بهینه‌سازی فاصله در تصویربرداری دوربین گاما طراحی‌شده به همراه حفره‌های کدگذاری شده در کد GATE

INC29-1119

سید محمدرضا هاشمی*، پرویز حسینخانی، حمیدرضا شکور

فیزیک، شهید فخری زاده ، جامع امام حسین (ع)، ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، تهران ـ ایران.

چکیده:

دوربین گاما دارای نقش مهمی در صنعت هسته‌ای ازجمله در دو حوزه پزشکی هسته‌ای و امنیتی داراست. در امر تصویربرداری دو سنجه مهم در سنجش تصاویر حاصله عبارت‌اند از وضوح و حساسیت. در بین دو مورد مذکور باید تعادلی برقرار باشد. این امر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای حساسیت بیشتری را معطوف خود می‌کند. در این مقاله، با طراحی و شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده، در نرم‌افزار GATE، تصویربرداری هسته‌ای در گستره‌ای از فواصل مختلف (۵ تا ۱۲۰ سانتی‌متر) از چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ صورت پذیرفته است؛ در این میان بازسازی تصویر حاصل از حفره‌های کدگذاری شده در نرم‌افزار متلب صورت پذیرفت؛ سپس از الگوریتم MLEM جهت بهبود تصاویر بهره برده شد و در ادامه برای هر تصویر حاصل شده، میزان FWHM به کمک نرم‌افزار AMIDE و تعداد رویدادهای مؤثر در ایجاد تصویر استخراج گردید و با مقایسه آن‌ها ویژگی مناسب جهت برازش رفتار دوربین در رابطه با ویژگی‌های تعداد رویدادهای آشکارسازی شده و فاصله چشمه از دوربین موردبررسی قرار گرفت چراکه تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در رابطه با FWHM مشاهده نگردید. نتیجه حاصل از برازش با R-score برابر با ۰/۹۸ گویای آن است که جهت حفظ حساسیت مناسب، فاصله دوربین گاما طراحی‌شده از چشمه نباید بیشتر از cm76 باشد و این تجهیز در فاصله ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر دوربین دارای بیشترین میزان حساسیت است.

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

Optimization of the distance in the imaging of the designed Gamma camera with coded apertures which simulated in GATE

S.M.R. hashemi, P.hoseinkhani, H.R. shakur

Physics, fakhrizadeh, imamhossein, P.O.BOX: 1698715461, Tehran, Iran.

Abstract:

Gamma camera has applications in nuclear medicine and security. In the matter of Diagnostic imaging, two most important parameters are images are resolution and sensitivity. there is a Tradeoff between the two mentioned items. This is more important in the field of nuclear medicine. In this article, by designing and simulating a Gamma camera with coded apertures, in GATE software, nuclear imaging has been done in a range of different distances (5 to 120 cm) from the point source of cesium-137. In the meantime, the reconstruction of the images which obtained from the Gamma camera with coded apertures was implemented in MATLAB software, Then the LM-MLEM algorithm was used to improve the images, and then for each obtained image, the amount of FWHM was extracted by using AMIDE software and the number of true detected events extracted, and By comparing them, the suitable attribute for fitting the behavior of the Gamma camera was investigated in relation to the features of the number of detected events and the distance of the source from the Gamma camera, because no significant change was observed in relation to the FWHM. The result of fitting with R-score equal to 0.98 indicates that the distance of the designed gamma camera from the source should not be more than 76 cm to maintain proper sensitivity, and the camera has the highest sensitivity at a distance of 5 to 10 cm.

Keywords: Nuclear Imaging, Gamma camera, Coded Apertures, GATE.

۱. مقدمه

دوربین گاما سامانه‌ای جهت تصویربرداری از چشمه‌های پرتوزای گاما می‌باشد. از میان برهمکنش‌های مختلف فوتون صرفاً رویداد فوتوالکتریک در این دوربین جهت تشکیل تصویر، حائز اهمیت است؛ که در آن فوتون تمام انرژی خود (E_γ) را صرف انرژی بستگی (E_B) و انرژی جنبشی (E_k) الکترون در لایه اتمی مربوطه می‌کند[۱]. رابطه ۱ این معادله مربوط به این تبدیل انرژی را نشان می دهد.

$$E_\gamma = E_k + E_B \qquad (۱)$$

از کاربردهای این دوربین می‌توان به دو دسته کاربرد تشخیصی آن در پزشکی هسته‌ای [۲] و کاربردهای آن در موارد امنیتی [۳] اشاره نمود. در تصویربرداری هسته‌ای از رادیوداروی نشاندار شده متناسب با نوع تصویربرداری استفاده می‌شود (ورود به بدن از طریق وریدی، استنشاقی یا بلع). در ادامه با جای‌نشانی رادیودارو در ارگان مدنظر و پرتوزایی آن، دوربین گاما توانایی تصویربرداری از آن ارگان را خواهد داشت. در موارد امنیتی نیز از این دوربین برای استفاده در گیت‌ها و حفاظت اشخاص، رصد مراکز حساس و غیره استفاده می‌شود.

اجزا دوربین گاما به‌صورت کلی مشتمل بر باریکه‌ساز، آشکارساز، پیش تقویت‌کننده، تقویت‌کننده و مدارهای جمع‌زنی و وزن‌دهی است؛ البته هنگامی‌که از آشکارسازهای سوسوزن استفاده می‌شود، لامپ‌های تکثیرگر فوتونی یا تکثیرکننده‌های فوتونی سیلیکونی نیز اضافه می‌شوند[۴]. اولین مواجهه پرتوها با سامانه تصویربرداری در بخش باریکه‌ساز اتفاق می‌افتد که باریکه‌ساز مورداستفاده در این پژوهش، حفره‌های کدگذاری شده می‌باشند.

هدف از تصویربرداری در دوربین گاما، ایجاد یک تصویر مقطعی دوبعدی از فعالیت در میدان دید دوربین، $f\ (x,y)$، با به‌کارگیری از نمای نگاره (projection) است. تصویر بر روی یک ماتریس دوبعدی از پیکسل‌های جداگانه در دستگاه مختصات (x,y) بازسازی می‌شود [۴].

در تصویربرداری هسته‌ای توسط دوربین گاما، باریکه‌سازها بخشی مهم از دوربین گاما هستند؛ زیرا بدون وجود باریکه‌ساز، تصاویر اکتسابی نامعلوم خواهند بود. یک باریکه‌ساز، اولین مواجهه دوربین گاما در مقابل فوتون‌های واپاشی شده از چشمه تابشی می‌باشد.

جهت آشکارسازی نحوه توزیع پرتوهای در گستره ایکس و گاما، تصویربرداری با حفره‌های کدگذاری شده در کنار آشکارساز بسیار مؤثر است. ازنظر ریاضی، ماسک‌ها به‌صورت آرایه‌های دوتایی با آرایه‌های مربوط به روزنه‌ها و کدرها در ماسک نشان داده می‌شوند (شکل ۱). ماسک مذکور، در مقابل چشمه‌ای قرارگرفته تا تصویری با الگوی مربوطه (ماسک) روی آشکارساز ایجاد گردد و درنهایت مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. چشمه چندین سایه روی آشکارساز از طریق ماسک ایجاد می‌کند. سپس از قضیه کانولوشن فوریه برای بازسازی یک تصویر منفرد با وضوح بالا از فوتون‌های شمارش‌شده در صفحه آشکارساز استفاده می‌شود [۵]. تصویربرداری با بیشترین میزان وضوح[۱] و حساسیت[۲] از مواد پرتوزا در تصویربرداری هسته‌ای امری قابل‌توجه و قابل‌بررسی است. حساسیت برای دوربین گاما از طریق میزان شمارش بر واحد زمان آشکارسازی سامانه تعریف می‌شود. حساسیت به بازدهی هندسه باریکه‌ساز، فوتوپیک ذاتی آشکارساز، زمان مرگ[۳] سامانه و تنظیمات PHA[۴] بستگی دارد [۵].

مزیت اصلی تصویربرداری با حفره‌های کدگذاری‌شده[۵] (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 درنتیجه تصویری بهتر و البته پیچیده‌تر را ایجاد می‌کنند[۶].

---

[1] Resolution
[2] Sensitivity
[1] Dead time
[2] Pulse Height Analyser
[3] Coded Aperture Imaging

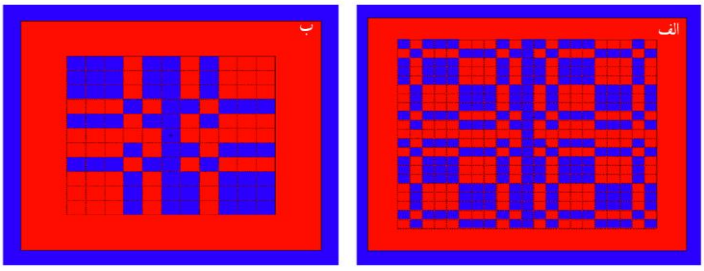
ماسک‌های MURA[1] توسط یک الگوی خاص تولید می‌شوند که کارایی جمع‌آوری سیگنال در آن‌ها، نسبت به ماسکی با همان اندازه ولی با حفره‌هایی که با فاصله تصادفی توزیع شده‌اند مناسب‌تر است [۶]. فرآیند تولید یک الگوی ماسک MURA با این منطق محاسبه می‌شود که در آن A نشان‌دهنده ماسک است که توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود و G آرایه رمزگشایی است که توسط معادله ۳ محاسبه می‌گردد. i و j اعداد صحیح هستند که موقعیت مکانی را در آرایه A (ماسک MURA) نشان می‌دهند، G ماسک رمزگشایی است، $\oplus$ برای مدول p بدین‌صورت تعریف می‌شود[۶]:
$0 \le i+j \le p$ اگر $i \oplus j = i+j$ در غیر این صورت باقی‌مانده تقسیم $(i+j)/p$ می‌باشد.

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 & if\, i = 0 \\ 1 & if\, j = 0, i \neq 0 \\ 1 & if\, c_p(i) * c_p(j) = 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (۲)$$

$$c_p(i) = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$$

اگر عدد صحیح x وجود داشته باشد که شرط $1 \le x < p$ برقرار باشد به طوری که $i = \mathrm{mod}_p x^2$

$$G_{ij} = \begin{cases} 1 & if\, i \oplus j = 0 \\ 1 & if\, A_{ij} = 1, i \oplus j \neq 0 \\ 0 & if\, A_{ij} = 0, i \oplus j \neq 0 \end{cases} \qquad (۳)$$



شکل۱. حفره‌های کدگذاری شده MURA الف) رتبه ۲۱ و ب) رتبه ۱۱.

فرآیند رمزگشایی در درجه اول شامل روشی برای ارتباط سیگنال دریافتی توسط آشکارساز به حفره خاصی در ماسکی است که آن را تولید کرده است[۶].

مراحل کد بازسازی تصویر (فرآیند رمزگشایی) بدین‌صورت می‌باشد:

۱. دریافت سیگنال (R) حاصل از آشکارساز (توسط شبیه‌سازی)

۲. ضرب نمودن مزدوج FFT سیگنال آشکارساز (R) و FFT آرایه رمزگشایی (G).

۳. محاسبه تبدیل عکس فوریه (سریع).

۴. انتقال اولین عنصر آرایه به‌صورت دایره‌ای به مرکز و چرخش ۱۸۰ درجه آن [۶].

حفره‌های کدگذاری شده در تصویربرداری پرتو گاما برای کاربردهای پزشکی [۷]، آزمایش‌های غیر مخرب [۸]، تشخیص مواد منفجره [۹] و همچنین برای از کار انداختن و رفع آلودگی هسته‌ای ارائه شده است. این موارد مشتمل بر GAMPIX [۱۰] و RADCAM [۱۱] است.

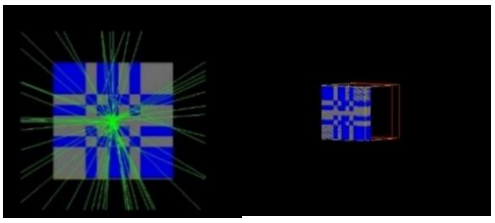
در پژوهش حاضر، ابتدا با معرفی دوربین گاما انجام گرفته است و سپس شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده و چشمه پرتوزا سزیوم-۱۳۷، به کمک نرم‌افزار[۱۲] *GATE* انجام شده است. سپس بازسازی تصویر به

[4] Modified Uniformly Redundant Array

کمک رمزگشایی حفره‌های کدگذاری شده [۶] و روش تکرار[۱۳] MLEM در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. درنهایت، استخراج مقدار تمام پهنا در نیمه مقدار بیشینه (FWHM[1]) با استفاده از نرم‌افزار [۱۴] AMIDE انجام شد. بدیهی است که هرچه میزان FWHM چشمه در تصویری نسبت به سایر تصاویر کوچک‌تر باشد، بیانگر معیار بهتری از وضوح خواهد بود. در رابطه با ویژگی تعداد رویدادهای آشکارسازی شده، که معیاری از حساسیت است نیز باید اشاره کرد که هرچه این مقدار بیشتر باشد، حساسیت سامانه نیز بیشتر خواهد بود. دو ویژگی مذکور، بردار ویژگی ورودی در امر بهینه‌سازی بهترین فاصله تصویربرداری دوربین گاما خواهند بود و برچسب مربوطه هر بردار ویژگی نیز فاصله چشمه از سامانه خواهد بود. تغییرات دو ویژگی مذکور با تغییر فواصل چشمه تا دوربین موردبررسی قرار گرفت؛ سپس با استفاده از نتایج برازش برای دو ویژگی مؤثر (تعداد رویدادها و فاصله چشمه از دوربین)، رفتار دوربین با دقت بالایی قابل پیش‌بینی گردید.

۲. روش کار

در ابتدا، شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده توسط نرم‌افزار GATE انجام شد. این نرم‌افزار یک چارچوب مبتنی برGEANT4 است که برای استفاده منعطف بوده و زبان اسکریپت جامعی برای اجرای رایج‌ترین الزامات یک برنامه کاربردی هسته‌ای است. به‌منظور تعریف دوربین، آشکارسازی از جنسCZT باضخامت ۰/۵ سانتی‌متر و حفره‌های کدگذاری‌شده از جنس سرب باضخامت ۰/۸ سانتی‌متر تعریف شدند (شکل ۱). آشکارساز به‌صورت پیکسل‌بندی شده و شامل ۱۱ بلور (با ابعاد ۴میلی‌متر مربع) باضخامت ۵ میلی‌متر است. چشمه گسیلنده گاما سزیوم-۱۳۷ با انرژی ۶۶۲keV و فعالیت ۰/۰۲mCi به‌صورت کروی در مبدأ مختصات و حفاظی سربی به ضخامت یک سانتی‌متر نیز برای آن در نظر گرفته شد. همچنین مدت‌زمان شبیه‌سازی برابر با ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل۲. شبیه‌سازی دوربین و چشمه در کد GATE حفره‌های کدگذاری شده (رنگ طوسی) و هوا (رنگ آبی) جهت عبور فوتون‌ها و برخورد آن‌ها با آشکارساز در پشت حفره‌های کدگذاری شده.

در ادامه جهت بهبود تصویر، از الگوریتم MLEM بهره برده شد. این الگوریتم توسط نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و اجرا شده است. به‌منظور مطلوب شدن تصویر به کمک الگوریتم یادشده، باید سهم پیکسل‌های تصویر در رویدادهای ثبت‌شده در آشکارساز در نظر گرفته شود که این پیکسل‌ها در امتداد خط پاسخ قرار می‌گیرند. در الگوریتم تکرار به‌منظور بازسازی تصویر به کمک روشMLEM دو فضا در نظر گرفته می‌شود؛ ۱) فضای تصویر؛ که دربرگیرنده میدان دید دوربین به‌صورت وکسلی است، و ۲) فضای داده؛ که پیکسل‌های مربوط به ثبت پرتو در آشکارساز دوربین گاما است (شکل ۳).

با توجه به توضیحات قبلی، رابطه کلی MLEM به‌صورت رابطه ۴ حاصل می‌گردد:

$$\lambda_j^{(l+1)} = \left(\frac{\lambda_j^{(l)}}{s_j}\right)\sum_i\left(\frac{t_{ij}}{\sum_k t_{ik}\lambda_k^{(l)}}\right) \qquad (۴)$$

$$s_j = \sum_i t_{ij}$$

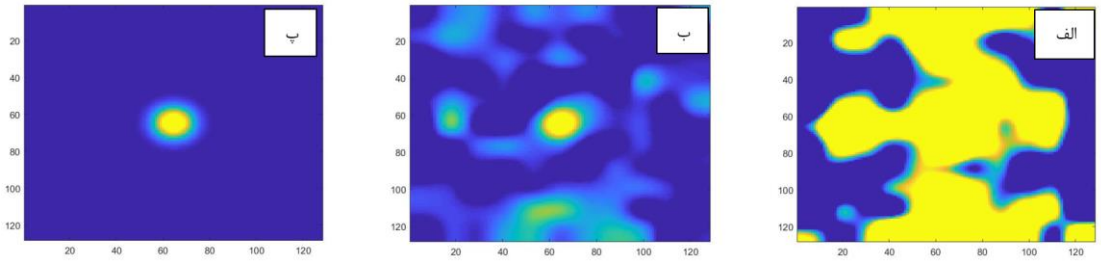
[1] Full Width at Half of Maximum

که در آن λ میزان واپاشی پیکسل jام و l نیز میزان تکرار الگوریتم و $\lambda_j^{(l)}$ حدس اولیه است. در رابطه فوق، t_{ij} احتمال تراگسیل پرتو از وکسل jام به پیکسل iام می‌باشد. s_j را نیز حساسیت دستگاه در نظر می‌گیریم که بیانگر این امر است که رویداد واپاشی شده از وکسل jام در پیکسل iام آشکارسازی گردد. $\sum_k t_{ik}\lambda_k^{(l)}$نیز بر مبنای حدس اولیه، به ازای lهای مختلف (به کمک یک تابع مقایسه‌ای) در هر مرحله تصحیح و ارتقا می‌یابد تا جایی که به نزدیک‌ترین مقدار واپاشی وکسل jام برسد [۶].

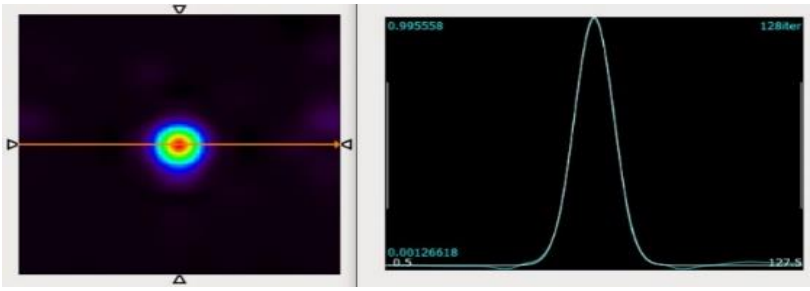
۳. نتایج

پس از ۲۸ مورد شبیه‌سازی و استخراج داده‌های صحیح، بازسازی تصویر توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شد و در ادامه برآورد FWHM توسط نرم‌افزار AMIDE انجام شد. درنهایت، داده‌های موردنیاز (جدول ۱) استخراج گردیده و در ادامه الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی با داده‌های متناسب فیت گردید. نمونه‌ای از تصاویر دوربین، تصویر بازسازی‌شده با فرآیند رمزگشایی و اعمال الگوریتم LM-MLEM جهت بهبودی تصاویر در شکل ۴ نمایش داده شده و همچنین نمونه‌ای از برآورد میزان FWHM توسط نرم‌افزار AMIDE در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به جدول ۱، با افزایش فاصله چشمه از سامانه، میزان رویدادهای تشکیل‌دهنده تصویر کاهش می‌یابند که مطابق انتظار است؛ اما ثبات قابل‌توجهی در FWHM وجود دارد. این امر نقش جدی‌تری را در اهمیت امر بهینه‌سازی ایفا می‌کند؛ چراکه اگر تغییر رفتار مشهودی وجود داشت، نیازی به اعمال بهینه‌سازی نبود و کم‌ترین میزان FWHM و بیشترین میزان رویدادهای صحیح پاسخ می‌بودند. اما باتوجه به جدول ۱، رفتار داده‌ها مقبولیت لازم جهت به‌کارگیری در امر بهینه‌سازی را دارا هستند و مناسب‌ترین فاصله که مبتنی بر متناسب‌سازی با مدل نزدیک‌ترین همسایگی است، ۱۰cm برآورد گردید.



شکل۳. تصاویر حاصل از الف: دوربین گاما، ب: رمزگشایی و پ: اعمال الگوریتم LM-MLEM.

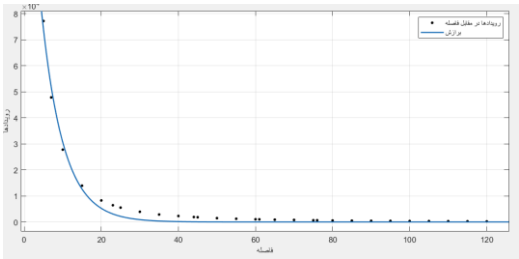


شکل۴. نمونه‌ای از نحوه محاسبه FWHM در نرم‌افزار AMIDE .

جدول۱. مقادیر FWHM و رویدادهای ثبت‌شده در هر فاصله.

فاصله (cm)	FWHM	تعداد رویدادهای صحیح (ثانیه ۱۰/#)
۵	۱۸/۶۱۱	۷۷۱۵۷
۱۰	۱۵/۵۷۸	۲۷۷۶۴
۱۵	۱۳/۲۰۵	۱۳۹۳۵
۲۰	۱۴/۱۰۷	۸۲۶۱
۲۵	۱۳/۹۸۱	۵۵۱۴
۳۰	۱۳/۹۷۵	۳۹۱۹
۳۵	۱۳/۹۳۸	۲۸۷۴
۴۰	۱۳/۹۰۹	۲۲۹۴
۴۵	۱۳/۵۵۸	۱۸۱۵
۵۰	۱۳/۹۷۳	۱۴۷۴
۵۵	۱۴/۱۳۴	۱۲۳۹
۶۰	۱۴/۲۳۳	۱۰۴۱
۶۵	۱۳/۹۲۴	۸۸۶
۷۰	۱۳/۹۵۵	۷۸۹
۷۵	۱۲/۹۹۱	۶۶۵
۸۰	۱۴/۵۵۱	۵۷۴
۸۵	۱۴/۳۱۶	۵۰۷
۹۰	۱۴/۶۱۷	۴۴۱
۹۵	۱۴.۱۲۱	۴۰۸
۱۰۰	۱۳/۹۷۸	۳۵۹
۱۰۵	۱۳/۹۸۷	۳۲۴
۱۱۰	۱۴/۰۰۵	۲۹۹
۱۱۵	۱۷/۹۱۶	۲۶۵
۱۲۰	۱۵/۹۱۶	۲۲۷
۷	۱۴/۹۸۷	۴۷۸۱۹
۲۳	۱۳/۹۵۱	۶۴۲۷
۴۴	۱۳/۸۵۷	۱۸۹۶
۶۱	۱۳/۷۶۱	۱۰۱۰
۷۶	۱۲/۹۹۱	۶۵۹

با اعمال برازش به روی منحنی عملکرد دوربین و با تغییر فاصله R-square= ۰/۹۸ برآورد گردید (شکل ۵). با توجه به تابع حاصل از برازش، جهت داشتن حداقل حساسیت مناسب فاصله دوربین طراحی‌شده از ۷۶cm نباید بیشتر باشد.



شکل۵. برازش داده‌های حاصل شده باتوجه به فواصل و حساسیت‌های مختلف.

نتیجه‌گیری

یکی از عوامل کلیدی و حائز اهمیت در تصویربرداری هسته‌ای میزان وضوح و حساسیت مناسب است. در مطالعه حاضر به بررسی نقش فاصله چشمه پرتوزا از دوربین گاما در عوامل مذکور توجه گردید؛ از پژوهش حاضر استنتاج می‌شود (جدول ۱) که در دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده نیز به‌مانند دوربین گاما متعارف (به همراه باریکه‌سازهای حفره موازی) افزایش فاصله منجر به کاهش حساسیت می‌گردد؛ حال‌آنکه به دلیل فرآیند رمزگشایی و استفاده از الگوریتم LM-MLEM این تبعیت در مورد FWHM در دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده مانند دوربین گاما متعارف نیست و میزان FWHM ثبات قابل‌توجهی دارد. اما شایان‌ذکر است که در امر بهینه‌سازی الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی، در گستره فواصل ۵ تا ۱۲۰ سانتی‌متر میان چشمه و دوربین، فاصله ۱۰ cm را به‌عنوان بهینه‌ترین فاصله جهت تصویربرداری انتخاب نمود. جهت حفظ حساسیت مناسب، فاصله دوربین طراحی‌شده از چشمه نباید بیشتر از ۷۶cm باشد و در فاصله ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر دوربین بیشترین میزان حساسیت را دارا می‌باشد.

۵. مراجع

1- N. Tsoulfanidis, Measurement and detection of radiation 4th ed, 2015, CRC Press.
2- Stella, M., et al., Gamma camera characterization at high holmium-166 activity in liver radioembolization, 2021, EJNMMI Physics volume 8, Article number: 22 .
3- R.Zhang, et al., Low-noise reconstruction method for coded-aperture gamma camera based on multi-layer perceptron,3rd ed. Volume 52, Issue 10, 2020, Pages 2250-2261.
4- S.Cherry, Sorenson, A. , Phelps, M., Physics in Nuclear Medicine, 4th editation, 2012, Elsevier.
5- M.Saha, B.Gopal, Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine,2013, springer
6- Michał J. Cie_slak, Kelum A.A. Gamage, Robert Glover, Coded-aperture imaging systems: Past, present and future Development - A review, 2016, Radiation Measurements, 92, pp:59-71.
7- Alnafea, M., Wells, K., Spyrou, N.M., Saripan, M.I., Guy, M., Hinton, P., Preliminary results from a Monte Carlo study of breast tumour imaging with lowenergy high-resolution collimator and a modified uniformly-redundant arraycoded aperture. Nucl. Instrum. Methods Phys, 2006, Res. Sect. A Accel. Spectrom .Detect. Assoc. Equip. 563 (1), 146-149.
8- Damato, A.L., Horn, B.K.P., Lanza, R.C. Coded source imaging for neutrons and X-rays, 2007, IEEE Nucl. Sci. Symposium Conf. Rec. 1, 199-203.
9- Faust, A.A., Rothschild, R.E., Leblanc, P., McFee, J.E., Development of a coded aperture X-Ray backscatter imager for explosive device detection, 2009 IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (1), 299-307.
10- Gmar, M., Agelou, M., Carrel, F., Schoepff, V., GAMPIX: a new generation of gamma camera, 2011 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 652 (1), 638-640.
11- Woodring, M., Beddingfield, D., Souza, D., Entine, G., Squillante, M., Christian, J., Kogan, A., Advanced multi-dimensional imaging of gamma-ray radiation. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc, 2003 Equip. 505 (1-2), 415-419.
12- Jan, S, Santin, G, Strul, D, Staelens, S, Assié, K, Autret, D, Avner S, Barbier R, Bardiès, M, Bloomfield, P, Brasse, D, Breton, V, Bruyndonckx, P, Buvat, I, Chatziioannou, F, Choi, Y, Chung, H, Comtat, C, Donnarieix, D, Ferrer, L, Glick, J, Groiselle, J, Guez, D, Honore, F, Kerhoas-Cavata, S, Kirov, S, Kohli, V, Koole, M, Krieguer, M, van der Laan, J, Lamare, F, Largeron, G, Lartizien, C, Lazaro, D, Maas, C, Maigne, L, Mayet, F, Melot, F, Merheb, C, Pennacchio, E, Perez, J, Pietrzyk, U, Rannou FR, Rey M, Schaart DR, Schmidtlein CR, Simon L, Song TY, Vieira JM, Visvikis D, Van de Walle, R, Wieërs, E, Morel, C, GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT. Phys Med Biol, 2004, Volume 49, Issue 19, pp 4543-61.
13- Zeng, G, Medical Image Reconstruction, 2010, Heidelberg.
14- A. Loening, S. Gambhir, "AMIDE: A completely free system for medical imaging data analysis", 2001, Journal of Nuclear Medicine, 42(5):192P.
15- D. Alexiev, *Member*, "Comparison of LaBr Ce and LaCl Ce With NaI(Tl) and Cadmium Zinc Telluride (CZT) Detectors", 2008, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE,55(3),1174-1177.