذرات در آشکارساز را نشان می‌دهد. بنابراین، زمان فروافت و دامنه هر پالس در دو کانال مجزا دیجیتالی می‌شود و یک نقطه در نمودار دامنه-زمان تشکیل می‌دهد. شمارش‌ها را می‌توان با محور سوم (Z) یا رنگ‌ها نمایش داد. ماژول CFD (زمانگیر کسر ثابت)^۱ در قسمت زمان‌گیری مدار، دارای یک پتانسیومتر است که می‌تواند جهت تعیین آستانه برای تعیین حداقل ارتفاع قابل قبول پالس

³ Peak to valley

¹ Constant Fraction Discriminator

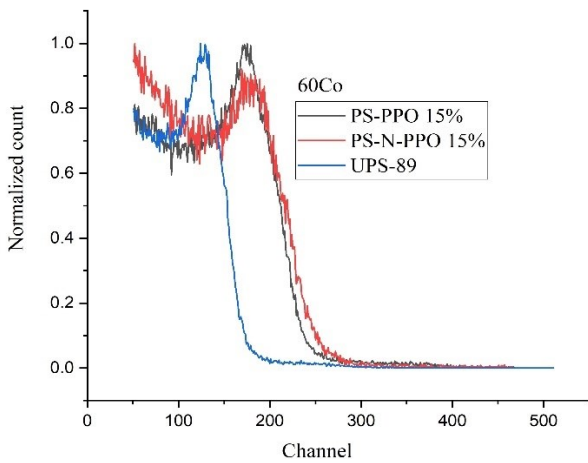
² Figure of merit

می دهند. با توجه به عدد اتمی پایین سوسوزن های پلاستیک، در طیف آن ها فوتوپیک وجود ندارد و تنها پیوستار کمپتون قابل مشاهده است. محل لبه کمپتون پرتو گاما در کانال متناظر با ۰/۸۹ مشاهده شده است. محل لبه کمپتون پرتو گاما در کانال متناظر با ۰/۸۹ مشاهده شده است. بیشینه لبه نزولی طیف بوده و معادل ۴۷۸keV و ۱۰۳۷keV به ترتیب برای چشمه های ^{137}Cs و ^{60}Co هستند.



شکل (۷): طیف ارتفاع پالس نمونه های ۱۵% PS-PPO.

PS-N-PPO ۱۵% و UPS-۸۹ به وسیله چشمه ^{137}Cs .



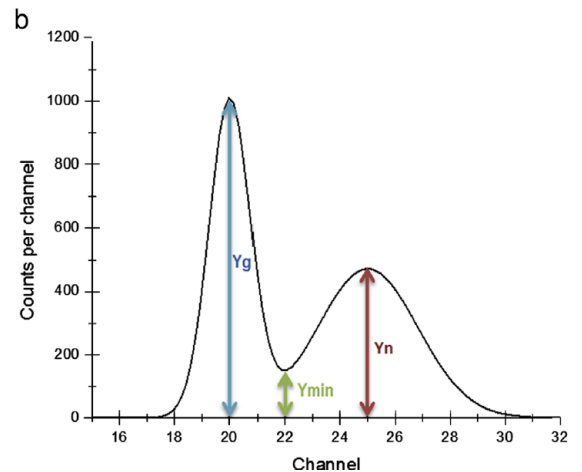
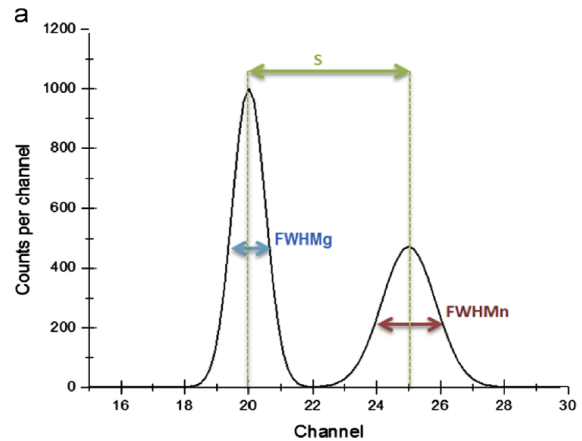
شکل (۸): طیف ارتفاع پالس نمونه های ۱۵% PS-PPO.

PS-N-PPO ۱۵% و UPS-۸۹ به وسیله چشمه ^{60}Co .

در جدول ۲ کانال لبه کمپتون نمونه ها در طیف ارتفاع پالس برای چشمه های ^{137}Cs و ^{60}Co آورده شده است.

نوترون تقسیم بر تعداد شمارش های دره بین دو قله، سنجدیده می شود [۱۹].

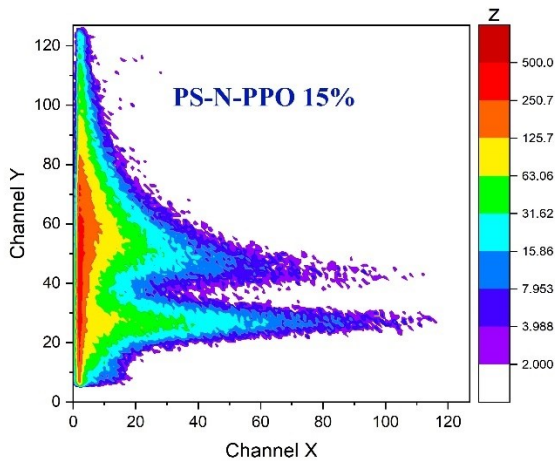
در شکل ۶ پارامترهای FOM و نسبت قله به دره نشان داده شده است که S، فاصله بین قله های نوترون و گاما، FWHMg پهنای نیم ارتفاع بیشینه قله گاما و FWHMn پهنای نیم ارتفاع بیشینه قله نوترون است [۱۹]. افزایش هر کدام از پارامترهای FOM و نسبت قله به دره، نشان دهنده افزایش کیفیت در جداسازی شکل پالس است.



شکل (۹): پارامترهای تشخیص (a) FOM و (b) نسبت قله به دره [۱۹].

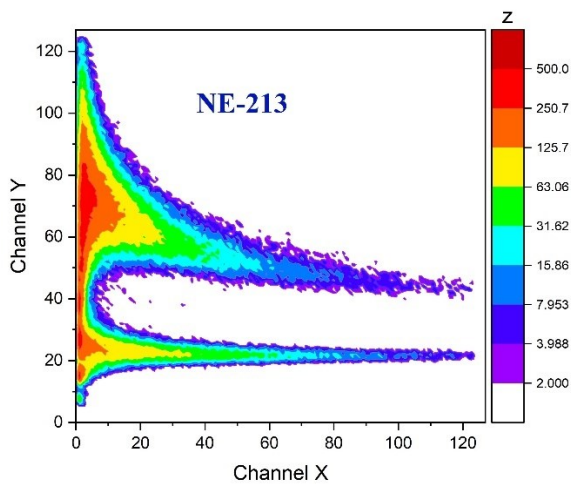
۳. نتایج

شکل های ۷ و ۸ طیف ارتفاع پالس سوسوزن های پلاستیکی ساخته شده و UPS-۸۹ را برای چشمه های ^{137}Cs و ^{60}Co نشان



شکل (۱۰): نمودار ۳ بعدی جداسازی نوترون-گاما برای نمونه

سوسوزن پلاستیک ۱۵% PS-N-PPO



شکل (۱۱): نمودار ۳ بعدی جداسازی نوترون-گاما برای سوسوزن مایع

NE-۲۱۳

در نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰، جداسازی پرتوهای گاما از نوترون به وضوح دیده می‌شود. جدول ۳ مقادیر FOM و نسبت قله به دره را برای نمونه‌های ۱۵% PS-PPO، ۱۵% PS-N-PPO و سوسوزن مایع NE-۲۱۳ نشان می‌دهد.

جدول (۳): نسبت FOM و قله به دره در تمایز نوترون-گاما برای

نمونه‌های ۱۵% PS-PPO و ۱۵% PS-N-PPO

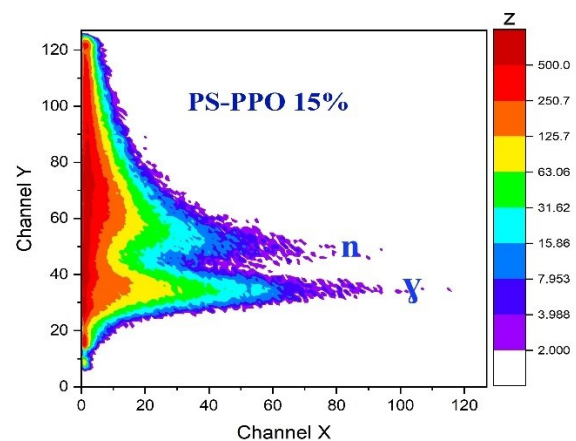
Peak-to-Valley Bias 1000 keVee	FOM Bias 1000 keVee	نام نمونه
۴/۱۸±۰/۰۶۴	۰/۹۱±۰/۰۵۴	PS - PPO ۱۵%
۸/۷۱±۰/۱۳۱	۱/۰۵±۰/۰۵۴	PS-N-PPO ۱۵%
۱۰۰/۴۰±۰/۳۰۲	۱/۸۸±۰/۰۳۹	NE-۲۱۳

جدول (۲): کانال‌های لبه کمپتون مربوط به طیف ارتفاع پالس نمونه‌ها.

نام نمونه	شماره کانال ^{۱۳۷} Cs	شماره کانال ^{۶۰} Co
PS - PPO ۱۵%	۸۸	۱۸۴
PS-N-PPO ۱۵%	۹۳	۱۸۹
UPS-۸۹	۶۴	۱۳۵

همان‌طور که در نمودار شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، افزودن نفتالن به ترکیب باعث افزایش بهره نوری سوسوزن پلاستیکی شده که این میزان افزایش بر اساس نتایج در جدول ۲ به ترتیب برابر ۵/۷ و ۲/۷ درصد است. بهره نوری نمونه‌های ساخته شده، با توجه به درصد بالای PPO، بالاتر از بهره نوری سوسوزن پلاستیک تجاری UPS-۸۹ است.

شکل‌های ۹ و ۱۰ جداسازی نوترون-گامای سوسوزن‌های پلاستیکی ۱۵% PS-PPO و ۱۵% PS-N-PPO را در بایاس صفر نشان می‌دهد. شکل ۱۱ جداسازی نوترون-گامای سوسوزن مایع NE-۲۱۳ را نشان می‌دهد. محور X انرژی (دامنه پالس‌ها)، محور Y زمان (زمان فروافت پالس‌ها) و محور سوم، رنگ‌ها، شمارش (count) را نشان می‌دهد.



شکل (۹): نمودار ۳ بعدی جداسازی نوترون-گاما برای نمونه سوسوزن

پلاستیک ۱۵% PS-PPO

که با افزودن آن به ترکیب سوسوزنی و افزایش حلقه‌های بنزنی امکانی برای افزایش جداسازی شکل پالس را فراهم می‌کند. مقادیر محاسبه شده‌ی FOM و نسبت قله به دره در جدول ۳ نشان داد که برای ۱۵ درصد وزنی از PPO، افزودن ۴ درصد نفتالن نسبت FOM را ۱۵ درصد افزایش داده و نسبت قله به دره را بیش‌تر از ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد (نسبت قله به دره تقریباً دو برابر شده است). این نتایج نشان دهنده اثر نفتالن بر افزایش خاصیت جداسازی پرتوهای گاما و نوترون است. طیف ارتفاع پالس نمونه‌های ساخته شده به‌وسیله چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داد که وجود نفتالن در ترکیب سوسوزنی آشکارساز، علاوه بر افزایش خاصیت PSD، باعث افزایش بهره نوری نمونه سوسوزن پلاستیک شده است. نتایج، کیفیت جداسازی مناسبی را نشان می‌دهد اما همچنان نسبت به سوسوزن مایع NE-۲۱۳ میزان جداسازی بسیار کمتر بوده و نیاز به بهینه‌سازی دارد.

مقادیر به‌دست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد که افزودن ۴ درصد وزنی نفتالن به ترکیبات در ساخت سوسوزن پلاستیک باعث افزایش FOM و افزایش نسبت قله به دره می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه‌های سوسوزن پلاستیک با استفاده از روش پلیمریزاسیون حرارتی بدون آغازگر ساخته شد. استفاده از کوره تحت گاز امکان ساخت سوسوزن پلاستیکی در ابعاد بزرگ را فراهم می‌کند. اعمال پروفایل دمایی مناسب مانع اثر ژل شدگی در ترکیبات می‌شود که در این پژوهش بهینه پروفایل دمایی تعیین و اعمال گردید. افزایش درصد سوسوزن اولیه امکان جداسازی پرتوهای گاما و نوترون را فراهم می‌کند. در این تحقیق برای نمونه شامل ۱۵ درصد وزنی PPO جداسازی شکل پالس دیده شد. نفتالن دارای ساختار گروه‌های آروماتیک بوده

۵. مراجع

1. P. Moskal, E. L. Stepien. Prospects and clinical perspectives of total-body PET imaging using plastic scintillators. *PET Clin.* 15 (2020) 439–452.
2. R. Hoischen, S. Pietri, D. Rudolph, W. Prokopowicz, H. Schaffner, S. Emde, P. Golubev, A. Wendt, N. Kurz, H. J. Wollersheim, J. Gerl. Fast timing with plastic scintillators for in-beam heavy-ion spectroscopy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 654 (2011) 354–360.
3. M. Hamel. *Plastic Scintillators*. Springer, Switzerland, 2021.
4. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, Michigan, 2010.
5. M. Hamel, G. Leboutellier. Attempting to prepare a plastic scintillator from a biobased polymer. *Appl. Polymer Sci.* 137 (121) (2020) 48724.
6. M. Hamel, G. g. Turk, A. Rousseau, S. Darbon, C. Reverdin, S. Normand. Preparation and characterization of highly lead-loaded red plastic scintillators under low energy x-rays. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 660 (2011) 57–63.
7. N. J. Cherepy, R. D. Sanner, P. R. Beck E. L. Swanberg, T. M. Tillotson, S. A. Payne, Bismuth- and lithium-loaded plastic scintillators for gamma and neutron detection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 778 (2015) 126–132.
8. I. A. Pawelczak, A. M. Glenn, H. P. Martinez, M. L. Carman, N. P. Zaitseva, S. A. Payne. Boron-loaded plastic scintillator with neutron- γ pulse shape discrimination capability. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* (2014) 62–69.
9. D. M. Poehlmann, D. Barker, H. Chagani, P. Cushman, G. Heuermann, A. Medved, H. E. Rogers and R. Schmitz. Characterization of gadolinium-loaded plastic scintillator for use as a neutron veto. *physics.ins-det* (2019).
10. E. Montbarbona, Z. Zhangb, A. Grabowskia, R. Woa, D. Tromsona, C. Dehe-Pittancea, R. B. Pansub, G. H. V. Bertrand, M. Hamel. The role of the secondary fluorophore in ternary plastic scintillators aiming at discriminating fast neutrons from gamma-rays. *J. Luminescence* 213 (2019) 67–74.
11. N. Zaitseva, B. L. Rupert, I. Pawetczak, A. Glenn, H. P. Martinez, L. Carman, M. Faust, N. Cherepy, S. Payne. Plastic scintillators with efficient

- neutron/gamma pulse shape discrimination. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 668 (2012) 88–93.
12. N. Zaitseva, A. Glenn, H. P. Martinez, L. Carman, I. Pawelczak, M. Faust, S. Payne. Pulse shape discrimination with lithium-containing organic scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 729 (2013) 747–754.
 13. P. Blanc, M. Hamel, C. Dehé-Pittance, L. Rocha, R. B. Pansu. Neutron/gamma pulse shape discrimination in plastic scintillators: Preparation and characterization of various compositions. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 750 (2014) 1–11.
 14. G. H. V. Bertrand, M. Hamel, F. Sguerra. Current Status on Plastic Scintillators Modifications. *Chem. A European J.* 20 (2014) 15660–15685.
 15. L. Younesi, M. Salehi-Barough, Sh. Ahmadi, V. Esmaili-Sani. The effect of PPO concentration on the scintillation properties of a polystyrene based plastic scintillator. *J. Instrumentation* 19 (01) (2024) T01001.
 16. L. Younesi, M. Salehi-Barough, Sh. Ahmadi, E. Bayat. Fabricating plastic scintillator based on methyl styrene with the gamma and neutron ability to discrimination. *Iran*, Patent Number 110660, 2024.
 17. I. L. H. Knox, T. G. Miller. A technique for Determining bias settings for organic scintillators. *Nucl. Instrum. Methods A* 101 (1972) 519–525.
 18. E. Bayat, N. Divani-Vais, M. M. Firoozabadi, N. Ghal-Eh. A comparative study on neutron-gamma discrimination with NE213 and UGLLT scintillators using zero-crossing method. *Radiat. Phys. Chem.* 81 (2012) 217–220.
 19. S. Zare, N. Ghal-Eh, E. Bayat. On timing response improvement of an NE213 scintillator attached to two PMTs. *Radiat. Phys. Chem.* 90 (2013) 6–10.