

شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانه تصویرگر گامای حفرة کدگذاری شده با میدان دید وسیع

سید محمدرضا هاشمی، پرویز حسینخانی* و حمیدرضا شکور

دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، کدپستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱.

پست الکترونیکی: smr.hashemi329@gmail.com

چکیده

مکان‌یابی دقیق مواد پرتوزا در تصویربرداری هسته‌ای امری بسیار مهم است. ایمنی و امنیت در برابر تهدید فزاینده حملات با استفاده از مواد پرتوزا، نظارت بر مرزها، تروریسم و همچنین افزایش تعداد نیروگاه‌های هسته‌ای، توسعه یک سیستم قابل اتکا جهت تصویربرداری از طیف وسیع پرتوهای گاما در فواصل مختلف را ضروری می‌سازد؛ تا بتواند منابع پرتوایی را در زمانی مناسب شناسایی و در میدان دید جایگزیده کند. مواد پرتوزا در پزشکی، آزمایش‌های غیر مخرب، سلاح‌های هسته‌ای، تولید برق و غیره استفاده می‌شوند. مزیت اصلی تصویربرداری با حفرة‌های کدگذاری شده (CAI) نسبت به سایر روش‌های تصویربرداری به دلیل حفرة‌های متعددی است که میزان فوتون‌های ورودی به آشکارساز را افزایش می‌دهند و در نتیجه تصویری بهتر و البته پیچیده‌تر را ایجاد می‌کنند. پس از فرآیند رمزگشایی، با اعمال الگوریتم MLEM وضوح به مراتب افزایش می‌یابد. در این مقاله، شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفرة‌های کدگذاری شده MURA به صورت موزاییکی، در کد GATE برای تصویربرداری از چشمه‌های سزیوم-۱۳۷ و امرسیوم-۲۴۱ توسط آشکارساز NaI(Tl) با ابعاد $27 \times 27 \times 27 \text{ cm}^3$ صورت پذیرفته و توان تفکیک این سامانه برای دو چشمه مذکور، در فاصله ۳ متری از دوربین بررسی و توان تفکیک زاویه‌ای به میزان مناسبی حاصل شده است (حدود ۷ درجه)؛ در ادامه نیز حداقل دوز معادل جهت تصویربرداری در فاصله ۱۰ متر برای چشمه سزیوم-۱۳۷، $0.1179 \frac{nSv}{hr}$ (با فعالیت چشمه ۶ میکروکوری) برآورد گردیده است و میزان سیگنال به نوفه پایین در این فاصله، برابر با ۳/۱۰ گردید و با اعمال الگوریتم MLEM مقدار آن ۱۷/۹۶ شد. اهمیت این پژوهش متکی بر مطالعه محلی‌سازی چشمه پرتوزا به‌ویژه در خلال خلع سلاح هسته‌ای، رصد مرزها و رفع آلودگی است؛ چرا که اغلب مکان واقعی چشمه پرتوزا ناشناخته است.

کلیدواژگان : دوربین گاما، تصویربرداری هسته‌ای، حفرة‌های کدگذاری شده، GATE، MLEM.

۱. مقدمه

مکان‌یابی دقیق مواد پرتوزا در تصویربرداری هسته‌ای از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. ایمنی و نظارت در برابر تهدیدهای فزاینده حملات با استفاده از مواد پرتوزا، نظارت بر مرزها، تروریسم و همچنین افزایش تعداد نیروگاه‌های هسته‌ای، توسعه یک سیستم قابل اتکا جهت تصویربرداری از طیف وسیع پرتوهای گاما در فواصل مختلف را ضروری می‌کند؛ تا بتواند

منابع پرتوزایی را در زمانی مناسب شناسایی و در میدان دید محلی سازی (جای‌گزیده در میدان دید) کند. مواد پرتوزا در پزشکی، آزمایش‌های غیر مخرب، سلاح‌های هسته‌ای، تولید برق و غیره استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال، سوخت هسته‌ای که در تولید برق استفاده می‌شود، زباله‌های هسته‌ای تولید می‌کند که باید با دقت دفع شوند زیرا برای مدتی پرتوزایی مربوط به خود را انجام می‌دهند. اگر منبع پرتوزایی به‌طور دقیق شناسایی و محلی‌سازی نشده باشد، پرتوهای ساطع شده از این مواد می‌تواند برای سلامتی پرسنلی که در مجاورت این مواد هستند خطری ایجاد کند. محلی‌سازی به‌ویژه در خلال خلع سلاح هسته‌ای، رصد مرزها و رفع آلودگی حائز اهمیت است (مکان حقیقی چشمه پرتوزا در زباله‌های هسته‌ای اغلب ناشناخته است). پرتوهای بسیار نافذ ممکن است به شکل فوتون‌های پرتو ایکس، گاما یا نوترون‌های آزاد منتشر شوند [۱]. با توجه به موارد مذکور، تحقیق و توسعه در زمینه تصویربرداری هسته‌ای به‌ویژه رصد پرتوهای گاما با انرژی و فعالیت‌های مختلف حائز اهمیت است.

پرتوهای گاما برخلاف فوتون‌های نور مرئی، قابل انعکاس و کانونی شدن نیستند. با توجه به همین امر تصاویر در دوربین گاما به‌وسیله حذف اثر فوتون‌های پراکنده، تشکیل می‌شوند. پرتوهای گسیل شده (از چشمه پرتوزا) لازم است از حفره‌های باریکه‌ساز عبور کنند تا به آشکارساز برسند. پرتوهای گامایی که به جداره‌های باریکه‌ساز برخورد می‌کنند غالباً جذب می‌شوند، در نتیجه تنها پرتوهای گامایی که به‌صورت مستقیم از محور باریکه‌ساز عبور می‌کنند در تصویر ظاهر می‌شوند. برای باریکه‌سازهایی که در پزشکی هسته‌ای به کار گرفته می‌شوند تنها در محدوده یک به ده هزار از تابش‌های گامای گسیلی، از میان باریکه‌ساز عبور می‌کنند. بنابراین طرح هندسی باریکه‌ساز، تاثیر قابل توجهی در عملکرد دوربین گاما خواهد گذاشت. باریکه‌ساز صرفاً توان تفکیک دوربین را تعیین نمی‌کند بلکه

عامل اصلی ایجاد محدودیت در میزان شمارش‌های ردیابی شده نیز می‌باشد [۲].

باریکه‌سازها، پرتوهای گسیل شده از چشمه را محدود می‌کنند، به‌گونه‌ای که هر نقطه در تصویر متناظر با یک نقطه منفرد در چشمه است. باریکه‌سازهای موازی از روزنه‌های موازی حفر شده در سرب و یا از فویل‌های سربی تشکیل شده‌اند. دیواره‌های سربی در میان روزنه‌هایی قرار دارند و سپتا نامیده می‌شوند. ضخامت سپتا به طریقی انتخاب می‌گردد که پرتو گامایی که وارد حفره باریکه‌ساز شده، قادر به عبور از دیواره آن نشود و قابلیت نفوذ در حفره مجاور را نداشته باشد. برخی از باریکه‌سازها معمولاً شکننده هستند و ممکن است در طول زمان دچار آسیب شوند [۲].

عوامل زیادی در باریکه‌سازها باعث کاهش کیفیت عملکرد دوربین می‌گردند. از جمله این موارد می‌توان به نفوذ سپتا (نفوذ تابش از ضخامت باریکه‌ساز)، برآورد ابعاد میدان دید متناسب با طرح شکاف باریکه‌ساز در تصویر، محدودیت وزنی (که توسط حائل دوربین تحمیل می‌شود)، ضخامت کمینه برای سپتا و تأثیرات پراکندگی در باریکه‌ساز، اشاره کرد. اگر یک باریکه‌ساز به‌صورت مناسبی طراحی شده باشد، این تأثیرات فرعی به میزان کم‌تری در تصویر نهایی تأثیر خواهد گذاشت. غالب باریکه‌سازهای رایج از یک صفحه سربی شامل تعداد زیادی حفره (کانال) کاملاً یک‌پارچه تشکیل شده‌اند [۲].

در حالت کلی دوربینی با حساسیت بالا تعداد زیادی فوتون را می‌تواند آشکارسازی کند (حفره‌هایی بزرگ و سپتا نازک) و دوربینی با حساسیت پایین تعداد فوتون‌های کم‌تری را خواهد کرد [۲].

عملکرد یک باریکه‌ساز با دو عامل حساسیت و توان تفکیک تعیین می‌شود. اگر باریکه‌ساز شکاف موازی باشد و نفوذ قابل ملاحظه‌ای برای پرتوها نداشته باشد و همچنین میزان توان تفکیک شکاف آن، نسبت به میزان توان تفکیک دوربین

راکتور دایچی در ژاپن در سال ۲۰۱۱ مورد توجه بیش تر محققان این حوزه قرار گرفتند [۱۴،۱۳].

در این مقاله، برای اولین بار در کشور یک سامانه دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده (با ضخامت‌های مختلف) با ساختار موزاییکی در کد مونت کارلوی^۳ GATE [۱۵] جهت تصویربرداری از چشمه‌های سزیوم-۱۳۷ و امرسیوم-۲۴۱ طراحی گردیده است. پس از رمزگشایی تصویر حاصل شده، به کمک الگوریتم^۳ MLEM [۱۶] نوفه‌زدایی صورت پذیرفته است؛ همچنین توان تفکیک دوچشمه در فاصله ۳ متری از دوربین و همچنین تصویربرداری تا فاصله ۱۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفته است تا کم‌ترین فعالیت چشمه جهت تصویربرداری صحیح مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پارامترهای توان تفکیک زاویه‌ای و حداقل دز معادل جهت تصویربرداری در فاصله ۱۰ متر برای چشمه سزیوم-۱۳۷، نیز ارزیابی گردیده است.

۲. طراحی و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده^۴ MURA به صورت موزاییکی، در نرم افزار GATE که یک چارچوب مبتنی بر GEANT4 است صورت پذیرفت. تصویربرداری از چشمه‌های سزیوم-۱۳۷ و امرسیوم-۲۴۱ توسط آشکارساز NaI(Tl) با ابعاد $27 \times 27 \times 2$ سانتی‌متر مکعب صورت پذیرفته و حفره‌های کدگذاری شده از جنس سرب نیز با ابعاد حفره 0.73×0.73 سانتی‌متر مربع و با ضخامت‌های 0.6 و 1.2 سانتی‌متر با آرایه‌هایی با الگوی رتبه ۱۹ MURA و به صورت موزاییکی 2×2 در مقابل آشکارساز قرار گرفت. فاصله حفره‌های کدگذاری شده با آشکارساز نیز برابر با

کم‌تر باشد، این دو عامل جهت نشان دادن عملکرد باریکه‌ساز کافی هستند. توان تفکیک معمولاً به صورت کوچکترین فاصله جدایی دو چشمه نقطه‌ای که از همدیگر قابل تشخیص باشند، تعریف می‌شود. این کمینه جدایی به شدت وابسته به فاصله چشمه از صفحه تصویربرداری است [۲]. جایگزینی دوربین حفره منفرد با یک نسخه چند حفره‌ای، کیفیت تصاویر به دست آمده را بهتر می‌کند [۱]. تصویربرداری با حفره‌های کدگذاری شده روشی است که در دوربین‌ها و تلسکوپ‌های پرتو ایکس به کار گرفته می‌شود و به طور گسترده در مأموریت‌های اکتشاف فضایی متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳، ۴، ۵]. تصویربرداری حفره کدگذاری شده (CAI) از روشی بهره برده که کاملاً اعتبارسنجی شده است و امکان دریافت سیگنال مناسب با توجه به طراحی و بهینه‌سازی ابعاد حفره‌ها، ضخامت، نوع ماده، ابعاد ماسک و غیره وجود دارد؛ همچنین قابلیت آزمایش ماسک طراحی شده با نور مرئی و تابش انرژی بالا نیز امکان پذیر بوده و در نتیجه زمینه‌های زیادی جهت بهینه‌سازی وجود دارد. با توجه به ویژگی‌های مشابه با پرتو ایکس، روش حفره‌های کدگذاری شده در تصویربرداری از پرتوهای گاما برای کاربردهای پزشکی [۶]، آزمایش‌های غیر مخرب [۷]، تشخیص مواد منفجره [۸] و همچنین برای از کار انداختن و رفع آلودگی هسته‌ای نیز استفاده شده است. نمونه‌هایی از سامانه‌های دوربین گاما با حفره‌های کدگذاری شده ساخته شده توسط شرکت‌های مختلف شامل GAMPIX [۹] و RADCAM [۱۰] هستند. این روش، برای محلی‌سازی چشمه نوترون، در زمینه امنیت ملی [۱۱] و تشخیص مواد هسته‌ای در تأسیسات چرخه سوخت [۱۲] نیز استفاده شده است. لازم به ذکر است سامانه‌های دوربین گاما قابل حمل پس از حادثه

³ Maximum-likelihood expectation maximization

⁴ Modified Uniformly Redundant Array

¹ Coded Aperture Imaging

² Geant4 Application for Tomographic Emission

تصویر، تقسیم بر انحراف معیار استاندارد تصویر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$SNR = \frac{\max(I) - \text{mean}(I)}{\sigma(I)}, \quad (2)$$

همچنین جهت ارزیابی نرخ دز معادل به منظور ارزیابی کمینه دز معادل مربوط به چشمه سزیوم-۱۳۷ در هوا که سامانه طراحی شده قابلیت تصویربرداری از آن را داراست نیز از رابطه ۳ استفاده گردید [۱۹]:

$$\text{Dose Rate} = \frac{\Gamma \times A}{L^2}, \quad (3)$$

در این رابطه، Γ عامل گاما (برای چشمه سزیوم-۱۳۷ برابر با ۰٫۰۸۱)، A فعالیت (برحسب گیگابکرل) و L فاصله (برحسب متر) بوده و نرخ دوز حاصل نیز براساس میلی سیورت بر ساعت ($\frac{mSv}{hr}$) است.

۳. بازسازی تصویر

ماسک‌های MURA توسط یک الگوی خاص تولید می‌شوند به همین منظور کارآیی جمع‌آوری سیگنال در آنها، نسبت به ماسکی با همان اندازه ولی با حفره‌هایی که با فاصله تصادفی توزیع شده‌اند مناسب‌تر است [۱].

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \cdot & i = 1, j \neq 1 \\ 1 & c_p(i) * c_p(j) = 1 \\ \cdot & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (4)$$

$$c_p(i) = \begin{cases} 1 & \text{اگر عدد صحیح } x \text{ وجود داشته باشد که شرط} \\ & 1 \leq x < p \text{ برقرار باشد به طوری که } i \equiv x^2 \\ -1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (5)$$

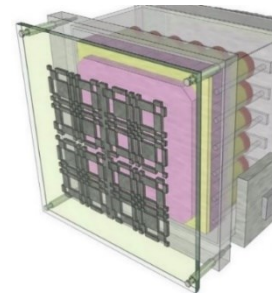
$$G_{ij} = \begin{cases} 1 & i \oplus j = 2 \\ 1 & A_{ij} = 1, i \oplus j \neq 2 \\ \cdot & A_{ij} = 0, i \oplus j \neq 2 \end{cases} \quad (6)$$

فرآیند تولید یک الگوی ماسک MURA با این منطق محاسبه می‌شود که در آن A نشان‌دهنده ماسک است که با

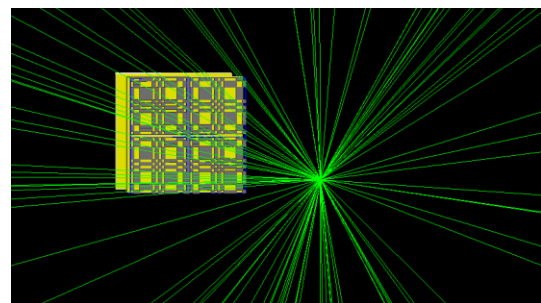
۶ cm در نظر گرفته شد. با توجه به رابطه ۱ توان تفکیک مکانی سامانه کم‌تر از ۶٫۹۷ درجه نخواهد بود.

$$\Theta = \frac{D}{L}, \quad (1)$$

در این رابطه، D عرض یک آرایه (حفره) و L نیز فاصله حفره‌های کد گذاری شده تا آشکارساز است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب سامانه طراحی شده را به صورت مفهومی و همچنین در کد GATE نشان می‌دهند. انتخاب ابعاد در طراحی مورد مطالعه براساس طراحی لی و همکاران [۱۷] است. لذا با توجه به هندسه شبیه سازی میدان دید حدود ۱۰۰ درجه خواهد بود (در فاصله ۳ متر، حدود ۷×۷ مترمربع و در فاصله ۱۰ متر، حدود ۲۳×۲۳ مترمربع).



شکل (۱): نمای مفهومی دوربین گاما به همراه حفره‌های کدگذاری شده.



شکل (۲): نمایی از شبیه‌سازی سامانه دوربین گاما به همراه حفره‌های

کدگذاری شده و چشمه در کد GATE.

کمیت نسبت سیگنال به نوفه که از رابطه ۲ به دست می‌آید جهت ارزیابی تصاویر مورد استفاده قرار گرفت. این نسبت برای هر تصویر برابر با اختلاف بیشینه مقدار تصویر و مقدار متوسط

در این رابطه l مرتبه تکرار الگوریتم و $\lambda_j^{(l)}$ حدس اولیه است. در رابطه فوق، t_{ij} احتمال تراگسیل پرتو از پیکسل l ام از فضای چشمه به پیکسل l ام در فضای تصویر است. S_j نیز تعداد شمارش انجام شده در پیکسل l ام [۲] است.

۴. نتایج

ارزیابی عملکرد سامانه طراحی شده در شرایط و مواضع مختلف انرژی، موقعیت و فعالیت چشمه (ها) مورد بررسی قرار گرفت. مدت زمان تصویربرداری ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شد و میزان وضوح زاویه‌ای و نسبت سیگنال به نوفه مورد بررسی قرار گرفت.

۱.۴. چشمه نقطه‌ای خارج از محور

در ابتدا جهت بررسی قابلیت سامانه تصویربرداری طراحی شده جهت تصویربرداری در میدان دید با زوایای مختلف یک چشمه سزیوم-۱۳۷ با فعالیت ۱۸۷ میکروکوری، در موقعیت (۲۸۲ cm و ۱۰۳) جهت ایجاد زاویه ۲۰ درجه نسبت به محور عمود بر دوربین (محور Z) و موقعیت (۲۳۰ cm و ۱۹۳) جهت ایجاد زاویه ۴۰ درجه در نظر گرفته شد. تصاویر خام حاصل از دوربین، تصویر رمزگشایی و تصویر نوفه‌زدایی شده توسط الگوریتم MLEM برای زوایای ۲۰ و ۴۰ درجه، به ترتیب در اشکال ۳ و ۴ در نمای ۳۰۰ در ۳۰۰ پیکسلی نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که در تصاویر مشخص است برای چشمه در موقعیت ۲۰ درجه، چشمه در موقعیت ۲۶،۳۳ درجه (۶،۳۳ درجه خطا) و برای موقعیت ۴۰ درجه نیز در موقعیت برابر با ۴۵،۳۸ درجه (۵،۳۸ درجه خطا) ثبت گردید. خطای گزارش شده در مقاله لی و همکاران [۲۶] که به صورت تجربی پیاده‌سازی شده است در تصویربرداری ۲۰ درجه، ۸،۶ درجه است؛ البته با توجه به کار

معادله ۴ و ۵ محاسبه می‌شود و G آرایه رمزگشایی بوده و توسط معادله ۶ محاسبه می‌شود. i و j اعدادی هستند که موقعیت مکانی را در آرایه A (ماسک MURA) نشان می‌دهند، G ماسک رمزگشایی است، \oplus برای مدول p (رتبه ماسک، که در این طراحی ۱۹ در نظر گرفته شده است).

در رابطه ۶ به این صورت تعریف می‌شود [۱]:

اگر $i \oplus j = i + j$ در $1 \leq i + j \leq p$ در غیر این صورت باقی مانده تقسیم $(i + j)/p$ می‌باشد.

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.

کد بازسازی تصویر (فرآیند رمز گشایی) با فرآیند زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱. دریافت سیگنال (Re) حاصل از آشکارساز (توسط شبیه‌سازی)
۲. ضرب نمودن مزدوج انتقال فوریه سریع (FFT) سیگنال آشکارساز (Re) و FFT آرایه رمزگشایی (G).
۳. محاسبه تبدیل عکس فوریه (سریع).
۴. انتقال اولین عنصر آرایه به صورت دایره‌ای به مرکز و چرخش ۱۸۰ درجه آن [۱].

۱.۳. الگوریتم MLEM

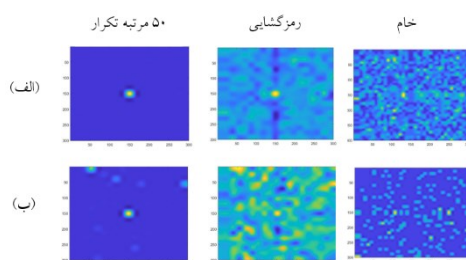
به منظور نوفه زدایی جهت بهبود تصویر حاصل از حفره‌های کد گذاری شده، از الگوریتم پیشنهادی توسط کارسون^۱ و لنگ^۲ که از رویکرد تکرار جهت بیشینه سازی انتظاری، برای دستیابی به بیشینه مقدار تابع احتمال [۱۰] استفاده می‌کند، استفاده شده است. در این روش، میزان شدت پیکسل l ام از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$\lambda_j^{(l+1)} = \left(\frac{\lambda_j^{(l)}}{\sum_j t_{ij}} \right) \sum_{i,j} \left(\frac{t_{ij} S_j}{\sum_k t_{ik} \lambda_k^{(l)}} \right) \quad (7)$$

² Lange

¹ Carson

شبیه‌سازی‌های دیگری در فواصل ۳، ۵ و ۷ متری نیز با فعالیت به‌دست آمده صورت پذیرفت. نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول ۱، با افزایش فاصله چشمه از سامانه، نسبت سیگنال به نوفه کاهش پیدا می‌کند. برای نمونه تصاویر حاصل از آشکارساز، رمزگشایی و اعمال ۵۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM برای فواصل ۳ و ۱۰ متری در شکل ۵ نمایش داده شده است؛ با توجه به مقادیر موجود در جدول ۱، با افزایش فاصله کاهش نسبت سیگنال به نوفه یا به بیانی افزایش نوفه حاصل خواهد شد.



شکل (۵): بازسازی تصاویر حاصل از شبیه‌سازی چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ (در فواصل الف) ۳ متری و ب) ۱۰ متری از راست به چپ تصاویر حاصل از آشکارساز، رمزگشایی و ۵۰ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM.

جدول (۱): تغییر میزان نسبت سیگنال به نوفه تصاویر حاصل از رمزگشایی و تکرار ۵۰ مرتبه تصاویر حاصل از شبیه‌سازی چشمه

نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ با فعالیت ۶ میکروکوری.

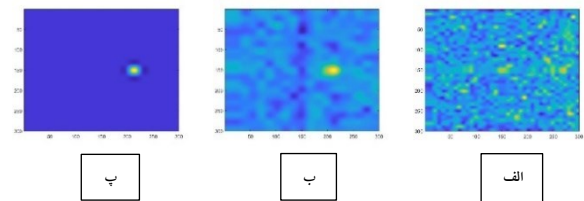
نوع تصویر / فاصله (متر)	رمزگشایی	تکرار ۵۰ مرتبه
۳	۶,۶۸	۲۳,۲۰
۵	۵,۲۰	۲۳,۱۹
۷	۳,۸۶	۲۲,۷۱
۱۰	۳,۱۰	۱۷,۹۶

۳.۴. دو چشمه نقطه‌ای در فواصل مختلف نسبت به

یکدیگر

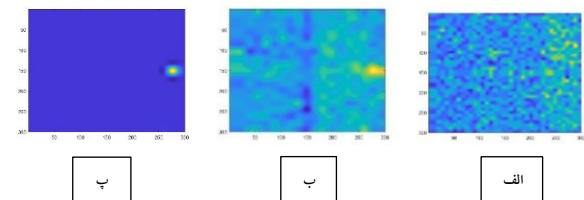
دو چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ در یک طراحی و در مورد دیگر دو چشمه نقطه‌ای امرسیوم-۲۴۱ جهت ارزیابی توان تفکیک مکانی سامانه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

شبیه‌سازی چنین انتظاری می‌رفت که خطا نسبت به کار تجربی کم‌تر باشد. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل شده در تصویر بازسازی شده در میدان دید برابر با $7 \times 7 \text{ m}^2$ و دارای گستره زاویه‌ای ۱۰۰ درجه حاصل شده‌اند (در فاصله ۳ متری آشکارساز از چشمه) چرا که در حالت عادی برای یافتن چشمه در مکانی مجهول از موقعیت چشمه در میدان دید، اطلاعی در دست نیست؛ به همین منظور محاسبات در یک میدان دید از پیش تعریف شده مد نظر قرار می‌گیرد.



شکل (۳): بازسازی تصاویر حاصل از شبیه‌سازی چشمه سزیوم-۱۳۷ در زاویه ۲۰ درجه. الف) تصویر خام حاصل از آشکارساز ب) تصویر رمزگشایی شده ب) تصویر حاصل از ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم

MLEM



شکل (۴): بازسازی تصاویر حاصل از شبیه‌سازی چشمه سزیوم-۱۳۷ در زاویه ۴۰ درجه. الف) تصویر خام حاصل از آشکارساز ب) تصویر رمزگشایی شده ب) تصویر حاصل از ۱۰۰ مرتبه تکرار الگوریتم

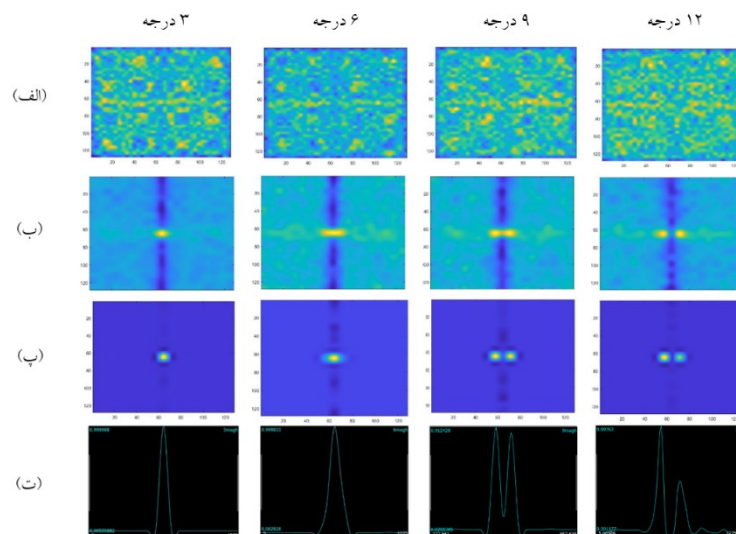
MLEM

۲.۴. چشمه نقطه‌ای در فواصل مختلف

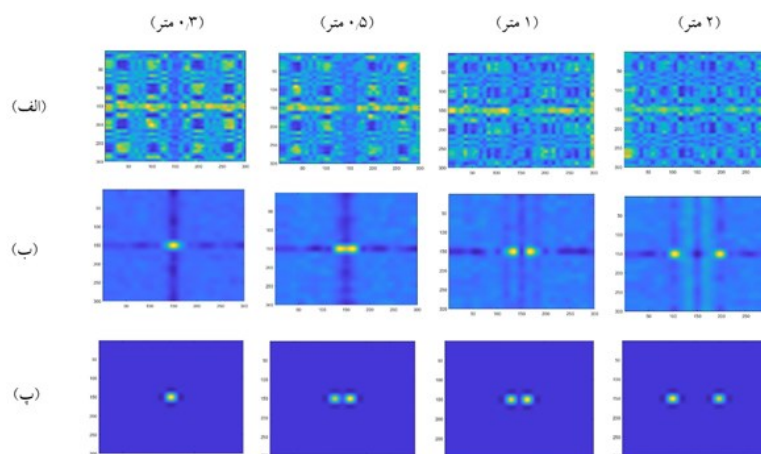
تصویربرداری از چشمه سزیوم-۱۳۷ در فاصله ۱۰ متری با فعالیت‌های مختلف، جهت برآورد کمینه فعالیت قابل آشکارسازی در فاصله ۱۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ماسک با ضخامت $1/2$ سانتی‌متر، کم‌ترین فعالیت قابل تصویربرداری، در فاصله ۱۰ متری، برابر با ۶ میکروکوری برآورد گردید. بعد از تعیین کم‌ترین فعالیت قابل تصویربرداری،

در این مقاله علاوه بر چشمه سزیوم-۱۳۷، برای چشمه امرسیوم-۲۴۱ نیز همین روند پیاده‌سازی گردید؛ به گونه‌ای که این دو چشمه با فعالیت ۲۰ میکروکوری در مدت زمان ۳۰ ثانیه، در فواصل ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۳ متر به ترتیب با اختلاف زاویه ۳۶/۸۷، ۱۸/۹۲، ۹/۵۲ و ۵/۷۲ درجه در فاصله ۳ متری از دوربین قرار گرفتند. پاسخ دوربین نسبت به شبیه‌سازی در شکل ۷ هویدا است و مطابق با انتظار سامانه قادر به تفکیک فاصله دو چشمه برابر با ۰/۳ متر در فاصله ۳ متری نیست.

مطابق با کار تجربی لی و همکاران [۲۶] برای دو چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ با فعالیت‌های ۸۱/۷ و ۸۲/۹ میکروکوری، شبیه‌سازی به مدت ۶۰ ثانیه، با فواصل دوچشمه ۱۵/۷، ۳۱/۴، ۴۷/۲ و ۶۳ سانتی‌متر به ترتیب با زاویه تفکیک دوچشمه ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درجه و فاصله دوچشمه از دوربین برابر با ۳ متر اجرا گردید و نتایج نیز کاملاً در تأیید شواهد تجربی آنها است چرا که مطابق انتظار از رابطه ۱، فاصله زاویه‌ای ۶ درجه بین دوچشمه را سامانه تمیز نمی‌دهد. شکل ۶ گویای رفتار دوربین در زوایای مختلف است.



شکل (۶): بازسازی تصاویر حاصل از شبیه‌سازی دو چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ در فاصله زاویه‌ای ۱۲، ۹، ۶ و ۳ درجه به ترتیب از راست به چپ در (الف) تصاویر خام حاصل از آشکارساز (ب) تصاویر رمزگشایی شده (پ) تصاویر حاصل از ۵ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM (ت) پروفایل عبوری از مرکز.



شکل (۷): بازسازی تصاویر حاصل از شبیه‌سازی دو چشمه نقطه‌ای امرسیوم-۲۴۱ در فواصل ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۳ متری به ترتیب از راست به چپ در (الف) تصاویر خام حاصل از آشکارساز (ب) تصاویر رمزگشایی شده (پ) تصاویر حاصل از ۵ مرتبه تکرار الگوریتم MLEM.

با توجه به جدول ۲ نیز می‌توان تأثیر اعمال الگوریتم MLEM را بر تصاویر یافت که به چه میزان در افزایش سیگنال به نوفه نقش ایفا می‌کنند.

جدول (۲): تغییر میزان نسبت سیگنال به نوفه تصاویر حاصل از رمزگشایی و تکرار ۵ مرتبه تصاویر حاصل از شبیه‌سازی دو چشمه نقطه‌ای سزیوم-۱۳۷ در اختلاف زاویه‌ای مختلف نسبت به یکدیگر.

رمزگشایی	تکرار ۵ مرتبه	نوع تصویر فاصله (درجه)
۶,۵۷	۱۷,۴۸	۱۲
۵,۹۰	۱۴,۷۹	۹
۵,۹۵	۱۶,۸۳	۶
۸,۴۱	۲۲,۸۵	۳

جدول (۳): تغییر میزان نسبت سیگنال به نوفه تصاویر حاصل از رمزگشایی و تکرار ۵ مرتبه تصاویر حاصل از شبیه‌سازی دو چشمه نقطه‌ای امرسیوم-۲۴۱ در فواصل مختلف نسبت به یکدیگر.

رمزگشایی	تکرار ۵ مرتبه	نوع تصویر فاصله (متر)
۹,۴۷	۱۷,۵۴	۲
۹,۸۴	۱۷,۵۷	۱
۹,۰۶	۱۸,۰۳	۰,۵
۱۳,۳۱	۲۳,۲۰	۰,۳

با توجه به جداول ۲ و ۳ در فاصله کم‌تر از توان تفکیک سامانه، که دوربین قادر به تمییز دادن دو چشمه نیست و چشمه به‌صورت نقطه‌ای پدیدار می‌گردد؛ بیش‌ترین میزان نسبت سیگنال به نوفه پدیدار می‌گردد؛ که فاقد اعتبار است؛ اما در بازه‌ای که تفکیک صورت می‌پذیرد، سامانه رفتار سیگنال به نوفه مناسبی را با توجه به موارد مختلف، نشان‌گر است و افزایش میزان سیگنال به نوفه با اعمال الگوریتم MLEM مشهود است.

مشاهده می‌شود که در فاصله زاویه‌ای ۶ درجه برای سزیوم-۱۳۷ و فاصله ۳۰ سانتی‌متر برای چشمه امرسیوم-۲۴۱ (۵/۷۲ درجه) سامانه قادر به تمییز دادن دو چشمه نیست، با توجه به محاسبه انجام شده در بخش طراحی سامانه و شبیه‌سازی (بخش ۲) نیز چنین انتظاری می‌رفت چراکه توان تفکیک سامانه طراحی شده معادل با ۶,۹۷ درجه برآورد گردید؛ پس طبیعی است که سامانه در اختلاف زاویه‌ای کم‌تر از این مقدار امکان تفکیک را ندارد و با نتایج حاصل شده نیز مطابقت لازم را دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سامانه‌ی تصویرگر پرتو گاما توسط حفره‌های کدگذاری شده جهت تصویربرداری از یک ناحیه با میدان دید وسیع مورد بررسی قرار گرفت.

این سامانه عملکرد مناسبی در تصویربرداری از دو چشمه سزیوم-۱۳۷ و امرسیوم-۲۴۱ به لحاظ وضوح مکانی با توان تفکیکی در حدود ۷ درجه را به نمایش گذاشت؛ همچنین استفاده از الگوریتم MLEM بر افزایش میزان نسبت سیگنال به نوفه عملکرد موفقی داشت؛ چرا که رمزگشایی به تنهایی نوفه زیادی ایجاد نموده که این امر توسط روش تکرار تصحیح گردیده است (جداول ۱، ۲ و ۳).

تصویربرداری با حفره‌های کدگذاری شده تا فاصله ۱۰ متر نیز بررسی گردید و کم‌ترین فعالیت مربوطه در این فاصله نیز $6 \mu\text{Ci}$ که دز معادل آن برابر با $\frac{nSv}{hr}$ ۰,۱۷۹ است، برآورد گردید.

۶. مراجع

1. M. G. Cieślak, A. A. Kelum, R. Glover. Coded-aperture imaging systems: Past, present and future Development - A review. *Radiat. Measurements* 92 (2016) 59-71.
2. M. N. Wernick, J. N. Aarsvold. *Emission Tomography: The Fundamentals of PET and SPECT*. Elsevier academic press, Boston, 2004.
3. J. Hong, S. V. Vadawale, M. Zhang, E. C. Bellm, A. Yousef, J. Noss, J. E. Grindlay, T. Narita. Laboratory coded aperture imaging experiments: radial hole coded masks and depth-sensitive CZT detectors. In: Res. Sect. A Proceedings SPIE, Hard X-ray and Gamma-Ray Detector Physics VI 5540 (2004) pp. 1-10.
4. N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K. O. Mason, J. A. Nousek, A. A. Wells, N. E. White, S. D. Barthelmy, D. N. Burrows, L. R. Cominsky, K. C. Hurley, F. E. Marshall, P. Mészáros, P. W. A. Roming, L. Angelini, L. M. Barbier, T. Belloni, P. T. Boyd, S. Campana, P. A. Caraveo, M. M. Chester, O. Citterio, T. L. Cline, M. S. Cropper, J. R. Cummings, A. J. Dean, E. D. Feigelson, E. E. Fenimore, D. A. Frail, A. S. Fruchter, G. P. Garmire, K. Gendreau, G. Ghisellini, J. Greiner, J. E. Hill, S. D. Hunsberger, H. A. Krimm, S. R. Kulkarni, P. Kumar, F. Lebrun, N. M. Lloyd-Ronning, C. B. Markwardt, B. J. Mattson, R. F. Mushotzky, J. P. Norris, B. Paczynski, D. M. Palmer, H. -S. Park, A. M. Parsons, J. Paul, M. J. Rees, C. S. Reynolds, J. E. Rhoads, T. P. Sasseen, B. E. Schaefer, A. T. Short, A. P. Smale, I. A. Smith, L. Stella, M. Still, G. Tagliaferri, T. Takahashi, M. Tashiro, L. K. Townsley, J. Tueller, M. J. L. Turner, M. Vietri, W. Voges, M. J. Ward, R. Willingale, F. M. Zerbi, W. W. Zhang. The swift gamma ray burst mission. *Astrophysical J.* 611 (2) (2004) 1005-1020.
5. T. Tumerl, T. J. O. Neill, K. Hurley, H. Ogelman, R. J. Paulos, R. C. Puettefl, I. Qpniss, W. J. Hamilton, R. Proctor. All-sky x-ray & gamma-ray astronomy monitor (AXGAM). *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (3) (1997) 572-576.
6. M. Alnafea, K. Wells, N. M. Spyrou, M. I. Saripan, M. Guy, P. Hinton. Preliminary results from a Monte Carlo study of breast tumour imaging with lowenergy high-resolution collimator and a modified uniformly-redundant array coded aperture. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 563 (1) (2006) 146-149.
7. A. L. Damato, B. K. P. Horn, R. C. Lanza. Coded source imaging for neutrons and X-rays. *IEEE Nucl. Sci. Symposium Conf. Rec.* 1 (2007) 199-203.
8. A. A. Faust, R. E. Rothschild, P. Leblanc, J. E. McFee. Development of a coded aperture X-Ray backscatter imager for explosive device detection. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56 (1) (2009) 299-307
9. M. Gmar, M. Agelou, F. Carrel, V. Schoepff. GAMPIX: a new generation of gamma camera. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 652 (1) (2011) 638-640.
10. M. Woodring, D. Beddingfield, D. Souza, G. Entine, M. Squillante, J. Christian, A. Kogan. Advanced multi-dimensional imaging of gamma-ray radiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys.* (2003) 415-419.
11. R. S. Woolf, B. F. Philips, A. L. Hutcheson, L. J. Mitchell, E. A. Wulf. An active interrogation detection system (ACTINIDES) based on a dual fast neutron/ gamma-ray coded aperture imager for Homeland Security (HST). 2012 IEEE Conference on Technologies in Malaysian, Waltham, MA, USA (2012) pp. 30-35.
12. P. Hausladen, J. Newby, F. Liang, M. Blackston. The Deployable Fast-Neutron Coded-Aperture Imager: Demonstration of Locating One or More Sources in Three Dimensions. Oak Ridge National Laboratory is managed by UT-Battelle LLC for the US Department of Energy, 2013.
13. Y. Sato, S. Ozawa. Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Nucl. Sci. Tech.* (2017) 90-96.
14. J. Kataoka, A. Ishimoto. Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. *Nucl. Instrum. Methods* (2013) 403-407.
15. S. Jan, G. Santin, D. Strul, S. Staelens, K. Assie, D. Autret, S. Avner, R. Barbier, M. Bardies, P. M. Bloomfield, D. Brasse, V. Breton, P. Bruyndonckx, I. Buvat, A. F. Chatziioannou, Y. Choi, Y. H. Chung, C. Comtat, D. Donnarieix, L. Ferrer, S. J. Glick, C. J. Groiselle, D. Guez, P. -F. Honore, S. KerhoasCavata, A. S. Kirov, V. Kohli, M. Koole, M. Krieguer, D. J. van der Laan, F. Lamare, G. LARGERON, C. Lartizien, D. Lazaro, M. C. Maas, L. Maigne, F. Mayet, F. Melot, C. Merheb, E. Pennacchio, J. Perez, U. Pietrzyk, F. R. Rannou, M. Rey, D. R. Schaart, C. R. Schmidlein, L. Simon, T. Y. Song, J. -M. Vieira, D. Visvikis, R. Van de Walle, E. Wieers, C. Morel. GATE: a simulation toolkit for

- PET and SPECT. *Phys. Med. Biol.* 49 (2004) 4543-4561.
16. G. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 3rd ed., John Wiley, New York, 2000.
17. H. S. Lee, J. H. Kim, J. Lee, C. H. Kim. Development and performance evaluation of large-area hybrid gamma imager (LAHGI). *Nucl. Eng. Tech.* 53 (8) (2021) 2640-2645.
18. G. Montemont, O. Monnet, L. Maingault, S. Stanchina, L. Verger, F. Carrel, H. Lemaire, V. Schoepff, G. Ferrand, A. -S. Lalleman, M. Phelps. Development and evaluation of a portable CZT coded aperture gamma-camera. ANIMMA Conf. Lisbon (Portugal), 2015.
19. E. Massoud. Dose assessment for some industrial gamma sources with an application to a radiation accident. *Open J. Model. Simulat.* 2 (1) (2014) 4-11.