

## طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد یک آشکارساز حساس به مکان برای مقطع‌نگاری رایانه‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا

حجت‌اله ماهانی\*، علی طاهری، مجتبی عسکری، سعید حیدری

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

### چکیده:

اخیراً، استفاده از آشکارسازهای پیکسل‌بندی شده در تصویربرداری مقطع‌نگاری رایانه‌ای رو به گسترش بوده و توجهات زیادی را به خود معطوف نموده است. در این مطالعه، اقدام به طراحی و ساخت یک آشکارساز حساس به مکان برای مقاصد مقطع‌نگاری با پرتوهای گاما شده است. از بلورهای پیکسل‌بندی شده LYSO به همراه خوانش‌گرهای PSPMT به عنوان مجموعه آشکارساز استفاده شده و ۴ ماژول (به همراه یک ماژول پشتیبان) ساخته شده است. نرم‌افزار پردازش و تحلیل داده‌ها نیز در محیط برنامه‌نویسی MATLAB تهیه شده است. نتایج نشان دادند که آشکارساز طراحی شده از عملکرد قابل قبولی برخوردار بوده و مقادیر نسبت قله به دره (PVR) در محدوده ۳ تا ۴ قرار دارند. مقدار بهینه عرض پنجره انرژی برای حذف فوتون‌های پراکنده نیز ۲۰٪ تعیین شد. قدرت تفکیک مکانی آشکارساز نیز برابر با ۲/۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. آشکارساز ساخته شده قابلیت استفاده در مقطع‌نگاری رایانه‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا را داراست.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز، حساس به مکان، مقطع‌نگاری، قدرت تفکیک مکانی بالا، بلور LYSO

## Design, development and performance evaluation of a position-sensitive detector for high-resolution computed tomography

Hojjat Mahani\*, Ali Taheri, Mojtaba Askari, Saeed Heidary

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. BOX: 14395-836, Tehran, Iran.

### Abstract:

Recently, pixelated detectors find various applications in computed tomography (CT) imaging and have attracted a lot of attention. In this study, a position-sensitive detector for CT imaging with gamma rays is designed and developed. The detector consists of pixelated LYSO crystal coupled with position-sensitive PMT (PSPMT) readout and 4 detection modules (along with a backup one) are constructed. A dedicated software was also developed in the MATLAB programming environment. The results demonstrate acceptable performance of the developed detector and peak-to-valley ratios (PVRs) are between 3 to 4. The 20% energy window width is optimal for removing scattered radiation. The measured spatial resolution of the detector is 2.15 mm. The constructed prototype is capable to be used in high-resolution CT imaging.

**Keywords:** Detector, Position-sensitive, Tomography, High-resolution, LYSO crystal.

\* Email: [hmahani@aeoi.org.ir](mailto:hmahani@aeoi.org.ir)

## ۱. مقدمه

به‌طور کلی، سامانه‌های مقطع‌نگاری رایانه‌ای (CT) از یک مجموعه آشکارساز تابش به‌همراه چشمه مولد پرتو تشکیل شده‌اند. چشمه پرتوزا یا پرتوهای ایکس بوده که توسط لامپ‌های پرتو ایکس تولید می‌شوند و یا چشمه‌های نقطه‌ای گاما می‌باشد [۱-۳]. امروزه، مقطع‌نگاری با قدرت تفکیک مکانی بالا در بسیاری از کاربردها از جمله تصویربرداری از مغزها و سنگ‌ها در مهندسی نفت و زمین‌شناسی، تصویربرداری از حیوانات کوچک در مطالعات پیش‌بالینی و همچنین حشره‌شناسی توسعه یافته و پژوهش‌های متعددی را معطوف خود ساخته‌است [۴]. به‌منظور حصول قدرت تفکیک مکانی بالا در تصویربرداری، نیاز به استفاده از آشکارسازهای پیکسل‌بندی شده امری ضروری به‌نظر می‌رسد. بلورهای NaI، CsI، BGO و همچنین LYSO از جمله آشکارسازهای مطرح در این حوزه هستند. بازدهی آشکارساز، اندازه پیکسل، پاسخ زمانی، قدرت تفکیک انرژی و همچنین قیمت از جمله عوامل تأثیرگذار در انتخاب بلورهای آشکارساز هستند [۵]. در جمهوری اسلامی ایران به‌جز یک شرکت دانش‌بنیان، فناوری تصویربرداری متین بهین نگاره [۶]، تاکنون ساخت آشکارسازهای با قدرت تفکیک مکانی بالا به‌منظور کاربردهای مقطع‌نگاری رایانه‌ای چندان توسعه نیافته است. از این رو، هدف اصلی از انجام این کار طراحی و ساخت نمونه اولیه یک آشکارساز حساس به مکان برای مقاصد مقطع‌نگاری رایانه‌ای با پرتوهای گاما قرار گرفت. در این پژوهش که نتایج آن در ادامه ارائه خواهد شد، از سویی اقدام به راه‌اندازی آشکارساز شده و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. از سوی دیگر، این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از بلورهای LYSO (به‌عنوان بلور با بازده بسیار بالا در مقایسه با آشکارسازهای مرسوم) در کاربردهای مقطع‌نگاری رایانه‌ای را مورد کنکاش و بررسی قرار می‌دهد. در ادامه، ابتدا توصیفی از روش کار شامل طراحی، ساخت و آزمون‌های انجام‌شده بیان می‌شود. در پی آن، نتایج ارزیابی عملکرد آشکارساز حساس به مکان در آزمون‌های مختلف مورد اشاره قرار می‌گیرد. در نهایت، مقایسه‌ای میان عملکرد آشکارساز ساخته‌شده و سایر سامانه‌های تجاری موجود صورت خواهد پذیرفت.

## ۲. روش کار

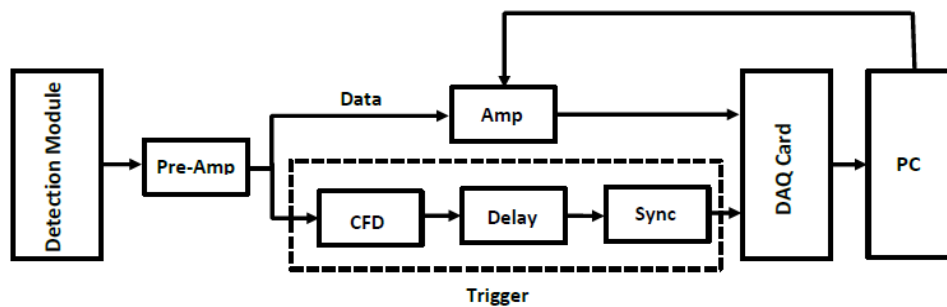
### ۲.۱. طراحی آشکارساز

در این پژوهش استفاده از پرتوهای گاما به‌جای استفاده از لامپ پرتو ایکس رهگیری شد. چراکه از سویی لامپ پرتوایکس از قیمت به‌مراتب بالایی برخوردار بوده و از سوی دیگر چشمه‌های گاما از  $^{99m}\text{Tc}$  و  $^{137}\text{Cs}$  نیز به‌راحتی در دسترس بودند. همانطور که در قسمت مقدمه بیان شد، در این مطالعه از بلورهای پیکسل‌بندی شده LYSO (برای اولین بار در کشور) به‌عنوان آشکارساز استفاده شد. خوانش‌گرهای تکثیرکننده نوری حساس به مکان (PSPMT) ساخت شرکت هاماماتسو ژاپن [۷] نیز با هر بلور کوپل شدند. از جمله موارد بسیار مهم در این کوپل کردن، همخوانی طیف فوتونی خوانش‌گرهای تکثیرکننده نوری با نور خروجی بلور و همچنین اندازه فیزیکی بلور می‌باشد. در فاز طراحی، از ۴ ماژول (به‌همراه یک ماژول پشتیبان) در یک چیدمان خطی (مناسب برای کاربردهای آتی مقطع‌نگاری رایانه‌ای) استفاده شد. برای هر ماژول یک برد الکترونیکی مجزا که وظیفه پیش‌تقویت‌کنندگی سیگنال‌های آشکارساز را دارند، استفاده شد. برخی از مشخصات فنی آشکارساز طراحی شده در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱. مشخصات فنی آشکارساز طراحی شده.

پارامتر	توصیف
ابعاد بلور	$2 \times 2 \times 10 \text{ cm}^3$
آرایه هر بلور	$10 \times 10$
جنس بلور	LYSO
خوانش‌گر	PSPMT

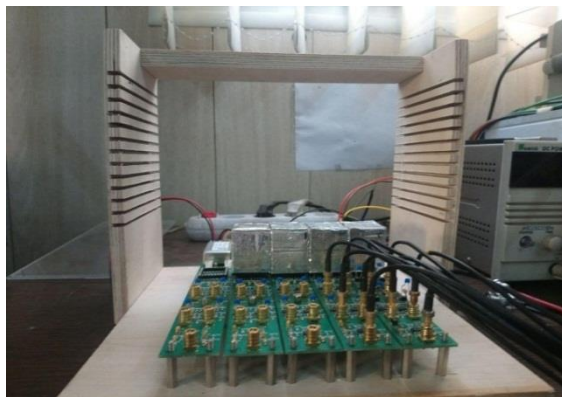
سیگنال‌های خروجی پیش تقویت‌کننده به منظور تقویت نهایی و شکل‌دهی وارد یک ماژول تقویت‌کننده ساخت شرکت CAEN [۸] می‌شوند که بهره تقویت توسط رایانه قابل کنترل است. به منظور خوانش پالس‌های هسته‌ای در مقدار حداکثر خود (قله)، از ماژول تفکیک‌کننده کسر-ثابت (CFD) و همچنین ماژول تأخیر زمانی برای سیگنال‌های استفاده شده. سیگنال‌های دیگر نیز سیگنال‌های آخرین داینود در نظر گرفته شد. در نهایت با در دست داشتن سیگنال‌های  $Y-$ ،  $X+$ ،  $X-$  و  $Y+$  که خروجی تقویت‌کننده هستند، مکان فوتون گامای فرودی در سطح آشکارساز توسط رابطه انگر (Anger) محاسبه و تعیین می‌شود. انرژی فوتون نیز مجموع چهار سیگنال یادشده در نظر گرفته شد. به منظور پردازش و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده، یک نرم‌افزار اختصاصی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نیز توسعه داده شد که کلیه عملیات محاسبه مکان فوتون گامای فرودی، تخمین انرژی فوتون، اعمال پنجره‌های انرژی (به منظور حذف فوتون‌های پراکنده) و سایر موارد را شامل می‌شود. شکل ۱، بلوک دیاگرام کلی آشکارساز حساس به مکان طراحی شده را به تصویر کشیده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام کلی آشکارساز حساس به مکان طراحی شده.

## ۲.۲. ساخت آشکارساز

شکل ۲، نمایی واقعی از آشکارساز ساخته شده را نمایش می‌دهد که شامل ۴ ماژول آشکارسازی و یک ماژول پشتیبان است. همچنین، به منظور دستیابی به فواصل متعدد، دقیق و مشخص جسم و چشمه تا آشکارساز، یک سازه چوبی نیز طراحی و ساخته شد. به منظور تأمین میدان تابشی مناسب برای پوشش کل آشکارسازها، یک کولیماتور پرتو-مخروطی (با زاویه کانونی ۳۷ درجه) از جنس سرب که قابلیت نگهداری چشمه را نیز داشت، نیز ساخته شد (شکل ۲).



شکل ۲. نمایی واقعی از ۴ ماژول اصلی و یک ماژول پشتیبان آشکارساز (شامل بلور LYSO و خوانش گر PSPMT که درون فویل آلومینیومی قرار دارند) (چپ) و کولیماتور پرتو-مخروطی از جنس سرب (راست).

## ۲.۳. آزمون‌های ارزیابی عملکرد

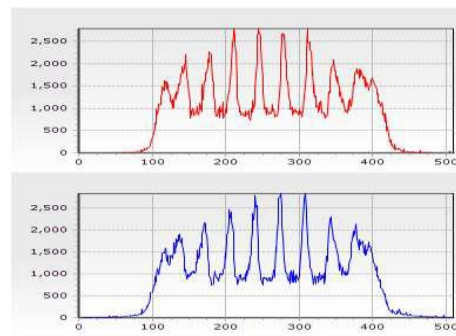
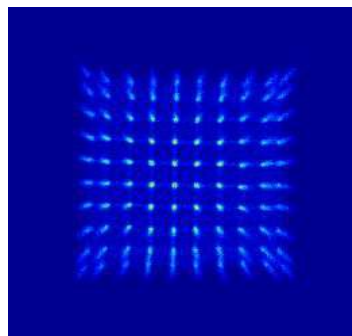
به منظور ارزیابی عملکرد کلی آشکارساز، سه آزمون کلیدی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت: (۱) آزمون شناسایی پیکسل‌های آشکارساز، (۲) آزمون تعیین پنجره انرژی و (۳) آزمون قدرت تفکیک مکانی. این سه آزمون از جمله آزمون‌های مهم برای آشکارسازهای پیکسل‌بندی شده هستند. برای آزمون اول از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  با اکتیویته  $8 \mu\text{Ci}$  و

برای دو آزمون دیگر از چشمه  $^{99m}\text{Tc}$  با اکتیویته ۱۱ mCi استفاده شد. زمان جمع‌آوری داده در هر آزمون به‌گونه‌ای تعیین شد که حداقل ۵ میلیون شمارش ثبت شوند. خطاهای مرتبط با اندازه‌گیری در تمامی آزمون‌ها از چندین مؤلفه تشکیل شده است: (۱) خطای فاصله‌ها (فاصله جسم و چشمه تا آشکارساز) که در مرتبه زیر ۰/۵ میلی‌متر بود، (۲) خطای آماری شمارش‌ها در هر پیکسل آشکارساز که حدوداً برابر با ۰/۹٪ محاسبه شد (وابسته به میزان کل شمارش‌های ثبت‌شده) و (۳) خطای اکتیویته چشمه‌ها که همگی چشمه‌ها به‌صورت کالیبره تحویل گرفته شدند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. آزمون شناسایی پیکسل‌های آشکارساز

شکل ۳ نتایج آزمون شناسایی پیکسل‌های آشکارساز برای ماژول اول (به‌عنوان نمونه) را به‌نمایش گذاشته است. همانطور که مشخص است کلیه ۱۰۰ پیکسل (آرایه  $10 \times 10$ ) ماژول اول به‌درستی شناسایی شده و قابل تفکیک هستند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در لبه‌های ماژول، دامنه قله‌های متناظر با پیکسل‌های کناری مقداری کمتر از اطراف است که اولاً به‌سبب فاصله دورتر آن‌ها از چشمه نقطه‌ای در مرکز بوده و ثانیاً به دلیل سهم سیگنال کمتر خوانش‌گر تکثیرکننده نوری در اطراف ماژول است. برای مقایسه کمی، جدول ۲ مقادیر میانگین و حداکثر نسبت قله به دره (PVR) برای کلیه ماژول‌ها را ارائه می‌دهد. مقدار میانگین PVR در این آشکارساز در محدوده ۳ تا ۴ اندازه‌گیری شد (جدول ۲). در اغلب سامانه‌هایی از این نوع، مقادیر PVR میان ۲ تا ۷ است [۹-۱۱]. بنابراین، آشکارساز ساخته‌شده در مقایسه با سایر نمونه‌های خارجی موجود عملکرد قابل قبولی را به‌نمایش می‌گذارد.



شکل ۳. نقشه دوبعدی شناسایی پیکسل ماژول اول (چپ) به همراه دو پروفایل خطی در راستاهای X و Y (راست).

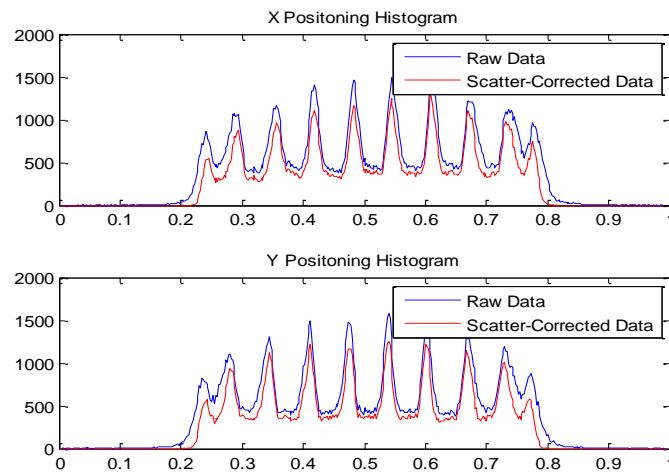
جدول ۲. مقادیر میانگین و حداکثر PVR برای هر ماژول.

شماره ماژول	مقدار میانگین PVR	مقدار حداکثر PVR
اول	۳/۱۲	۳/۶۷
دوم	۳/۰۵	۳/۳۳
سوم	۴/۰۲	۴/۵۸
چهارم	۳/۷۸	۴/۸۰

#### ۲.۳. آزمون تعیین پنجره انرژی

شکل ۴، نتایج اعمال پنجره انرژی ۲۰٪ بر روی داده‌های جمع‌آوری شده را نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه از چشمه تک انرژی گاما استفاده می‌شود، امکان اعمال پنجره انرژی برای حذف فوتون‌های پراکنده‌شده نیز میسر است. پراواضح است که هرچه عرض پنجره انرژی کاهش یابد، فوتون‌های پراکنده کمتری در داده‌های نهایی موجود هستند، اما در عوض تعداد کل شمارش‌ها نیز متعاقباً کاهش می‌یابد. بنابراین، پنجره انرژی ۲۰٪ پنجره انرژی مناسبی برای حذف فوتون‌های

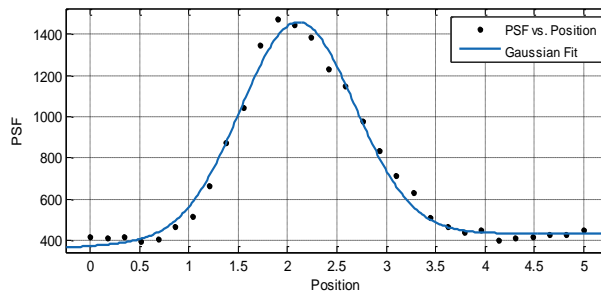
پراکنده شده در میدان دید آشکارساز است. از شکل ۴ همچنین مشخص است که اعمال پنجره انرژی، سبب کاهش پهنای تمامی قله‌ها شده و در نتیجه قدرت تفکیک مکانی آشکارساز نیز اندکی بهبود می‌یابد.



شکل ۴. تأثیر اعمال پنجره انرژی ۲۰٪ بر روی پروفایل‌های شناسایی پیکسل برای ماژول اول در دو راستای X (بالا) و Y (پایین).

### ۳.۳. آزمون قدرت تفکیک مکانی

این آزمون برای ارزیابی قدرت تفکیک مکانی آشکارساز صورت می‌پذیرد که در آن از چشمه  $^{99m}\text{Tc}$  و زمان تصویربرداری ۶۰ ثانیه استفاده شد. شکل ۵ نمایی از تابع نقطه گستر (PSF) با یک چشمه نقطه‌ای گاما در مرکز آشکارساز را به تصویر کشده است. همچنین به منظور تخمین قدرت تفکیک مکانی از یک تابع گاوسی که بر روی PSF برازش شده، استفاده شده است. همانطور که در شکل ۵ پیداست، مقدار پهنای در نصف مقدار بیشینه (FWHM) تابع گاوسی برابر با ۲/۱۵ میلی‌متر است. بنابراین، قدرت تفکیک مکانی آشکارساز برابر با ۲/۱۵ mm خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که در آشکارسازهای پیکسل‌بندی شده با نزدیک شدن به لبه‌های ماژول، قدرت تفکیک مکانی قدری افت پیدا خواهد کرد.



شکل ۵. منحنی PSF آشکارساز و برازش یک منحنی گاوسی به آن برای ارزیابی قدرت تفکیک مکانی آشکارساز.

در نهایت، جدول ۳ مقایسه‌ای میان عملکرد کلی آشکارساز ساخته شده و سایر سامانه‌های تجاری موجود را خلاصه کرده است. در مورد مقدار نسبت‌های قله به دره در بخش ۱.۳ به تفصیل بحث شد. قدرت تفکیک مکانی آشکارساز ساخته شده در مقایسه با سامانه‌های تجاری (Mini-CT) موجود در حدود ۲ برابر بیشتر است که علت آن در وجود دو نکته در آن سامانه‌ها نهفته است: (۱) استفاده از لامپ‌های پرتو ایکس با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا و همچنین (۲) استفاده از آشکارسازهای با اندازه پیکسل بسیار کوچک (کمتر از ۰/۵ میلی‌متر). استفاده از لامپ‌های پرتو ایکس و آشکارسازهای با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا که از قیمت‌های به مراتب بالایی برخوردارند، در این مطالعه چندان عملیاتی و میسر نبود. نظر به استفاده از پرتوهای گامای تک انرژی (در مقابل طیف پرتو ایکس)، مدیریت پرتوهای پراکنده در این پژوهش در سمت نرم‌افزار انجام شد که از سویی دارای قابلیت کنترل بیشتر و از سوی دیگر بدون هزینه جانبی است. در عوض، سامانه‌هایی که از لامپ پرتو ایکس استفاده می‌کنند از سخت‌افزارهای خاصی (گرید و کولیماتور) جهت حذف پرتوهای پراکنده بهره می‌برند.

جدول ۳. مقایسه میان آشکارساز ساخته‌شده و سایر سامانه‌های تجاری (Mini-CT) موجود.

کمیت	آشکارساز ساخته‌شده	سامانه‌های تجاری موجود [۲]
نسبت قله به دره	۳ تا ۴	۲ تا ۷
قدرت تفکیک مکانی	۲/۱۵ mm	کمتر از ۱ mm
مدیریت پرتوهای پراکنده	پنجره انرژی (نرم‌افزاری)	استفاده از گرید/کولیماتور (سخت‌افزاری)

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه اقدام به طراحی و ساخت نمونه اولیه یک آشکارساز حساس به مکان برای مقاصد مقطع‌نگاری رایانه‌ای با پرتوهای گاما شد. همچنین، امکان‌سنجی استفاده از بلورهای LYSO به‌عنوان آشکارساز برای سامانه‌های مقطع‌نگاری رایانه‌ای نیز بررسی و مورد تأیید قرار گرفت. استفاده از آشکارسازهای پیکسل‌بندی شده رهیافت نوینی برای ساخت سامانه‌های تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی بالاست. قدرت تفکیک مکانی در مرتبه ۲ میلی‌متر و همچنین مقادیر PVR در حدود ۳ تا ۴ بیانگر عملکرد قابل قبول این آشکارساز است.

کلیه مراحل طراحی سخت‌افزار و نرم‌افزار آشکارساز در مجموعه پژوهشگاه صورت گرفت و چیدمان هندسی خطی ۴ تایی (به‌همراه یک ماژول پشتیبان) آشکارساز حساس به مکان با موفقیت راه‌اندازی شد. از نتایج آزمون‌های ارزیابی عملکرد مشخص شد که هر ۴ ماژول ساخته‌شده دارای پاسخ مناسب و بهینه‌ای هستند. بنابراین، آشکارساز حساس به مکان ساخته‌شده قابلیت استفاده در سامانه‌های تصویربرداری را داراست. از این رو، مسیر پیش‌رو برای مطالعات آتی، حرکت به سمت طراحی و ساخت نمونه اولیه یک سامانه تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی بالا بر اساس دانش فنی کسب‌شده در این پژوهش خواهد بود.

#### ۵. تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر حسین پوربیگی (پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای) و همچنین شرکت پارس ایزوتوپ به‌جهت در اختیار قراردادن چشمه‌های پرتوزا قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

#### مراجع

1. J.T. Bushberg, J.M. Boone. *The Essential Physics of Medical Imaging*. 3<sup>rd</sup> ed. (Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2011).
2. O. Kaan. *Micro-computed Tomography (micro-CT) in Medicine and Engineering*. 1<sup>st</sup> ed. (Springer, Berlin, 2020).
3. L.R. Ritman. *Current status of developments and applications of micro-CT*, Annu. Rev. Biomed. Eng. **13**, 531 (2011).
4. W. Zhou et al. *A QTC-based signal readout for position-sensitive multi-output detectors*, Nucl. Sci. Tech. **27**, 119 (2016).
5. N. Tsoulfanidis and S. Landsberger, *Measurement and Detection of Radiation*, 4<sup>th</sup> ed. (Taylor and Francis Group, New York, 2015).
6. Behin Negareh Co., <http://behinnegareh.com/>.
7. Hamamatsu Co., [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v3aE.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf).
8. Caen Co., <https://www.caen.it/subfamilies/amplifiers-spectroscopy/>.
9. Z. Gu et al. *A DOI detector with crystal scatter identification capability for high sensitivity and high spatial resolution PET imaging*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **62**, 740 (2015).
10. S.M. Lee et al. *Prototype pre-clinical PET scanner with depth-of-interaction measurements using single-layer crystal array and single-ended readout*, Phys. Med. Biol. **62**, 398 (2017).
11. Z. Gu et al. *Performance evaluation of G8, a high sensitivity benchtop preclinical PET/CT tomograph*, J. Nucl. Med. **60**, 142 (2019).