

بررسی تأثیر پارامترهای رتبه و زاویه در کیفیت تصویر دوربین گاما در فواصل دور

محمد رضا حسینی صفا^۱، حمیدرضا شکور^{۲*}، محمد رضا هاشمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۲- استادیار ۳- دانشجو دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴، انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.4.5.1>

چکیده

تصویربرداری پرتوگاما مهم‌ترین راه برای شناسایی چشمه‌های گاما در موارد امنیتی و ایمنی هسته‌ای، مانند جلوگیری از تروریسم هسته‌ای است. پارامترهای مربوط به ماسک در یک دوربین گاما با حفره کدگذاری شده در هنگام بهینه‌سازی عملکرد آن از ویژگی‌های حیاتی به شمار می‌آیند؛ لذا در این مقاله با استفاده از کد مونت کارلو گیت (Gate) اثر رتبه ماسک در کیفیت تصویر یک دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده MURA با ساختار موزاییکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور یک دوربین گاما با ساختار موردنظر شبیه‌سازی شد و برای ثبت تصویر در فاصله ۳ m از سامانه یک چشمه سزیم-۱۳۷ با فعالیت ۰.۰۲ mCi قرار داده شد. همچنین جنس ماسک سرب در نظر گرفته شد و به منظور مطالعه اثر رتبه ماسک در کیفیت تصویر نهایی، ماسک با سه رتبه ۵، ۱۱ و ۱۹ شبیه‌سازی شد. علاوه جهت ارزیابی کارایی دوربین گاما طراحی شده در میدان دید وسیع، اثر سه رتبه موردنظر در زاویه‌های ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر پس از فرایند رمزگشایی، با اعمال الگوریتم MLEM بازسازی شدند. همچنین کمیت‌های کیفیت تصویر میزان سیگنال به نوفه و خطای زاویه‌ای تصاویر ثبت شده در شرایط مختلف به‌عنوان تابعی از رتبه و زاویه دید مورد مطالعه قرار گرفتند. به منظور پیدا کردن مناسب‌ترین فاصله بین ماسک و آشکارساز در عملکرد بهینه سامانه تصویربرداری دوربین گاما، فاصله ماسک با آشکارساز در سه فاصله ۳، ۶ و ۱۲ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ماسک MURA با رتبه ۱۹ که در فاصله ۳ سانتی‌متری از آشکارساز قرار دارد، در زاویه‌های مورد بررسی دارای نسبت سیگنال به نوفه بیشتر و خطای زاویه‌ای کمتر نسبت به ماسک‌ها با رتبه‌های ۵ و ۱۱ است و لذا برای کاربرد در دوربین‌های گاما با کاربری امنیتی مناسب‌تر است.

کلیدواژه‌ها: دوربین گاما، تصویربرداری هسته‌ای، حفره‌های کدگذاری شده، نرم‌افزار گیت

Investigating the Effect of Rank and Angle Parameters on the Image Quality of the Gamma Camera at Long Distances

M. R. Hosseini Safa¹, H. R. Shakur^{2*}, M. R. Hashemi³

Imam Hossein university, Tehran, Iran

(Received: 2023/09/20, Revised: 2023/12/02, Accepted: 2023/12/25, Published: 2024/01/21)

Abstract

Gamma-ray imaging is the most essential way to identify unknown gamma-ray emitting objects in nuclear security and safety, such as preventing nuclear terrorism. The mask parameters of a coded aperture are critical design features when optimizing the performance of a gamma-ray camera. This paper presents the results of the effect of the mask rank on the image quality of a lead-based coded-aperture imaging (CAI) with a mosaic-modified uniformly redundant array (MURA) mask using the Monte Carlo Gate code. The impact of three ranks of 5, 11, and 19 on the image quality is quantified. The imaging of a surface cesium-137 source with an activity of 0.02 mCi sitting at a distance of 3 m from the system at the three angles of 0, 25, and 45 degrees was demonstrated using maximum likelihood expectation maximization (MLEM) method. To evaluate the quality of the reconstructed images, the peak signal-to-noise ratio (SNR) of the captured gamma camera images was evaluated as a function of the mask rank and viewing angle. In order to find the most appropriate distance between the mask and the detector in the optimal performance of the gamma camera imaging system, the distance between the mask and the detector was investigated at three distances of 3, 6 and 12 cm. The results showed that the MURA mask with rank 19, which is located at a distance of 3 cm from the detector, has a higher signal-to-noise ratio and lower angular error than masks with ranks 5 and 11, and therefore it is suitable for use in gamma cameras with security application.

Keywords: Gamma Camera, Nuclear Imaging, Coded Aperture, Gate Software.

*Corresponding Author E-mail: hrshakur@ihu.ac.ir

Advanced Defence Sci. & Technol., 2024, 4, 265-272

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

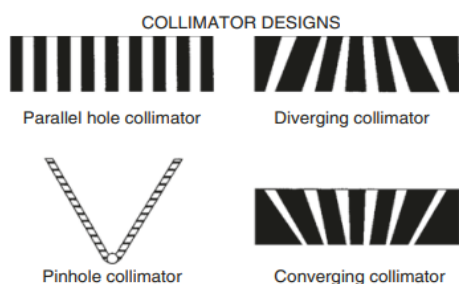
© Authors



۱. مقدمه

کاهش کیفیت تصاویر می‌باشند که فقط به طور غیرمستقیم وابسته به هندسه و طرح موازی‌ساز است. از جمله این موارد می‌توان به نفوذ سپتا (نفوذ تابش از ضخامت موازی‌ساز)، میدان دید متناسب با طرح شکاف موازی‌ساز در تصویر، محدودیت وزنی که توسط حائل دوربین تحمیل می‌شود، ضخامت کمینه برای سپتا که به موجب محدودیت‌های ساخت تحمیل می‌شود و تأثیرات پراکندگی در موازی‌ساز اشاره کرد. اگر یک موازی‌ساز به طریق مناسبی طراحی شده باشد، این تأثیرات فرعی به میزان کمتری در تصویر نهایی تأثیر خواهد گذاشت. غالب موازی‌سازهای رایج از یک صفحه سربی شامل تعداد زیادی حفره (کانال) کاملاً یکپارچه تشکیل شده‌اند. موازی‌سازها، پرتوهای واپاشی شده از چشمه را محدود می‌کنند، به گونه‌ای که هر نقطه در تصویر متناظر با یک نقطه منفرد در چشمه است [۳].

در دوربین‌های سوسوزن، موازی‌سازها بسته به نوع کانونی کردن، به عنوان حفره‌های موازی، واگرا، سوراخ‌دار و همگرا طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱). هنگامی که تعداد سوراخ‌ها در یک موازی‌ساز افزایش می‌یابد، حساسیت آشکارساز افزایش می‌یابد، اما ضخامت سپتا کاهش قابل مقایسه‌ای دارد که منجر به نفوذ پرتوهای نسبتاً پراکنده‌تری به سپتا و در نتیجه کاهش وضوح فضایی می‌شود. می‌توان با کاهش اندازه حفره‌ها در یک موازی‌ساز معین یا افزایش طول موازی‌ساز، وضوح یا جزئیات تصویر را افزایش داد. این منجر به کاهش حساسیت (یعنی، راندمان تشخیص اشعه γ) دوربین می‌شود.



شکل ۱. انواع موازی‌ساز

به همین منظور در تصویربرداری هسته‌ای توسط دوربین گاما، موازی‌سازها بخش مهمی از دوربین گاما هستند؛ زیرا بدون وجود موازی‌ساز، تصاویر ثبتي نامشخص خواهند بود. یک موازی‌ساز اولین مواجهه دوربین گاما، در مقابل فوتون‌های واپاشی شده از چشمه تابشی است؛ بنابراین انتخاب نوع ماده تشکیل‌دهنده باریکه ساز، ضخامت و طول آن کمیت‌هایی هستند که در بهینه‌سازی یک سامانه تصویربرداری باید مورد توجه قرار بگیرند. به طور جایگزین می‌توان از حفره‌های کدگذاری شده به جای باریکه سازهای حفره موازی استفاده کرد. مزیت اصلی تصویربرداری با

استفاده روزافزون از منابع هسته‌ای توسط بشر، در صنعت، کشاورزی، تحقیقات، پزشکی، داروسازی، استفاده از رادیوایزوتوپ‌ها را روزبه‌روز اجتناب‌ناپذیر و گسترده‌تر کرده است؛ لذا تهدیدات هسته‌ای به موازات این گسترش کاربرد نیز گسترش یافته‌اند. علاوه بر خطر جنگ هسته‌ای به سبب تعداد زیاد جنگ‌افزای هسته‌ای، مخاطره مهم دیگر مربوط به نشت مواد پرتوزا و یا تخریب این تأسیسات بر اثر حوادث طبیعی، مانند سیل، زلزله، سونامی و یا حوادث بشری است. اما شاید مهم‌ترین تهدید هسته‌ای در عصر حاضر تهدیدات مربوط به حوزه تروریسم پرتوی می‌باشند. در اواخر قرن بیستم با فروپاشی اتحادیه جماهیر شوروی، احتمال سرقت یا مفقود شدن مواد پرتوزا به دلیل وسیع بودن تهدیدات مادی و معنوی ناشی از آن، مورد توجه مجامع بین‌المللی واقع شده است [۱].

امروزه تصویربرداری هسته‌ای امری مهم و پراهمیت محسوب می‌شود چرا که می‌تواند در موارد امنیتی جهت رصد مرزها، یافتن آلودگی، مراکز حساس، حفاظت از اشخاص، اماکن، استفاده در گیت‌ها و محیط‌های حساس، مورد استفاده قرار گیرد. سامانه‌های تصویربرداری هسته‌ای انواع مختلفی دارند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. سامانه‌های تصویربرداری گاما یکی از پرکاربردترین سامانه‌های مورد استفاده در تصویربرداری هسته‌ای هستند که در آنها می‌توان از حفره‌های کدگذاری شده به جای باریکه سازهای حفره موازی استفاده کرد. مزیت اصلی تصویربرداری با حفره‌های کدگذاری شده^۱ (CAI) افزایش بازده جمع‌آوری نور نسبت به سایر روش‌های تصویربرداری به دلیل حفره‌های متعددی است که میزان فوتون‌های ورودی به آشکارساز را افزایش می‌دهند و در نتیجه تصویری بهتر و البته پیچیده‌تر را ایجاد می‌کنند [۲].

پرتوهای گاما برخلاف فوتون‌های نور مرئی، قابل انعکاس و کانونی شدن نمی‌باشند. با توجه به همین امر تصاویر در دوربین گاما به وسیله جذب و حذف فوتون‌هایی پراکنده، تشکیل می‌شوند. پرتوهای گسیل شده از جانب منبع رادیواکتیو لازم است از حفره‌های موازی‌ساز عبور کنند تا به آشکارساز برسند. پرتوهای گامایی که به جداره‌های موازی‌ساز برخورد می‌کنند غالباً جذب می‌شوند، در نتیجه تنها پرتوهای گامایی که به صورت مستقیم از محور موازی‌ساز عبور می‌کنند در تصویر ظاهر می‌شوند. بنابراین طرح هندسی موازی‌ساز، تأثیر قابل توجهی در عملکرد دوربین گاما خواهد گذاشت. موازی‌ساز صرفاً توان تفکیک دوربین را تعیین نمی‌کند بلکه عامل اصلی ایجاد محدودیت در میزان شمارش‌های ردیابی شده نیز می‌باشد. عوامل زیادی در موازی‌سازها عامل

¹ Coded Aperture Imaging

امنیت هسته‌ای و ایمنی استفاده شده است و توانایی قوی برای مکان‌یابی سه‌بعدی منابع رادیواکتیو در فواصل طولانی با حساسیت تصویر بالا را نشان می‌دهد. این دوربین از چهار آشکارساز دیافراگم رمزگذاری شده مستقل بافاصله مجاور mm ۲۸۶ تشکیل شده است و قادر است منابع میدان دور را با دقت بالایی شناسایی کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دقت برد m ۲۰ را بیش از ۶ برابر، بادقت کمتر از m ۱٫۴ در m ۲۰ و کمتر از m ۱۰٫۵ در m ۵۰ بهبود می‌بخشد. هی و همکاران [۷] اطلاعاتی در مورد توسعه و عملکرد دوربین‌های گاما با دیافراگم رمزگذاری شده با استفاده از انواع مختلف آشکارسازهای بلوری ارائه کرده‌اند. یک دوربین گاما با دیافراگم رمزگذاری شده با کارایی بالا را بر اساس بلور GAGG:Ce یکپارچه توصیف می‌کنند. این دوربین به وضوح انرژی بالای ۷٫۴٪ در ۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت و وضوح موقعیت m ۱٫۴ دست‌یافت که پتانسیل عملکرد بالا و بهبود بیشتر را نشان می‌دهد. ژو و همکاران [۸] یک نسبت کنتراست به نوفه جدید (CNR°) برای توصیف کیفیت تصویر دوربین گاما با دیافراگم کد شده پیشنهاد کرده‌اند. این مطالعه شامل استفاده از یک سیستم تصویربرداری با دیافراگم کد شده، با شبیه‌سازی انجام شده در پلتفرم‌های MATLAB و Geant4 و همچنین آزمایش‌های تصویربرداری واقعی است.

هاشمی و همکاران [۹] شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانه تصویرگر گامای حفره رمزگذاری شده با میدان دید وسیع را به انجام رسانیده‌اند. در این مطالعه شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Gate و بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم MLEM در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفته است. در این مطالعه ماسک MURA با جنس سرب و رتبه 37×37 موزائیکی به همراه آشکارساز NaI(Tl) با ابعاد $27 \times 27 \text{ cm}^2$ و ضخامت ۲ cm برای تصویربرداری از چشمه‌های سزیم-۱۳۷ و امرسیوم-۲۴۱ صورت پذیرفته است. در این مطالعه توان تفکیک سامانه برای دو چشمه مذکور در فاصله ۳ متری از دوربین بررسی و توان تفکیک زاویه‌ای به میزان ۷ درجه حاصل شده بود. در این مطالعه همچنین حداقل دز معادل جهت تصویربرداری در فاصله ۱۰ متر برای چشمه سزیم-۱۳۷، $0,179 \frac{nsv}{hr}$ (با فعالیت چشمه $6 \mu\text{Ci}$) به دست آمده است. در این مقاله برای اولین بار اثر رتبه ماسک MURA در کیفیت تصویر نهایی ثبت شده توسط دوربین گاما با حفره رمزگذاری شده با ساختار موزائیکی در زاویه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تأثیر حفره رمزگذاری شده سربی با سه رتبه ۵، ۱۱، و ۱۹ در زاویه‌های ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه بر کیفیت تصویر ثبت شده توسط دوربین گاما با حفره رمزگذاری شده با ساختار موزائیکی در فاصله ۳ m از چشمه سزیم-۱۳۷ با فعالیت mCi

حفره‌های کدگذاری شده^۱ (CAI) افزایش بازده جمع‌آوری نور نسبت به سایر روش‌های تصویربرداری به دلیل حفره‌های متعددی است که میزان فوتون‌های ورودی به آشکارساز را افزایش می‌دهند و در نتیجه تصویری بهتر و البته پیچیده‌تر را ایجاد می‌کنند. سپس وضوح با فرایند رمزگشایی که کیفیت تصویر را با افزایش قدرت سیگنال چندین حفره و اضافه کردن مقداری نوفه بازایی می‌کند، ایجاد می‌شود. ماسک‌های MURA^۲ توسط یک الگوی خاص تولید می‌شوند که کارایی جمع‌آوری سیگنال در آن‌ها، نسبت به ماسکی با همان اندازه ولی با حفره‌هایی که بافاصله تصادفی توزیع شده‌اند مناسب‌تر است [۲].

با توجه به اهمیت دوربین‌های گاما با حفره‌های کدگذاری شده در حوزه‌های ایمنی پرتوی و امنیت ملی تا کنون محققان زیادی به مطالعه آنها پرداخته‌اند. پارک و همکاران [۴] تأثیر ضخامت ماسک بر ویژگی‌های تصویربرداری آنی دوربین‌های گاما با حفره‌های کدگذاری شده را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه از طریق شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MCNPX-Polimi تأثیر ضخامت ماسک MURA با جنس تنگستن و رتبه 21×21 موزائیکی با استفاده از آشکارساز سوسوزن CsI:TI بر کیفیت تصویر بررسی شده است. همچنین تصویربرداری از چشمه‌های تابش نقطه‌ای، خطی و سطحی با استفاده از روش MLEM صورت پذیرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد که هنگامی که ضخامت ماسک تقریباً ۲ cm است تصاویر با وضوح کافی برای چشمه بالانرژی بین keV ۳۰ و ۱٫۵ MeV با حداقل فعالیت قابل تشخیص ۲۳٫۷ MBq برای تصویربرداری آنی در فاصله ۱ m برای زمان جمع‌آوری ۱ ثانیه، بازسازی می‌شوند. مایسنر و همکاران [۵] شبیه‌سازی وضوح فوق بالا برای دوربین گاما با حفره‌های کدگذاری شده را توسط نرم‌افزار مونت کارلو TOPAS به انجام رسانیده‌اند. در این مطالعه ماسک MURA با جنس تنگستن موزائیک شده 2×2 با ضخامت ۱ mm و رتبه 31×31 با سوراخ‌هایی به قطر ۰٫۳۴ mm در مقابل یک آشکارساز نیمه‌هادی CdTe با ضخامت ۲ mm قرار گرفته است. در این کار از سه روش بازسازی تصویر MLEM^۳ و CED^۴ و رمزگشایی MURA جهت تجزیه و تحلیل تصاویر استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند. لی و همکاران [۶] اطلاعاتی در مورد انواع دوربین‌های گاما از جمله دوربین گاما با دیافراگم رمزگذاری شده استریو با حساسیت بالا برای مکان‌یابی سه‌بعدی نقاط رادیواکتیو ارائه کرده‌اند. این دوربین مبتنی بر چهار ماژول تشخیص است که در چهار ربع قرار گرفته‌اند که هر کدام شامل سوسوزن‌ها، تکثیرکننده‌های نوری سیلیکونی و مدارهای جمع‌آوری داده است. این دوربین با موفقیت در وظایف عملی

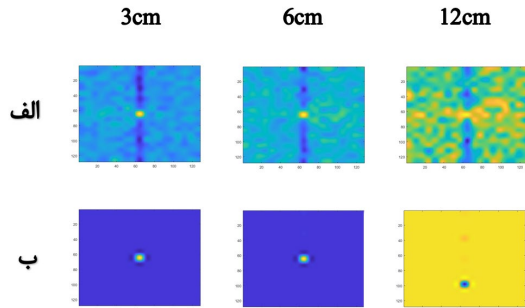
² Modified Uniformly Redundant Array

³ Maximum Likelihood Expectation Maximization

⁴ Convolutional encoder-decoder

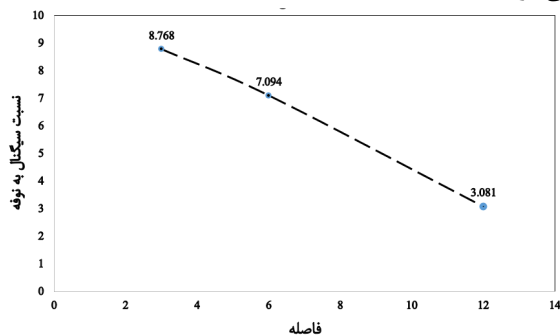
⁵ contrast-to-noise ratio

فعالیت ۲۰ میکروکوری در فاصله ۳ متری تحت زاویه صفر درجه از خط عمود در راستای افق از سامانه، مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۳) تصاویر خام و بازسازی شده با ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM را نشان می‌دهد.



شکل ۳. الف) تصاویر خام و ب) تصاویر حاصل از ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM، برای سه فاصله ۳ cm، ۶ cm و ۱۲ cm

همان‌گونه که از تصاویر مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین ماسک و آشکارساز کیفیت تصویر ثبت شده توسط سامانه کاهش می‌یابد. این کاهش کیفیت تصویر به حدی است که در فاصله ۱۲ سانتی‌متری ماسک از آشکارساز، مکان چشمه به اشتباه ثبت می‌گردد. شکل (۴) تغییرات کمیت نسبت سیگنال به نوفه برحسب فاصله ماسک از آشکارساز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این نمودار مشخص است، مقدار کمیت کیفیت تصویر نسبت سیگنال به نوفه با افزایش فاصله ماسک از آشکارساز از ۳ به ۱۲ سانتی‌متر، از مقدار ۷٫۷۶۸ تا مقدار ۳٫۰۸۱ کاهش می‌یابد. این کاهش کیفیت تصویر به دلیل انحراف بیشتر پرتوهای پراکنده شده فرودی در اثر فرایند پراکندگی کامپون از مسیر اصلی خود است که در اثر افزایش فاصله بین ماسک و آشکارساز در پیکسل با خطای بیشتری ثبت می‌شوند. بنابراین در اثر انحراف بیشتر پرتوهای پراکندگی کامپتون از مسیر اصلی خود در سامانه با فاصله ماسک از آشکارساز بیشتر، یا تصویر چشمه در مکان دیگری بازسازی می‌گردد یا منجر به ثبت تصویر با چشمه چندگانه می‌شود.

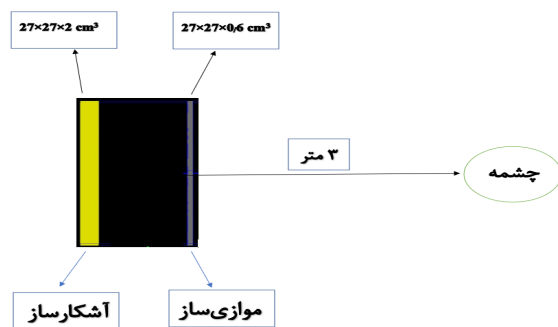


شکل ۴. تغییرات نسبت سیگنال به نوفه بر حسب فاصله (cm) بین ماسک و آشکارساز

۰٫۰۲ توسط کد مونت کارلو گیت مورد بررسی قرار گرفته است. اهمیت این پژوهش متکی بر مطالعه محلی‌سازی چشمه پرتوزا به‌ویژه در موارد امنیتی مانند جلوگیری از تروریسم هسته‌ای، خلع سلاح هسته‌ای، رصد مرزها و رفع آلودگی است؛ چرا که اغلب مکان واقعی چشمه پرتوزا ناشناخته است.

۲. روش تحقیق

شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده MURA به‌صورت موزاییکی، در نرم‌افزار GATE که یک چارچوب مبتنی بر GEANT4 است صورت پذیرفت. تصویربرداری از چشمه سزیم-۱۳۷ توسط آشکارساز NaI(Tl) با ابعاد $27 \times 27 \times 0.6 \text{ cm}^3$ صورت پذیرفته و حفره‌های کدگذاری شده از جنس سرب نیز با ابعاد حفره $0.73 \times 0.73 \times 0.6 \text{ cm}^3$ و با ضخامت 0.6 cm با آرایه‌هایی با الگوی رتبه‌های ۵، ۱۱، ۱۹، MURA و به صورت موزاییکی 2×2 در مقابل آشکارساز قرار گرفت. فاصله حفره‌های کدگذاری شده با آشکارساز مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت برابر با 3 cm در نظر گرفته شد. شکل (۲) سامانه طراحی شده را به صورت مفهومی نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایی از دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده

کمیت نسبت سیگنال به نوفه که از رابطه ۱ به دست می‌آید جهت ارزیابی تصاویر مورد استفاده قرار گرفت. این نسبت برای هر تصویر برابر با اختلاف بیشینه مقدار تصویر و مقدار متوسط تصویر، تقسیم بر انحراف معیار استاندارد تصویر، تعریف می‌شود:

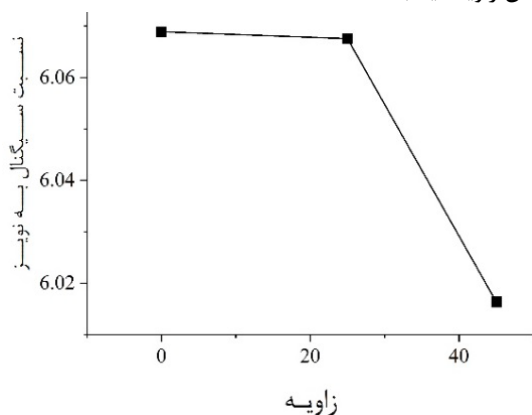
$$SNR = \frac{(\max(I) - \text{mean}(I))}{\sigma(I)} \quad (1)$$

بازسازی تصویر و همچنین روش تکرارپذیری آماری MLEM مانند روش ارائه شده در مقاله قبلی نویسندگان [۹] است.

۳. نتایج و بحث

به‌منظور بررسی عملکرد سامانه تصویربرداری دوربین گاما، ابتدا اثر فاصله ماسک MURA از جنس سرب با رتبه ۳۷ موزاییکی از آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) در سه فاصله ۳ cm، ۶ cm و ۱۲ cm بر کیفیت تصویر ثبت شده‌ی یک چشمه سزیم-۱۳۷ با

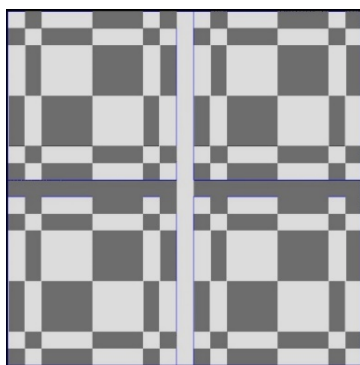
همان‌گونه که در تصاویر شکل (۶) مشخص است سامانه با موفقیت چشمه را در هر سه زاویه مورد مطالعه تشخیص داده است اما تصویر در زاویه ۴۵ درجه در مکان واقعی خودش ثبت نشده است بلکه تصویر بازسازی شده در زاویه ۲۵ درجه قرار گرفته است. بعلاوه از تصاویر مشخص است که تصویر چشمه پهن‌شدگی دارد که مبین قدرت تفکیک ضعیف تصاویر ثبت شده است. شکل (۷) تغییرات پارامتر کیفیت تصویر نسبت سیگنال به نوفه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷) پیداست با افزایش زاویه دید مقدار کمیت نسبت سیگنال به نوفه کاهش می‌یابد. این کاهش مقدار سیگنال به نوفه می‌تواند ناشی از کاهش شار پرتو فرودی با افزایش زاویه دید باشد.



شکل ۷. نمودار تغییرات نسبت سیگنال به نوفه تصاویر خام بر حسب زاویه برای ماسک با رتبه ۵

۳-۲. ماسک با رتبه ۱۱ در سه زاویه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه

ماسک شبیه‌سازی شده موزاییکی با رتبه ۱۱ در شکل (۸) نشان داده شده است.

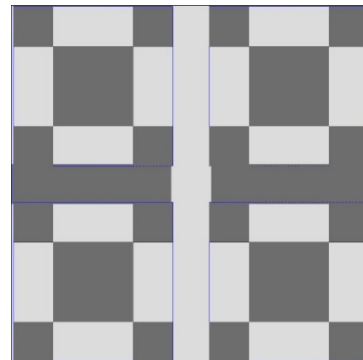


شکل ۸. نمایی از حفره‌های کدگذاری شده رتبه ۱۱ موزاییکی (رنگ خاکستری نشان‌دهنده ماده سرب و رنگ سفید نشان‌دهنده هوا است). تصاویر ثبت شده توسط سامانه تصویربردار گاما با ماسک رتبه ۱۱ در شرایطی مشابه قبل و بدون تغییر در چیدمان تصویربرداری در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. فرایند بازسازی تصویر و همچنین فرایند نوفه‌زدایی توسط الگوریتم MLEM با نرم افزار متلب انجام شده‌اند.

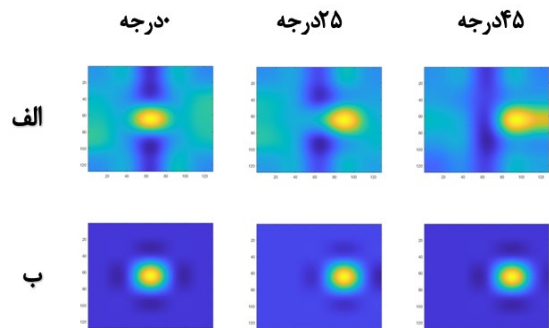
در ادامه برای بررسی عملکرد سامانه تصویربرداری دوربین گاما با ماسک حفره کدگذاری شده سربی با سه رتبه ۵، ۱۱ و ۱۹ در زاویه‌های ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه، فاصله بین ماسک و آشکارساز برابر با ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تعداد حالات ممکن برای بررسی اثر سه رتبه ماسک موردنظر در سه زاویه مختلف برابر با $3^3=9$ حالت است لذا در ادامه، کیفیت تصاویر ثبت شده توسط این ۹ حالت ممکن در فاصله ۳ m از یک چشمه سزیم-۱۳۷ با فعالیت ۰.۰۲ mCi، مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب ابعاد قسمت‌های مختلف سامانه طراحی شده براساس سامانه تصویربرداری طراحی شده توسط آقای لی و همکاران است [۱۰] تا نمونه شبیه‌سازی شده در این مقاله تا حد امکان به یک سامانه ساخته شده مطابقت داشته باشد.

۳-۱. ماسک با رتبه ۵ در سه زاویه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه

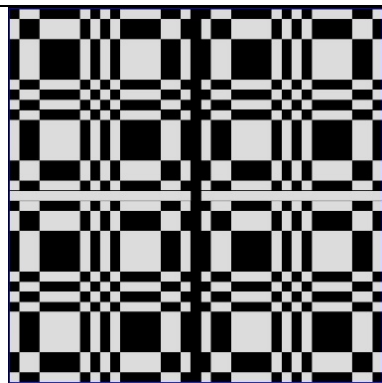
شکل (۵) ماسک شبیه‌سازی شده موزاییکی از جنس سرب با رتبه ۵ را نشان می‌دهد. تصاویر خام و بازسازی شده با ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM که توسط سامانه در مدت ۶۰ ثانیه در فاصله ۳ m از چشمه سزیم ۱۳۷ با فعالیت ۰.۰۲ mCi در زاویه‌های ۰، ۲۵ و ۴۵ ثبت شده‌اند، در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. حفره‌های کدگذاری شده مرتبه ۵ موزاییکی (رنگ خاکستری نشان‌دهنده ماده سرب و رنگ سفید نشان‌دهنده هوا است).

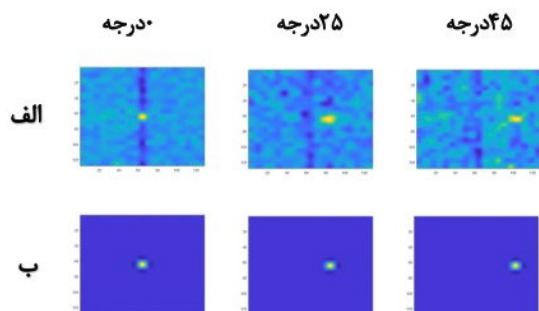


شکل ۶. تصاویر خام و (ب) تصاویر حاصل از ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM، برای زاویه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه برای ماسک رتبه ۵



شکل ۱۱. نمایی از حفره‌های کدگذاری شده رتبه ۱۹ موزائیکی (رنگ خاکستری نشان‌دهنده ماده سرب و رنگ سیاه نشان‌دهنده هوا است).

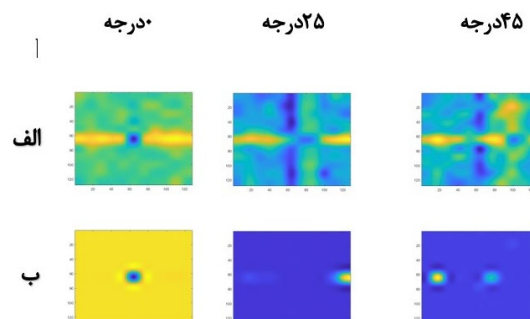
تصاویر خام و بازسازی شده با ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM که توسط سامانه با ماسک رتبه ۱۹ در مدت ۶۰ ثانیه ثبت شده است در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در تصاویر شکل (۱۲) به خوبی مشخص است سامانه با موفقیت چشمه را در هر سه زاویه مورد مطالعه تشخیص داده است. بعلاوه سامانه به درستی مکان چشمه را در زاویه مناسب ثبت کرده است. همچنین از تصاویر مشخص است که تصویر چشمه پهن‌شدگی اندکی دارد که مبین قدرت تفکیک بالای تصاویر ثبت شده است.



شکل ۱۲. الف) تصاویر خام و ب) تصاویر حاصل از ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM، برای زوایه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه برای ماسک رتبه ۱۹

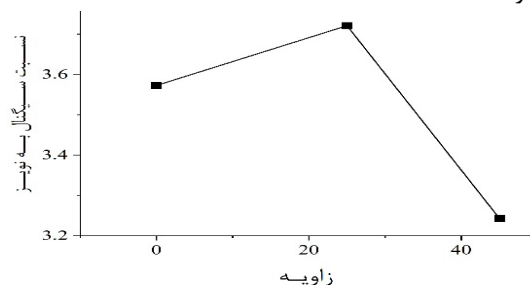
شکل (۱۳) تغییرات پارامتر کیفیت تصویر نسبت سیگنال به نوفه به عنوان تابعی از زاویه برای تصاویر ثبت شده توسط سامانه با ماسک با رتبه ۱۹ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است با افزایش زاویه نسبت سیگنال به نوفه کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش شار پرتوهای فرودی با افزایش زاویه است. همچنین مشخص است که مقدار کمیت سیگنال به نوفه در هر سه زاویه ۰ و ۲۵ و ۴۵ درجه نسبت به ماسک با رتبه‌های ۵ و ۱۱ بیشتر است. این به دلیل وجود حفره‌های بیشتر و به تبع آن سپتاهای کمتر در ماسک با رتبه ۱۹ است که منجر به عبور بیشتر پرتوهای فرودی مناسب در راستای چشمه می‌گردد.

همان‌گونه که در تصاویر شکل (۹) مشخص است سامانه با ماسک رتبه ۱۱ به خوبی قادر به تشخیص چشمه و مکان آن در زاویه صفر درجه است ولی عملکرد آن در زاویه‌های بالاتر ۲۵ و ۴۵ درجه مناسب نیست به صورتی که برای چشمه واقع در زاویه ۴۵ درجه، تصویر در زاویه -۴۵ درجه ثبت شده است.



شکل ۹. الف) تصاویر خام و ب) تصاویر حاصل از ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM، برای زوایه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه برای ماسک رتبه ۱۱

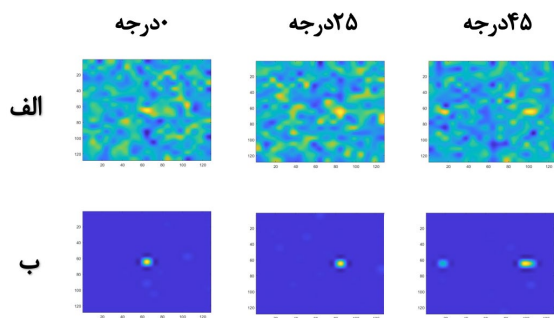
تغییرات پارامتر نسبت سیگنال به نوفه به عنوان تابعی از زاویه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است علی‌رغم اینکه تعداد حفره‌ها در ماسک رتبه ۱۱ بیشتر از ماسک رتبه ۵ است؛ اما مقدار کمیت نسبت سیگنال به نوفه در ماسک رتبه ۱۱ در هر سه زاویه ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه کمتر از ماسک رتبه ۵ است. همچنین مشاهده می‌گردد که مقدار سیگنال به نوفه در زاویه ۲۵ درجه بیشینه است. اینها می‌تواند به دلیل الگوی خاص هندسه ماسک با رتبه ۱۱ باشد که منجر به وجود سپتای بیشتر و به تبع آن حفره‌های کمتر در مرکز ماسک در راستای افق باشد که مانع رسیدن پرتوهای چشمه به آشکارساز می‌گردد.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نسبت سیگنال به نوفه تصاویر خام بر حسب زاویه برای ماسک با رتبه ۱۱

۳-۳. ماسک با رتبه ۱۹ در سه زاویه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه

برای بررسی عملکرد سامانه با ماسک رتبه ۱۹ در سه زاویه ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه، چیدمان تصویربرداری مشابه حالات قبلی و بدون تغییر در نظر گرفته شد. شکل (۱۱) نمایی از حفره کدگذاری شده با رتبه ۱۹ که در سامانه تصویربرداری شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار گرفته است، را نشان می‌دهد.

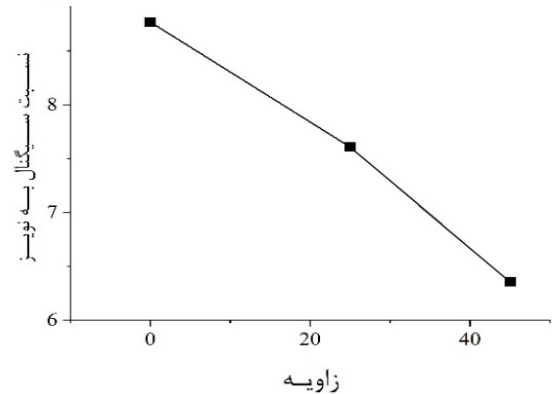


شکل ۱۵. الف) تصاویر خام و ب) تصاویر حاصل از ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM، برای زوایه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه برای ماسک رتبه ۱۹

همان‌گونه که مشخص است با افزایش زاویه، کمترین فعالیت آشکار پذیر نیز افزایش می‌یابد. این افزایش MDA با افزایش زاویه به دلیل تضعیف شدت پرتوی فرودی در نتیجه دورتر شدن چشمه از سامانه و همچنین افزایش پرتوهای غیرموازی تابیده شده به سامانه است. در صورتی که زاویه چشمه نسبت به خط عمود بر سامانه بیش از حد افزایش پیدا کند پرتوهای فرودی به حدی غیرموازی می‌گردد که تنها به ماسک برخورد می‌کند و به آشکارساز نخواهند رسید؛ لذا تحت این شرایط تنها پرتوها با پراکندگی کامپتون چندگانه در آشکارساز ثبت می‌شوند که منجر به تشکیل تصویر چشمه چندگانه می‌گردد. همچنین به منظور بررسی قابلیت عملیاتی مقدار کمیت کمترین فعالیت آشکار پذیر که سامانه طراحی شده با عملکرد بهینه قادر به تشخیص درست مکان چشمه سزیم-۱۳۷ در فاصله ۱۰ متری و زاویه ۵۰ درجه است نیز مورد بررسی قرار گرفت و مقدار آن 0.07 mCi محاسبه گردید.

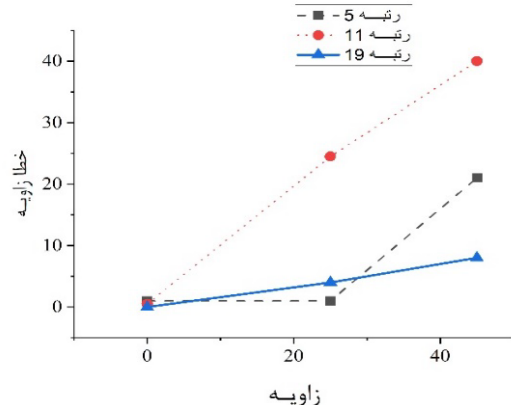
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله محاسبات شبیه‌سازی توسط کد محاسباتی "گیت" برای ارزیابی عملکرد یک سامانه تصویربرداری گاما با حفره‌های کدگذاری شده موزاییکی انجام پذیرفت تا اثر رتبه ماسک MURA را در میدان‌های دید وسیع مورد بررسی قرار دهد. ابتدا به منظور بررسی عملکرد سامانه تصویربرداری دوربین گاما، اثر فاصله ماسک از جنس سرب با آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) در سه فاصله ۳ cm، ۶ cm و ۱۲ cm بر کیفیت تصویر ثبت شده مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت باتوجه به نتایج به دست آمده فاصله ۳ سانتی‌متری به عنوان فاصله بهینه ماسک از آشکارساز انتخاب گردید. سپس سامانه شبیه‌سازی شده دوربین گاما با حفره‌های کدگذاری شده در میدان دید از ۰ تا ۴۵ درجه با ماسک با سه رتبه متفاوت ۵، ۱۱ و ۱۹ توسط چشمه سزیم-۱۳۷ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ماسک با رتبه ۱۹ نسبت به ماسک با رتبه ۵ و ۱۱ در میدان دید وسیع ۹۰ درجه (از ۴۵+ درجه تا ۴۵- درجه) دارای مقدار نسبت سیگنال به نوفه بالاتر و خطا زاویه‌ای کمتری در فاصله ۳ متری است. بعلاوه



شکل ۱۳. نمودار تغییرات نسبت سیگنال به نوفه تصاویر خام بر حسب زاویه برای ماسک با رتبه ۱۹

همچنین مقدار خطای زاویه‌ای که برای ماسک با هر سه رتبه ۵، ۱۱ و ۱۹ محاسبه گردیده است، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است و قبلاً نیز بیان شد ماسک با رتبه ۱۱ بیشترین خطای زاویه‌ای را در هر سه زاویه مورد مطالعه دارد. ماسک با رتبه ۵ در زاویه‌های دید کم بهتر عمل می‌کند اما در زاویه ۴۵ درجه همانگونه که قبلاً نیز بیان شد خطای زاویه‌ای زیادی دارد. اما ماسک با رتبه ۱۹ دارای خطای زاویه‌ای مناسبی در هر سه زاویه مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۱۴. تغییرات خطای زاویه‌ای بر حسب زاویه دید (درجه)

در نهایت کمترین فعالیت آشکار پذیر (MDA^1) که سامانه طراحی شده با عملکرد بهینه قادر به تشخیص درست مکان چشمه سزیم-۱۳۷ می‌باشد نیز محاسبه گردید. کمترین فعالیت آشکارپذیر برای سامانه مورد مطالعه در زاویه صفر درجه در فاصله ۳ متری برابر با 0.009 mCi (معادل $0.9 \mu\text{Ci}$) محاسبه گردید. همچنین کمترین فعالیت آشکارپذیر در فاصله ۳ متری و زاویه ۲۵ و ۴۵ درجه به ترتیب برابر با 0.003 mCi و 0.005 mCi محاسبه گردید. تصاویر خام و بازسازی شده با ۱۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM که توسط سامانه با ماسک رتبه ۱۹ در مدت ۶۰ ثانیه در فاصله ۳ متری در زوایه‌های ۰، ۲۵ و ۴۵ درجه ثبت شده است در شکل (۱۵) نشان داده شده‌اند.

¹ Minimum Detective Activity

- [5] Meißner, T.; Nahm, W.; Hesser, J.; Löw, N. "Simulation Study on Super-Resolution for Coded Aperture Gamma Imaging"; arXiv:2306.08483 [physics.Med-Ph], 2023. doi.org/10.48550/arXiv.2306.08483
- [6] Liu, Y.; Shuai, L.; Li, D.; Liu, S.; Wang, Y.; Zhou, W.; Huang, H.; Wang, X.; et al. "High-Sensitivity Stereo Coded Aperture Gamma Camera for Three-Dimensional Localization of Radioactive Hotspots"; AIP Adv. 2022. 12. Doi.org/10.1063/5.0096865
- [7] He, W.; Wang, Y.; Liang, X.; Zhou, W.; Zhu, Z.; Han, H.; Zhai, J.; Zeng, X.; Feng, B.; Tang, H.; Li, D.; Long Wei, Z.Z.; Huang, X. "High-Performance Coded Aperture Gamma Camera Based on Monolithic GAGG:Ce Crystal"; ISO4 Appl. Radiat. Isot. 2021, 92. doi.org/10.1063/5.0035991
- [8] Zhu, B.; Wang, Z.; Gao, T.; Chen, Q.; Huang, Q.; Mao, X.; Zhao, C.; Tao, M.; Qi, P.; Zhao, Q.; Chaowen Yang, Y.L.R.Z. "A New Contrast-to-Noise Ratio for Image Quality Characterization of a Coded-Aperture Gamma Camera"; ISO4 Appl. Radiat. Isot. 2021. doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109592
- [9] Hashemi, S. M.; Hosseinkhani, P.; Shakur, H. "Simulation And Performance Evaluation of Coded Aperture Gamma Imager System with Wide Field of View"; Measurement and radiation safety 2023, 12, 111-120 (in Persian). doi.org/10.22052/rsm.2023.252810.1020
- [10] Lee, H.; Kim, J.; Lee, J.; Hyeong Kim, C. "Development And Performance Evaluation Of Large-Area Hybrid Gamma Imager (LAHGI)"; Nucl. Eng. Technol. 2021, 53, 2640-2645. doi.org/10.1016/j.net.2021.01.036
- کمترین فعالیت آشکار پذیر برای سامانه با عملکرد بهینه در فاصله ۳ متری و در سه زاویه ۰، ۲۵، ۴۵ درجه به ترتیب برابر با ۰،۰۰۰۹، ۰،۰۰۰۳ و ۰،۰۰۰۵ میلی کوری محاسبه گردید. همچنین سامانه طراحی شده قادر به تشخیص درست مکانیک چشمه سزیم-۱۳۷ با فعالیت ۰،۰۷ mCi در فاصله ۱۰ متری و زاویه ۵۰ درجه است؛ لذا جهت تصویربرداری از فاصله دور و میدان دید وسیع که برای کاربری‌های مربوط به موارد امنیتی دارای اهمیت زیادی است، مناسب است.

۵. مراجع

- [1] Shakur, H. "Getting to know the threats of modern warfare in the field of radiation"; Imam Hossein Officer and Guard Training University. 2021, 190, 154-156 (in Persian).
- [2] Cieślak, M.; Gamage, K.; Glover, R. "Coded-Aperture Imaging Systems: Past, Present and Future Development E A Review"; Radiat. Meas. 2016, 92, 59-71. doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.08.002
- [3] Saha, G. B. "Fundamentals of Nuclear Pharmacy"; 2004, Springer.
- [4] Park, S.; Boo, J.; Hammig M.; Jeong, M. "Impact of Aperture-Thickness on the Real-Time Imaging Characteristics of Coded-Aperture Gamma Cameras"; Nucl. Eng. Technol. 2021, 53, 1266-1276. doi.org/10.1016/j.net.2020.09.012