

## مقایسه عملکرد CRY-018 و CRY-019 به‌عنوان دو سوسوزن نوین در اسپکت بالینی با

## میدان دید کوچک

## INC29-1051

مریم ساعد<sup>۱</sup>، علیرضا صدرممتاز<sup>۱</sup>، حجت‌اله ماهانی<sup>۲</sup>

۱. دانشکده فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، صندوق پستی: ۴۱۶۳۵-۱۹۱۴ رشت - ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵ تهران - ایران

## چکیده:

انتخاب آشکارساز تابش در عملکرد دستگاه‌های اسپکت از اهمیت بسزایی برخوردار است. به دلیل بهره‌مندی اسپکت از کولیماسیون فیزیکی و به سبب آن کاهش چشمگیر حساسیت دستگاه، استفاده از آشکارسازهای نوین ضروری است. در این مطالعه با مدل‌سازی و شبیه‌سازی مونت‌کارلوی GATE، عملکرد دو سوسوزن نوین CRY-018 و CRY-019 مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با دو بلور رایج NaI(Tl) و CsI(Tl) مقایسه شده است. حساسیت، قدرت تفکیک مکانی و کسر پراکندگی برای همه سوسوزن‌های مورد بحث، محاسبه شدند. یافته‌ها نشان می‌دهند که CRY-018 عملکردی تقریباً مشابه با NaI(Tl) دارد. در مقابل، CRY-019 در مقایسه با NaI(Tl) از ۱۰٪ حساسیت بیشتر و در حدود ۲۷٪ بهبود در قدرت تفکیک مکانی برخوردار است. همچنین، قدرت تفکیک مکانی در این سوسوزن برابر با ۱/۴۶ میلی‌متر بود که ۱۲/۳٪ از CsI(Tl)، ۲۷۳۹٪ از NaI(Tl) و ۲۲/۶۰٪ از CRY-018 بهتر است. بنابراین، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که CRY-019 یک جایگزین نویدبخش برای سوسوزن‌های مرسوم در اسپکت قلمداد می‌شود که از قیمت مشابهی نیز برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: سوسوزن، GATE، اسپکت، CRY-018، CRY-019

**Performance comparison of CRY-018 and CRY-019 as two novel scintillators for clinical SPECT with a small field of view**Maryam Saed<sup>1</sup>, Alireza Sadremomtaz<sup>1</sup>, Hojjat Mahani<sup>2\*</sup>

1. Department of Physics, Faculty of Science, University of Guilan, P.O. Box: 1914-41635, Rasht, Iran.

2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 14396-836, Tehran, Iran.

**Abstract:**

The choice of radiation detector is of great importance in the performance of SPECT scanners. Due to utilizing physical collimation and thereby significantly reducing the system sensitivity, exploiting the new radiation detectors is essential. In this study, the performance of two novel CRY-018 and CRY-019 scintillators has been investigated and compared with conventional NaI(Tl) and CsI(Tl) detectors using GATE Monte Carlo modeling and simulation. Sensitivity, spatial resolution, and scatter fraction were calculated for all investigated scintillators. The findings show that CRY-018 performs similarly to NaI(Tl) in all metrics. In contrast, CRY-019 offers 10% higher sensitivity and approximately 27% superior spatial resolution compared with the NaI(Tl). CRY-019 also provides 1.46 mm FWHM spatial resolution which is 12.3%, 27.39%, and 22.60% higher than that of CsI(Tl), NaI(Tl), and CRY-018, respectively. Therefore, it can be concluded that CRY-019 is a promising alternative to traditional scintillators used in SPECT with a comparable price.

**Keywords:** Scintillator, GATE, SPECT, CRY-018, CRY-019

## ۱. مقدمه

مقطع‌نگاری کامپیوتری گسیل تک فوتونی (اسپکت) یک روش تصویربرداری هسته‌ای است که در آن یک ردیاب پرتوزا به بیمار تزریق می‌شود. به‌هنگام واپاشی این ردیاب، فوتون‌ها در همه جهات گسیل شده و در پی آن از بدن خارج و آشکار می‌شوند. آشکارساز به‌همراه کولیماتور دو جزء اصلی یک دستگاه اسپکت هستند که بر عملکرد دستگاه بسیار تأثیرگذارند. تا سال ۲۰۰۴، دستگاه‌های اسپکت عمدتاً شامل بلورهای CsI(Tl) و NaI(Tl) بود که هر دو دارای بازده آشکارسازی مناسب، رطوبت‌گیری بالا (NaI(Tl)) و کم (CsI(Tl)) و زمان واپاشی آهسته می‌باشند. اگرچه این دو بلور دارای بازده نوری بالایی هستند، اما قدرت تفکیک انرژی مناسبی ندارند. در طول ۱۰ سال گذشته، تعداد زیادی بلورهای سوسوزن جدید برای کاربردهای اسپکت معرفی شده‌اند [۴-۱]. از بین این بلورهای سوسوزن جدید می‌توان به CRY-018 و 019 اشاره کرد، که توسط شرکت Crytur معرفی شده است [۵]. سوسوزن CRY-018 ترکیبی از سیلیکون (Si) و ایتربوم (Y) و همچنین CRY-019 ترکیبی از سیلیکون (Si) و لوتسیوم (Lu) است. این مواد سوسوزن ماهیت رطوبت‌گیری ندارند. به‌عبارت‌دیگر نیاز به پوشش مهر و موم شده‌ای که بر روی تفکیک مکانی تأثیر بگذارد، ندارند. این دو بلور دارای ضریب شکست کم، بازده نوری بالا و چگالی قابل قبول می‌باشند. همچنین زمان واپاشی سریع، این بلورها را جایگزین ایده‌آل برای آشکارسازهای کوچک کرده و امکان جفت شدن با انواع مختلفی از PMT‌ها را فراهم می‌کند. تفاوت اصلی بین این دو بلور میزان درصد لوتسیوم در CRY-019 است که باعث افزایش چگالی بلور ( $\frac{g}{cm^3}$ ) ۷/۱ برای CRY-019 در مقابل  $\frac{g}{cm^3}$  ۴/۵۳ برای CRY-018 و بهبود حساسیت می‌شود. اما تابش زمینه به‌دلیل درصد بالای لوتسیوم در بلور بر روی پخش نور در PMT تأثیر گذاشته و بازده نوری را کاهش دهد ( $\frac{ph}{keV}$  ۳۰ برای CRY-018 و  $\frac{ph}{keV}$  ۲۲ برای CRY-019). با این حال، پانی و همکارانش [۶] نشان دادند که CRY-019 از میان بلورهای سوسوزن بر پایه لوتسیوم بهترین قدرت تفکیک انرژی و یک بازده تشخیص ذاتی خیلی خوب در رنج انرژی اسپکت فراهم می‌کند. ماساری و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۹، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به بررسی بلور CRY-018 به‌عنوان آشکارساز در یک سیستم اسپکت حیوانی کوچک پرداختند. آن‌ها نشان دادند که سوسوزن CRY-018 یک جایگزین خوب برای آشکارسازهای کوچک در اهداف تصویربرداری از حیوانات کوچک است.

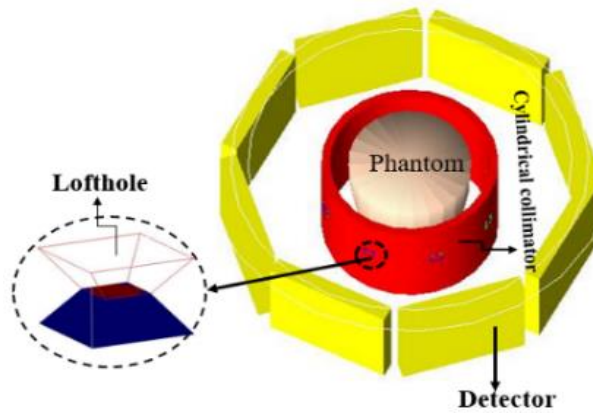
با وجود اینکه دو سوسوزن CRY-018 و CRY-019 پیش‌تر توسط برخی پژوهشگران معرفی شده و نظر به عملکرد قابل قبول نتایج اولیه آن‌ها، همچنان ادبیات این موضوع غنی نیست. برخی پارامترهای کلیدی دیگر از قبیل کسر پراکندگی و قدرت تفکیک مکانی آن‌ها همچنان مطالعه نشده است. این دو پارامتر در کیفیت تصاویر اسپکت بسیار مؤثر بوده و کمی‌سازی آن‌ها زمینه را برای اصلاح و یا کاهش آرتیفکت‌های مرتبط فراهم می‌سازد. بنابراین، هدف نهایی این پژوهش کمی‌سازی پارامترهای کلیدی این دو سوسوزن نوین و مقایسه آن‌ها با بلورهای رایج NaI و CsI در کاربردهای اسپکت بالینی با میدان دید کوچک از قبیل پستان یا تیروئید از طریق شبیه‌سازی GATE [۸] است.

## ۲. روش کار

## ۲.۱. توصیف دستگاه اسپکت با میدان دید کوچک

برای شبیه‌سازی یک اسپکت با میدان دید کوچک، مدل دستگاهی که پیش‌تر توسط نویسندگان طراحی شده است [۹]، مورد استفاده قرار گرفت. در این دستگاه، بر روی صفحه استوانه‌ای کولیماتور از جنس تنگستن و با ضخامت ۵ میلی‌متر، ۸ روزنه لافتهول در یک ردیف مرتب شده‌اند. همه روزنه‌ها به‌سمت مرکز میدان دید متمرکز می‌شوند. قطر روزنه‌ها ۳/۰۵ میلی‌متر و زاویه پذیرش آن‌ها ۷۵ درجه می‌باشد. لافتهول‌ها دارای روزنه دایره‌ای شکل (شبیه به پین‌هول) اما دهانه ورودی و خروجی مربعی شکل می‌باشند که منجر به تشکیل پروجکشن‌های مربعی و پوشش‌دهی بهتر سطح آشکارساز می‌شود. بلورهای NaI (Tl) به‌عنوان آشکارساز با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به‌صورت ۸ ماژول مربعی دور تا دور اسکنر چیده شده‌اند. ابعاد هر ماژول  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  بوده و هر ماژول، پروجکشن مربوط به روزنه روبه‌روی خود را تصویر می‌کند. میدان دید اسکنر در راستای عرضی و محوری ۷۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که برای تصویربرداری

اسپکت از یک پستان متوسط با حجمی در حدود ۴۰۰ میلی‌لیتر مناسب است. شکل ۱، طرح‌واره‌ای از اسکنر اسپکت پستان را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول ۱ جزئیات هندسه اسکنر اسپکت خلاصه شده است.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از هندسه اسپکت مخصوص پستان شامل فانتوم، کولیماتور استوانه‌ای چند-لافت‌هول (قرمز) و ماژول‌های آشکارساز NaI(Tl) (زرد).

جدول ۱. مشخصات فنی اسپکت مخصوص پستان.

پارامتر	مقدار
ضخامت و جنس کولیماتور	۵ mm، تنگستن
شعاع کولیماتور	۷۵ mm
قطر لافت‌هول	۳/۰۵ mm
شعاع آشکارساز	۹۵ mm
تعداد ماژول‌های آشکارسازی	۸
جنس و ضخامت آشکارساز	۱۰ mm NaI(Tl)

## ۲.۲. شبیه‌سازی مونت کارلو

ابزار شبیه‌سازی GATE که به زبان C++ نوشته شده، مبتنی بر پایگاه داده و کتابخانه‌های GEANT4 است [۸]. به دلیل قابلیت‌هایی مانند مدل‌سازی فرآیندهای وابسته به زمان از قبیل حرکت هندسه و یا واپاشی چشمه، این شبیه‌ساز تبدیل به یکی از محبوب‌ترین ابزارها در شبیه‌سازی دستگاه‌های تصویربرداری، در مقایسه با سایر کدهای اختصاصی شده است. در این کار، از GATE ورژن ۸.۲ برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی اسکنر استفاده شد. در تمام شبیه‌سازی‌ها، فرآیندهای فیزیکی شامل اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و ریلی برای پرتوهای گاما و یونیزاسیون، اثر برمزشترالانگ و پراکندگی چندگانه برای الکترون‌ها در نظر گرفته شد. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از شبیه‌ساز GATE اسکنر اسپکت مخصوص پستان را مدل‌سازی کرده (شکل ۱)، سپس عملکرد سیستم، با جایگزینی ماژول‌های بلور CsI(Tl)، CRY-018 و CRY-019 به جای بلور سوسوزن NaI(Tl) با ضخامت و ابعاد یکسان مورد بررسی قرار گرفت. این مقایسه با یک چشمه نقطه‌ای Tc-99m در هوا با فعالیت پرتوزایی ۲MBq در مرکز میدان دید انجام شد. شبیه‌سازی‌ها در یک دوره زمانی ۳۰۰ ثانیه بدون در نظر گرفتن پنجره انرژی اجرا گردید. ویژگی‌های فیزیکی بلورهای سوسوزن در جدول ۲ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی بلورهای سوسوزن مورد استفاده در این پژوهش.

پارامتر	CsI(Tl)	NaI(Tl)	CRY-018 [۶و۵]	CRY-019 [۱۰و۵]
چگالی ( $\frac{g}{cm^3}$ )	۴/۵۱	۳/۶۷	۴/۵۴	۷/۱
زمان واپاشی (ns)	۱۰۰۰	۲۳۰	۴۵	۴۶

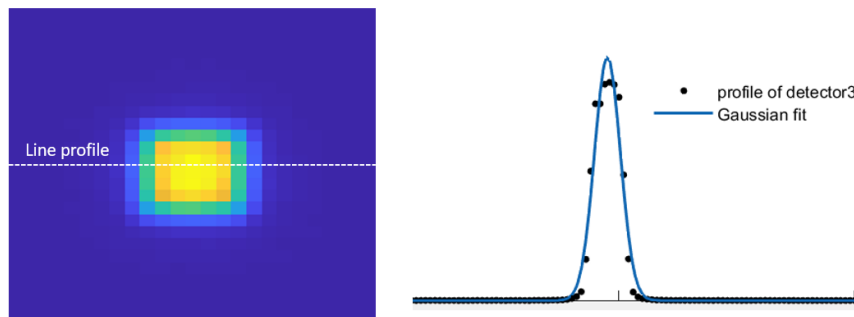
۲۲	۳۰	۳۸	۵۲	بازده نوری (فوتون/keV)
۴۲۰	۴۲۵	۴۱۵	۵۵۰	طول موج گسیلی بیشینه (nm)
خیر	خیر	بلی (بالا)	بلی (کم)	جاذب رطوبت

### ۳. نتایج و بحث

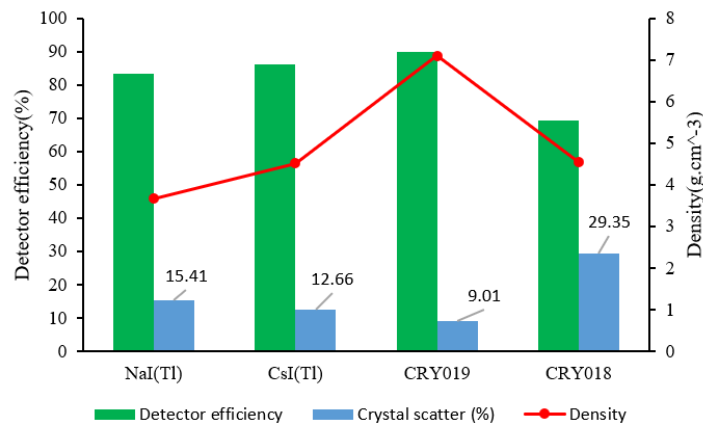
سه بلور سوسوزن یکپارچه‌ی CsI(Tl)، CRY-018، CRY-019 با بلور سوسوزن NaI(Tl) از نظر حساسیت، کسر پراکندگی در بلور و قدرت تفکیک مکانی مقایسه شدند. در جدول ۳، حساسیت، کسر پراکندگی و قدرت تفکیک مکانی در هر بلور، برای یک چشمه نقطه‌ای Tc-99m در هوا در مرکز میدان دید، ارائه شده است. در شکل ۲ پروجکشن به‌دست آمده از یکی از آشکارسازها به‌همراه پروفایل مربوطه در بلور CRY-018 آورده شده است. شکل ۳، بازده آشکارسازی و درصد فوتون‌های پراکنده‌شده در هر بلور را نشان می‌دهد.

جدول ۳. حساسیت، قدرت تفکیک مکانی و کسر پراکندگی در بلورهای سوسوزن مختلف در مرکز میدان دید و بدون پنجره انرژی.

نام بلور	حساسیت ( $\frac{cps}{kBq}$ )	قدرت تفکیک مکانی (mm)	کسر پراکندگی در بلور (%)
CRY-018	۲/۱۸	۱/۷۹	۲۹/۳۵
CRY-019	۲/۷۵	۱/۴۶	۹/۰۱
CsI(Tl)	۲/۶۷	۱/۶۴	۱۲/۶۶
NaI(Tl)	۲/۵۰	۱/۸۶	۱۵/۴۱



شکل ۲. (چپ): تصویر بزرگنمایی شده از پروجکشن حاصل از بلور CRY-018. (راست): پروفایل مربوط به پروجکشن که با یک تابع گاوسین برازش شده است.



شکل ۳. مقایسه بازده آشکارسازی و درصد پراکندگی در بلورهای مختلف.

در اسپکت پستان با کولیماتور چند-لافت‌هول، بلورهای جدید CRY-018 (بر پایه ایتريوم) و CRY-019 (بر پایه لوتسیوم) [۵] با دو بلور متداول در دوربین گاما یعنی NaI(Tl) و CsI(Tl) مقایسه شدند. سوسوزن CRY-018 عملکرد نسبتاً ضعیفی در مقایسه با CsI(Tl) و NaI(Tl) داشت، زیرا عدد اتمی مؤثر این بلور کم است [۱۲، ۱۰] و این عدد اتمی مؤثر کم، سبب افزایش پراکندگی کامپتون شده که تخریب کنتراست تصویر را به دنبال دارد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، پراکندگی کامپتون در CRY-018 حدود ۲۹٪ است که بیشترین مقدار پراکندگی نسبت به بلورهای دیگر است. با توجه به شکل ۳، بازده آشکارسازی در CRY-018 نزدیک به بازده آشکارسازی NaI(Tl) است که می‌توان با افزایش ضخامت بلور آن را افزایش داد. با توجه به نزدیک بودن بازده فوتون نوری این بلور به NaI(Tl)، بر طبق انتظار، قدرت تفکیک مکانی در این دو بلور تقریباً مشابه (۱/۷۹ میلی‌متر برای CRY-018 و ۱/۸۶ میلی‌متر برای NaI(Tl)) می‌باشد. تفاوت ۳ درصدی در قدرت تفکیک به دلیل چگالی و ضریب تضعیف خطی پایین در NaI(Tl) است.

سوسوزن CRY-019 یک جایگزین نویدبخش برای تصویربرداری اسپکت است. این بلور در تمامی موارد، شامل قدرت تفکیک مکانی، حساسیت و کسر پراکندگی بهترین عملکرد را نشان می‌دهد که به دلیل چگالی و عدد اتمی مؤثر بالا در آن می‌باشد. با توجه به جدول ۳، بیشترین حساسیت سیستم اسپکت پستان با بلور نوین CRY-019 به دست می‌آید. حساسیت این بلور برابر با  $2/75 \frac{cps}{kBq}$  بود که در مقایسه با بلورهای CsI(Tl)، NaI(Tl) و CRY-018 به ترتیب در حدود ۳٪، ۱۰٪ و ۲۱٪ حساسیت بیشتری کسب می‌کند. علاوه بر این، بهترین قدرت تفکیک مکانی نیز با استفاده از بلور CRY-019 به دست آمد. قدرت تفکیک مکانی در این بلور برابر با ۱/۴۶ میلی‌متر بود که در مقایسه با بلورهای دیگر ۱۲٪/۳ از بلور CsI(Tl)، ۲۷٪/۳۹ از بلور NaI(Tl) و ۲۲٪/۶۰ از سوسوزن CRY-018 کمتر است. این اختلاف به دلیل چگالی بالای CRY-019 است. پراکندگی کامپتون ۹٪ در بلور CRY-019، نوید بازده آشکارسازی بالا (در حدود ۹۰٪) را می‌دهد. با توجه به اینکه، سوسوزن CRY-019 مبتنی بر لوتسیوم است، یکی از مشکلات این بلورها وجود فعالیت زمینه به دلیل پرتو زایی طبیعی لوتسیوم-۱۷۶ می‌باشد. با کاهش ضخامت بلور و در نظر گرفتن یک ناحیه موردنظر کوچک، تأثیر فعالیت زمینه بر روی عملکرد بلور ناچیز می‌شود. هرچند، فعالیت زمینه در انرژی‌های کمتر از ۱۷۰ کیلو الکترون ولت، سهم کمی دارد. سهم فعالیت زمینه‌ی قابل تشخیص در حدود ۲ تا ۰/۳۲۵ کیلو بکرل می‌باشد [۱۲].

#### ۴. نتیجه‌گیری

سوسوزن CRY-019 یک بلور جدید بوده که عملکرد قابل‌قبولی نسبت به بلورهای رایج در دوربین گاما از قبیل NaI(Tl) و CsI(Tl) دارد. این بلور به دلیل مشخصات نوری، چگالی و همچنین عدد اتمی بالا می‌تواند یک جایگزین مناسب برای آشکارسازهای مرسوم در سیستم‌های اسپکت بالینی با میدان دید کوچک قلمداد شود.

#### ۵. مراجع

1. D'ambrosio C. et al. "Study of LaCl<sub>3</sub>:Ce light yield proportionality with a hybrid photomultiplier tube". *Appl. Phys. Lett.* 2006, **556**:187-191.
2. Cherepy N.J. et al. "Strontium and barium iodide high light yield scintillators". *Appl. Phys. Lett.* 2008, **92**:083508.
3. Sibczynski P. et al. "Characterization of GAGG:Ce scintillators with various Al-to-Ga ratio". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2015, **772**:112-117.
4. Lecoq P. "Development of new scintillators for medical applications". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2016, **809**:130-139.
5. Crytur Co., available at: <http://www.crytur.cz>
6. Pani R. et al. "Investigation of radiation detection properties of CRY-018 and CRY-019 scintillators for medical imaging". *J. Instrum.* 2016, **11**:P09010.



7. Massari R., D'elia A., Soluri A. "Preliminary results on a small animal SPECT system based on H13700 PSMPT coupled with CRY018 array". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2019, **940**:296-301.
8. OpenGATE Collaboration, available at <http://www.opengatecollaboration.org>
9. Saed M. et al. "Design and optimization of a breast-dedicated SPECT scanner with multi-lofthole collimation". *J. Instrum.* 2022, **17**:P01006.
10. Polito C. et al. "Imaging characterization of a new gamma ray detector based on CRY019 scintillation crystal for PET and SPECT applications". *J. Instrum.* 2017, **12**:C02034.
11. Polito C. et al. "Imaging performances of a small FoV gamma camera based on CRY018 scintillation crystal". *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2018, **912**:33-35.
12. Pellegrini R. et al. "Imaging performance dependence on crystal absorption properties: The CRY018 and CRY019 comparison". *J. Instrum.* 2020, **15**:C05076.