

ارزیابی تأثیر اندازه و جنس کریستال بر کسر پراکندگی

ارزیابی تأثیر اندازه و جنس کریستال بر روی کسر پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس در کریستالهای سیستم PET با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

سارالشکری^۱، سعید سرکار^{۲*}، محمدرضا آی^۳، آرمان رحمیم^۴

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران و مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی تهران، ایران
 - ۲- دانشیار گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران و مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی تهران، ایران
 - ۳- استادیار گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران و مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی تهران، ایران
 - ۴- استادیار گروه رادیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی جان هاپکینز، بالتی مور، آمریکا
- تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۸۷/۶/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۶/۲۳

چکیده

مقدمه: در این تحقیق از کد مونت کارلو (MCNP4C) جهت ارزیابی کمی تأثیر اندازه و جنس کریستال بر روی کسر پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس در کریستالهای سیستم PET استفاده گردید.

مواد و روشها: در راستای این ارزیابی کریستال مرکزی در هر یک از ۵ کریستال که هر کدام متشکل از آرایه های 13×13 با کریستال های $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب، با بهره گیری از یک چشمه نقطه ای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت تحت تابش قرار گرفت. توابعی همانند صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون، درصد وقایعی که دچار پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس گردیده اند و تابع نقطه گستر در کریستالهای مختلف با تغییر پارامترهایی نظیر طول، اندازه سطح و همچنین تغییر زاویه فوتون ورودی، مورد بررسی قرار گرفتند. صحت نتایج نرم افزار از طریق مقایسه با نتایج بدست آمده توسط شاووه همکارانش مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج: بر اساس نتایج شبیه سازی و آنالیز کمی نتایج بدست آمده، مشخص گردید با افزایش اندازه سطح کریستال، صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون افزایش و پراکندگی بین کریستالی کاهش پیدا می کند اما با افزایش طول کریستال، صحت تشخیص موقعیت برهمکنش کاهش و پراکندگی بین کریستالی افزایش پیدا می کند.

بحث و نتیجه گیری: با در نظر گرفتن خواص مرتبط با تضعیف فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت، می توان گفت کریستال BGO مناسبترین کریستال جهت کاهش پدیده پراکندگی بین کریستالی می باشد. اما با توجه به بالابودن میزان نور تولیدی در کریستال LSO و LYSO و همچنین سرعت میرا شدن نور در این کریستالها، این دو کریستال در بیشتر سیستمهای PET مورد استفاده قرار می گیرند. از توابع بدست آمده برای پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس، می توان در پروسه بازسازی جهت بازیافت قدرت تفکیک و بهینه کردن کیفیت تصاویر استفاده نمود. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۵، شماره ۲، پیاپی (۲۱، ۲۰)، پاییز و زمستان ۸۷: ۷۶-۶۷)

واژگان کلیدی: تعیین موقعیت، پراکندگی بین کریستالی، پارالاکس

* نویسنده مسئول: سعید سرکار

آدرس: تهران، گروه فیزیک و مهندسی پزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران
sarkar@sina.tums.ac.ir
تلفن: ۸۸۹۷۳۶۵۳ - (۲۱) ۹۸ + نمابر: ۶۶۴۶۶۳۸۳ - (۲۱) ۹۸ +

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، کمپانیهای سازنده اسکنرهای PET^۱ تلاش کرده اند تا با استفاده از کریستالهای سوسوزنی با ابعاد کوچک قدرت تفکیک مکانی^۲ سیستم را افزایش دهند که این امر منجر به افزایش پدیده پراکندگی بین کریستالی^۳، گردیده است. برای رسیدن به قدرت تفکیک مکانی بالا، بایستی سائز کریستالهای مورد استفاده در سیستم PET کوچک و کوچکتر شود. اما مشکل اساسی در رسیدن به قدرت تفکیک مکانی بالا، جذب کامل فوتون ۵۱۱ کیلوالکترون ولت در آشکارسازهایی با سطح کوچک یعنی کاهش فرار فوتونهای کامپتون به کریستالهای همسایه است. این وقایع بعنوان پراکندگی بین کریستالی شناخته شده اند که در آنها یک یا هر دو فوتون نابودی پس از برخورد و برهمکنش با کریستال تحت تابش پراکنده شده و در بیشتر از یک کریستال آشکار می شوند. پارالاکس^۴ عامل محدودکننده دیگری است که با توجه به نفوذ فوتون فرودی به کریستالهای مجاور کریستال تحت تابش رخ می دهد. بعبارت دیگر وقایعی که در آنها اولین برهمکنش فوتون پس از برخورد با کریستال تحت تابش در کریستال فوق نمی باشد پارالاکس در نظر گرفته می شوند.

یکی دیگر از عوامل کاهش کنتراست تصویر، استفاده از ماتریس انگر^۵ جهت تعیین موقعیت برخورد فوتونها به کریستال، می باشد. با توجه به اینکه هر بلوک کریستالی از تعداد زیادی کریستال (با تکنولوژی امروزه حدودا ۱۶۹= ۱۳×۱۳) که به چهار تیوپ فوتومولتی پلایر^۶ متصل شده اند، تشکیل شده است، با ماتریس انگر فقط می توان موقعیت مرکز ثقل برهمکنشهای فوتون را تخمین زد. با استفاده از این روش،

تخمین موقعیت دقیق برهمکنش فوتون با کریستال، ممکن نیست. استفاده از این روش، منجر به کاهش قدرت تفکیک مکانی و کاهش رد فوتونهای پراکنده می گردد [۱].

اخیرا محققین [۲-۴] و سازندگان [۵] با مدلسازی دقیق پدیده هایی همانند پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس که منجر به کاهش قدرت تفکیک مکانی می گردند، کیفیت تصاویر سیستم PET را بطور قابل ملاحظه ای، بهبود داده اند [۵]. از آنجا که اندازه گیری عملی پدیده پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس که در آن یک فوتون پس از ورود به کریستال، پراکنده شده و در کریستال مجاور ثبت می گردد و یا مستقیما به کریستال مجاور می رود، غیر ممکن و بسیار پرهزینه می باشد در این تحقیق از شبیه سازی مونت کارلو جهت بر آورد میزان پراکندگی بین کریستالی بصورت تابعی از جنس و اندازه کریستال، استفاده گردید. با استفاده از شبیه سازی میتوان کلیه اثرات مربوط به کاهش قدرت تفکیک مکانی سیستم از جمله پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس را بدون استفاده از سیستم رباتیک، که معمولا پرهزینه می باشد، اندازه گیری کرده [۶]. با ثبت این اثرات در ماتریس تصویر در طول پروسه بازسازی تصویر، محوی و اعوجاج ناشی از این اثرات را کاهش داد و به قدرت تفکیک یکنواخت و بهینه ای دست یافت.

۲- مواد و روشها

کد مونت کارلو (MCNP4C) جهت ترابرد فوتون ۵۱۱ کیلوالکترون ولت با بهره گیری از چشمه نقطه ای که در فاصله مشخصی از بلوک آشکارساز قرار گرفته بود، استفاده گردید. کد مونت کارلو (MCNP4C) علاوه بر ترابرد الکترون و فوتون، توانایی ترابرد نوترون را نیز دارد و از این نظر دارای قابلیت های بالایی می باشد. کلیه مواد و هندسه های با پیچیدگی بالا در این کد قابل پیاده سازی می باشد، تنوع

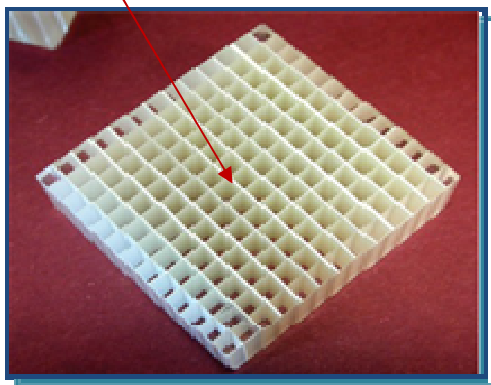
- 1- Positron Emission Tomography
- 2- Spatial Resolution
- 3- Intercrystal Scatter
- 4- Parallax
- 5- Anger Logic
- 6- Photo Multi Player Tube

ارزیابی تاثیر اندازه و جنس کریستال بر کسر پراکندگی

لازم به ذکر است که در کلیه شبیه سازیهای انجام شده در این تحقیق تعداد ۵۰۰۰۰ فوتون شبیه سازی شده است.

اگر چه خطای محاسبه شده با شبیه سازی این تعداد فوتون در حد قابل قبول ۰/۰۰۴ درصد می باشد، اما یکی از محدودیتهای اصلی در افزایش تعداد فوتونها حجم شدن فایلهای خروجی (هر فایل ۱۰ گیگابایت) کلیه اطلاعات از قبیل محل برهمکنش فوتونها، انرژی پس از برخورد، نوع برهمکنش، زاویه پراکندگی و غیره می باشد.

فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت



شکل ۱- نمایی از بلوک آشکارساز شبیه سازی شده شامل آرایه 13×13 از کریستالها با ابعاد $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب.

شکل ۱ نمایی از بلوک آشکارساز شبیه سازی شده را که شامل یک آرایه 13×13 از کریستالها با ابعاد $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب می باشد، نمایش می دهد.

نظر به اینکه هدف اصلی این تحقیق مدل سازی اثرات پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس می باشد از کد مونت کارلو (MCNP4C) که چشمه های ساطع کننده تک فوتون را شبیه سازی می کند، استفاده گردید. در انتخاب نوع آشکارسازهای مورد استفاده جهت تحقق اهداف این تحقیق خصوصیات فیزیکی کریستال (اندازه و جنس کریستال) و همچنین خصوصیات مربوط به تضعیف فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت داخل کریستال مد نظر قرار گرفته است و سایر پارامترهای

روشهای کاهش واریانس و خروجیهای این کد در مقایسه با دیگر کدهای چند منظوره، آنرا در رده یکی از پرکاربردترین کدهای موجود قرار داده است.

در راستای این ارزیابی کریستال مرکزی در هر یک از ۵ عدد کریستال BGO, LSO, LYSO, LuAP, GSO هر کدام متشکل از آرایه های 13×13 با کریستالهای $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب تحت تابش قرار گرفت.

در این تحقیق، شبیه سازیها جهت بررسی تاثیر جنس کریستال روی صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون (در صدوقایعی که در کریستال تحت تابش تعیین موقعیت شده اند) و نیز کسر پراکندگی بین کریستالی در بلوک آشکارساز با تغییر اندازه و جنس کریستال انجام گرفتند. شبیه سازیهای متعددی همراه با تغییر اندازه سطح و طول کریستال بمنظور بررسی اثرات تغییر ابعاد و جنس کریستال روی درصد مقدار پارامترهای صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون و پراکندگی بین کریستالی، انجام شد. همچنین تاثیر جنس کریستال روی پارالاکس با تغییر زاویه فوتون ورودی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این با تغییر زاویه فوتون ورودی، تابع پاسخ سیستم نسبت به چشمه نقطه ای با تغییر زاویه فوتون ورودی (در سه زاویه 30° و 45° درجه) که یک تابع با توزیع گوسی می باشد مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این روش با قرار دادن یک چشمه نقطه ای در فاصله 10 سانتیمتر از بلوک آشکارساز به بررسی میزان تخریب قدرت تفکیک مکانی بلوک با تغییر زاویه فوتون ورودی (در سه زاویه 30° و 45° درجه) پرداخته شد. ملاک ارزیابی بررسی پارامتر پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه از تابع گوسی بدست آمده می باشد که پهنای تابع گوسی در نصف مقدار ماکزیمم می باشد.

1- Full With at Half Maximum

لازم جهت انتخاب یک کریستال برای سیستم PET همانند میزان نور تولیدی^۱، سرعت میرا شدن نور^۲ و غیره مورد توجه قرار نگرفته است.

از آنجا که بررسی پدیده پراکندگی بین کریستالی از طریق تجربی، عملاً غیرممکن بوده و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی - بسیار پرهزینه‌ای دارد، در این تحقیق، جهت ارزیابی دقت نرم افزار، داده های محاسبه شده توسط شانو [۷] و همکارانش بعنوان مرجع در نظر گرفته شد. صحت عملکرد کد مونت کارلو (MCNP4C) با مقایسه نتایج آن با داده های محاسبه شده توسط شانو و همکارانش مورد ارزیابی قرار گرفت.

جهت ارزیابی دقیق کد مونت کارلو (MCNP4C)، از یک آرایه ۸×۸ از کریستالهای BGO با اندازه ۲×۲×۱۰ میلی متر مکعب که دقیقاً مشابه با هندسه بکار گرفته شده توسط گروه فوق بوده است، استفاده گردید. کریستال مرکزی واقع در بلوک، با استفاده از یک منبع نقطه ای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت تحت تابش قرار گرفت. تک تک فوتونها از ابتدای برخورد با کریستال تا زمانیکه از آن خارج گشته و یا در آن متوقف گردیدند، ردیابی شدند. تاریخچه هر فوتون شامل مختصات نقطه برخورد، نوع برهمکنش، انرژی پس از برخورد ذره و جهت حرکت ذره در یک ماتریس بشکل جداگانه ثبت گردید. الگوریتمی جهت برآورد میزان پدیده های پراکندگی بین کریستالی و صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون در بلوک آشکارساز استفاده گردید. درصد وقایع پراکندگی بین کریستالی بصورت نسبت وقایعی که حداقل یکی از برهمکنشهای ثانویه فوتون در کریستال تحت تابش اتفاق نیفتاده به تعداد کل وقایع ثبت شده در بلوک آشکارساز، تعریف گردید.

در این تحقیق از الگوریتم وزن انرژی^۳ [۷] جهت تعیین کریستال تحت تابش فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت استفاده

گردید. در راستای این ارزیابی کریستال مرکزی در هر یک از ۵ عدد کریستال BGO, LSO LYSO, LuAP, GSO کدام متشکل از آرایه های ۱۳×۱۳ با کریستالهای ۴×۴×۲۰ میلی متر مکعب، با بهره گیری از یک چشمه نقطه ای که در فاصله ۱۰ سانتی متر از بلوکها قرار گرفته بود، با فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت مورد تابش قرار گرفت.

۲-۱- صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون

جهت تعیین تاثیر اندازه سطح و جنس کریستال روی مقدار پارامتر صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون در هر یک از ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده، اندازه سطح کریستال از ۱ میلی متر مربع الی ۸ میلی متر مربع با بازه ۰/۵ میلی متر مربع تغییر داده شد و مقدار پارامتر مذکور و تغییر آن با توجه به تغییر اندازه سطح کریستال، مورد بررسی قرار گرفت.

جهت بررسی تاثیر طول و جنس کریستال روی مقدار پارامتر صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون در هر یک از ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده، طول کریستال از ۱۰ میلی متر تا ۴۰ میلی متر با بازه ۵ میلی متری تغییر داده شد.

۲-۲- کسر پراکندگی بین کریستالی

در حالت اول این تحقیق، جهت ارزیابی تاثیر اندازه سطح و جنس کریستال روی مقدار پارامتر فوق، در هر یک از ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده، اندازه سطح کریستال از ۱ میلی متر مربع الی ۵ میلی متر مربع با بازه ۱ میلی متر مربع تغییر داده شد و مقدار پارامتر مذکور و تغییر آن با توجه به تغییر اندازه سطح کریستال، مورد بررسی قرار گرفت.

در حالت دوم این تحقیق به بررسی تغییر این پارامتر ناشی از تغییر اندازه طول کریستال همراه با تغییر جنس کریستال پرداخته شد. در این حالت در ۵ بلوک آشکارساز ذکر شده، طول کریستال از ۱۰ میلی متر تا ۴۰ میلی متر با بازه ۵ میلی متری تغییر داده شد.

-
- 1- Light Yield
 - 2- Decay Time
 - 3- Weighted Energy

۲-۳- پارالاکس

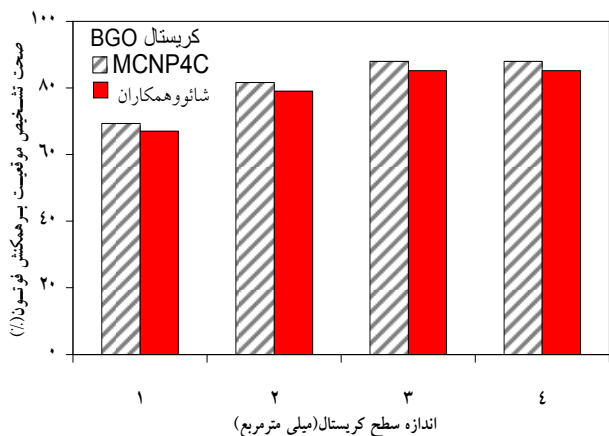
در این تحقیق جهت ارزیابی تاثیر جنس کریستال روی پارالاکس، مقدار این پارامتر با تغییر زاویه فوتون ورودی از ۰ تا ۴۰ درجه با بازه ۱۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۴- تابع نقطه گستر

در این روش با بهره‌گیری از یک چشمه نقطه ای که در فاصله ۱۰ سانتی متر از بلوک آشکارساز قرار گرفته بود و به کریستال مرکزی واقع در بلوک تابانده شد، تابع پاسخ سیستم نسبت به این چشمه نقطه ای که یک تابع با توزیع گوسی می باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ارزیابی هر چقدر مقدار پارامتر پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه کوچکتر باشد نشان‌دهنده قدرت تفکیک مکانی بهتر و وضوح بیشتر است و در نهایت کنتراست دارای وضعیت بهتری می‌باشد. جهت بدست آوردن نمودار تابع نقطه گستر تعداد وقایع ثبت شده در کریستالهای هم‌مدیف با کریستال تحت تابش بر حسب موقعیت مکانی هر یک از کریستالها مورد ارزیابی قرار گرفت.

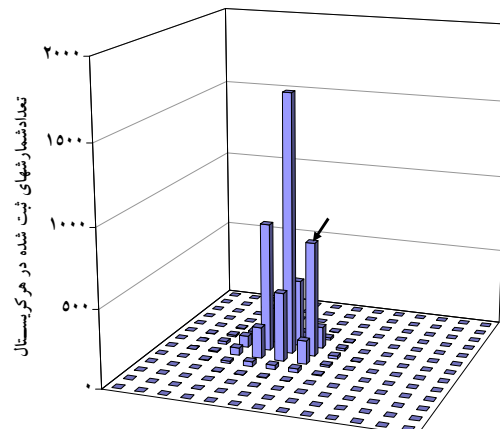
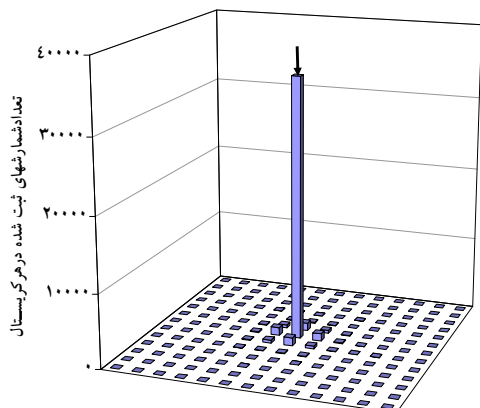
۳- نتایج

نمودار ۲ میزان تغییر پارامتر صحت تشخیص موقعیت بر همکنش فوتون با تغییر اندازه سطح کریستال از ۱ میلی متر مربع الی ۴ میلی متر مربع را نشان می دهد. اختلاف مشاهده شده در نتایج فوق را میتوان به عدم شبیه سازی فوتونهای نورمرئی در کد مونت کارلو (MCNP4C) نسبت داد. این در حالیکه در تحقیق انجام شده توسط گروه شائو وهمکارانش، نورمرئی توسط کد [۸] DETECT مدل‌سازی شده است. یکی دیگر از منابع اصلی اختلاف بین نتایج کد مونت کارلو (MCNP4C) و نتایج گروه شائو وهمکارانش استفاده از جداول سطح مقطع متفاوت در شبیه سازی فوتونهای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت می باشد.

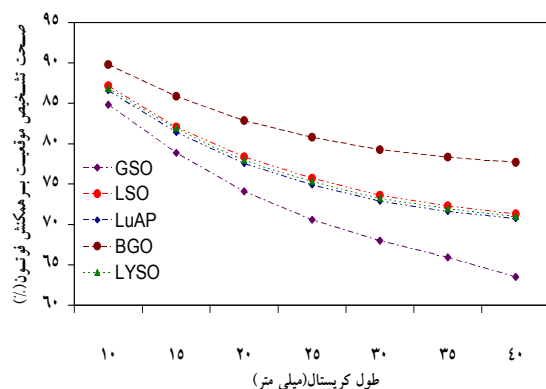


شکل ۲- مقایسه بین داده های شائو و همکارانش و کد مونت کارلو (MCNP4C). کریستال مرکزی واقع در آرایه ۸×۸، با استفاده از یک منبع نقطه ای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت تحت تابش قرار گرفت.

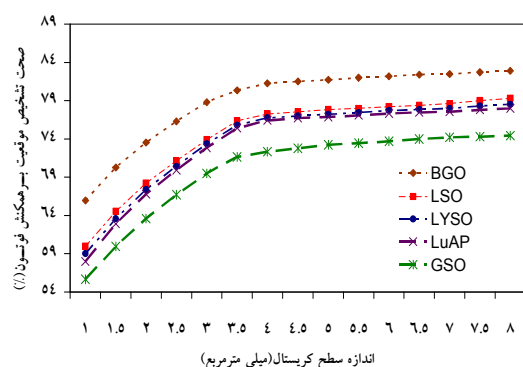
شکل ۳ نمایی سه بعدی از نحوه توزیع موقعیتهای شناسایی شده با روش وزن انرژی در آرایه ۱۳×۱۳ از کریستالهای شبیه سازی شده با اندازه ۴×۴×۲۰ میلی متر مکعب را بعد از تابش فوتون به کریستال مرکزی، تحت دو زاویه ۰ و ۱۰ درجه نشان می دهد. همانطور که پیداست، در کلیه نتایج مربوط به زاویه صفر درجه، بیشترین تعداد شمارش در کریستال تحت تابش، ثبت شده و تعداد کمی در کریستالهای مجاور، تعیین موقعیت شده اند. همچنین نتایج نشان می دهد در زاویه ۱۰ درجه، تعداد شمارش در کریستال تحت تابش کاهش یافته و در کریستالهای مجاور افزایش یافته است که علت این امر پراکندگی بین کریستالی و پارالاکس می باشد.



شکل ۳- نمایی سه بعدی از نحوه توزیع موقعیتهای شناسایی شده باروش وزن انرژی در آرایه 13×13 از کریستالهای شبیه سازی شده با اندازه $20 \times 4 \times 4$ میلی مترمکعب بعد از تابش فوتون به کریستال مرکزی تحت زاویه 10° (چپ) و زاویه 20° (راست).



شکل ۴ الف- نمودار تغییر پارامتر صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون ناشی از تغییر طول کریستال برای ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده. کریستال مرکزی واقع در آرایه 13×13 از کریستالهای $GSO, LSO, LYSO, BGO$ و $LuAP$ با ابعاد $20 \times 4 \times 4$ میلی مترمکعب، با استفاده از یک منبع نقطه ای 511 کیلو الکترون ولت تحت تابش قرار گرفت.



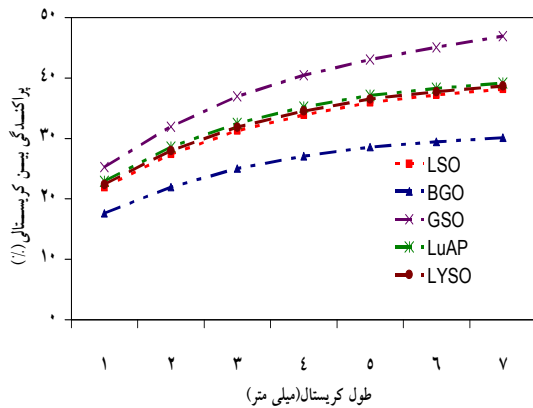
شکل ۴ ب- نمایش تغییرات پارامتر صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون ناشی از تغییر اندازه سطح کریستال برای ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده. کریستال مرکزی واقع در آرایه 13×13 از کریستالهای $GSO, LSO, LYSO, BGO$ و $LuAP$ با ابعاد $20 \times 4 \times 4$ میلی مترمکعب، با استفاده از یک منبع نقطه ای 511 کیلو الکترون ولت تحت تابش قرار گرفت.

با توجه به اینکه پارالاکس منجر به کاهش دقت تخمین موقعیت یابی برهمکنش می‌گردد، پراکندگی بین کریستالی که پس از پارالاکس اتفاق می‌افتد، صحت تخمین موقعیت برهمکنش را بیش از پیش کاهش می‌دهد. زیرا این پدیده منجر به پخش انرژی فوتون در نقاط مختلف کریستال می‌گردد، که این امر موجب کاهش بیش از حد قدرت تفکیک مکانی می‌گردد.

۳-۱- صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون

شکل‌های الف و ب بترتیب درصد تغییرات صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون بر اساس تغییر طول و اندازه سطح کریستال نشان داده شده است. همانگونه که در شکل‌های الف و ب مشاهده می‌شود، با افزایش طول کریستال درصد صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون کاهش و با افزایش اندازه سطح کریستال افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که بین ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده کمترین درصد این پارامتر متعلق به GSO و بیشترین درصد این پارامتر متعلق به BGO می‌باشد.

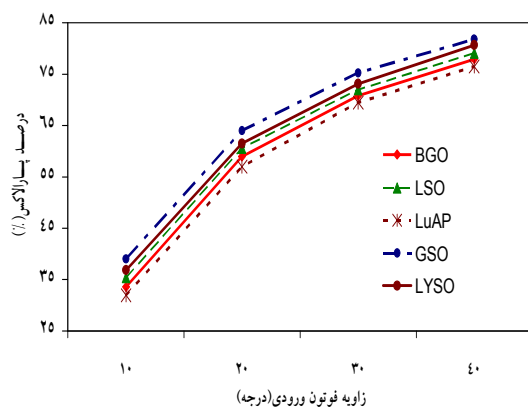
ارزیابی تاثیر اندازه و جنس کریستال بر کسر پراکندگی



شکل ۶- درصد پراکندگی بین کریستالی ناشی از تغییر طول کریستال برای ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده. کریستال مرکزی واقع در آرایه 13×13 از کریستالهای LSO, BGO, LYSO, GSO و LuAP با ابعاد $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب، با استفاده از یک منبع نقطه ای 511 کیلوکلوکرون ولت تحت تابش قرار گرفت.

۳-۳- پارالاکس

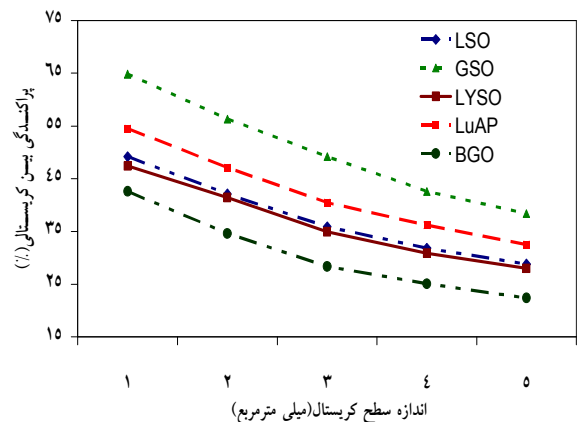
در شکل ۷ تاثیر جنس کریستال روی پارالاکس با تغییر زاویه فوتون ورودی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل - مشاهده می شود، با افزایش زاویه فوتون ورودی درصد پارالاکس افزایش می یابد. این نتایج نشان می دهد که بین ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده بیشترین درصد پارالاکس متعلق به GSO و کمترین درصد این پارامتر متعلق به BGO می باشد.



شکل ۷- درصد پارالاکس ناشی از تغییر زاویه فوتون ورودی برای ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده. کریستال مرکزی واقع در آرایه 13×13 از کریستالهای LSO, BGO, LYSO, GSO و LuAP با ابعاد $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب، با استفاده از یک منبع نقطه ای 511 کیلوکلوکرون ولت تحت تابش قرار گرفت.

۲-۳- کسر پراکندگی بین کریستالی

در شکل ۵ درصد تغییرات پراکندگی بین کریستالی بر اساس تغییر اندازه سطح کریستال نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، با افزایش سطح کریستال درصد پراکندگی بین کریستالی کاهش می یابد. این نتایج نشان می دهد که بین ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده بیشترین درصد پراکندگی بین کریستالی متعلق به GSO و کمترین درصد این پارامتر متعلق به BGO می باشد. در شکل ۶ درصد تغییرات پراکندگی بین کریستالی بر اساس تغییر طول کریستال، در صورتی که فوتون با زاویه 0 درجه به کریستال مرکزی تابیده شود نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، با افزایش طول کریستال، درصد پراکندگی بین کریستالی افزایش می یابد. این نتایج نشان می دهد که بین ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده بیشترین درصد پراکندگی بین کریستالی متعلق به GSO و کمترین درصد این پارامتر متعلق به BGO می باشد.



شکل ۵- درصد پراکندگی بین کریستالی ناشی از تغییر اندازه سطح کریستال برای ۵ بلوک آشکارساز انتخاب شده. کریستال مرکزی واقع در آرایه 13×13 از کریستالهای LSO, BGO, LYSO, GSO و LuAP با ابعاد $4 \times 4 \times 20$ میلی متر مکعب، با استفاده از یک منبع نقطه ای 511 کیلوکلوکرون ولت تحت تابش قرار گرفت.

۳-۴- تابع نقطه گستر

در جدول ۱، مقادیر پارامتر پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه حاصل از نمودارهای تابع نقطه گستر، ناشی از تابش فوتون تحت سه زاویه ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه برای بلوک کریستالهای LYSO، LuAP، LSO و BGO نمایش داده شده است.

جدول ۱- نمایش مقادیر پارامتر پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه (میلی متر) حاصل از تابش فوتون تحت سه زاویه ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه.

سوسوزن	۰	۳۰	۴۵
BGO	۳/۵۴	۱۰/۴۵	۱۲/۱۲
LSO	۳/۶۶	۱۱/۱۱	۱۳/۳۳
LuAP	۳/۶۹	۱۰/۷۰	۱۲/۵۳
GSO	۳/۷۵	۱۲/۰۳	۱۶/۲۳
LYSO	۳/۶۵	۱۱/۵۷	۱۴/۵۷

همانگونه که از جدول ۱ نمایان است تحت زوایای ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه، BGO کمترین و GSO بیشترین مقدار را برای پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه دارا می باشد. از آنجا که تحت هر سه زاویه، کمترین مقدار پهنای منحنی در نصف ارتفاع پیشینه را BGO و بالاترین مقدار را GSO دارا ست، میتوان به این مساله پی برد که میزان پخش شدگی انرژی حاصل از برخورد های متعدد کامپتون در کریستال BGO از کریستالهای دیگر کمتر می باشد. بنابراین با در نظر گرفتن خواص مرتبط با تضعیف فوتون ۵۱۱ کیلو الکترون ولت در کریستال BGO، می توان گفت قدرت تفکیک مکانی آن نسبت به سایر کریستالها بالاتر است.

۴- بحث و نتیجه گیری

انرژی فوتون در این تحقیق، ۵۱۱ کیلو الکترون ولت در نظر گرفته شد که انرژی فوتونهای نابودی در سیستم PET می باشد. اگرچه برابر فوتونهای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت با استفاده از روش مونت کارلو بسیار زمانبر است، داده های

بدست آمده در این تحقیق اطلاعات دقیقی از برهمکنش فوتونها داخل کریستال فراهم می کنند.

نتایج حاصله از تغییر پارامتر صحت تشخیص موقعیت بر همکنش فوتون با تغییر طول و اندازه سطح کریستال، حاکی از آنست که این پارامتر با افزایش طول کریستال، کاهش و با افزایش اندازه سطح کریستال، افزایش می یابد. با توجه به استفاده از روش وزن انرژی، جهت یافتن موقعیت برهمکنش فوتون با کریستال، با کوچک شدن اندازه سطح کریستال پدیده پراکندگی بین کریستالی افزایش یافته و به همراه آن خطای مربوط به تعیین موقعیت برهمکنش فوتون بیشتر شده، صحت تشخیص موقعیت برهمکنش فوتون کاهش چشمگیری پیدا می کند. افزایش بهره وری به همراه افزایش قدرت تفکیک مکانی، جزو اهداف مهم در طراحی سیستم های PET به شمار می رود. افزایش طول کریستال همانطور که منجر به افزایش بهره وری می گردد، افزایش احتمال پدیده کامپتون را نیز به دنبال دارد. به دلیل استفاده از روش موقعیت یابی وزن انرژی، افزایش تعداد برخوردهای کامپتون، منجر به افزایش خطای موقعیت یابی و در نتیجه کاهش قدرت تفکیک مکانی می گردد. از طرفی همانطور که کاهش طول کریستال، کاهش تعداد برخوردهای کامپتون و افزایش قدرت تفکیک مکانی را به دنبال دارد، منجر به کاهش بهره وری دستگاه می گردد. بنابراین بایستی انتخاب طول کریستال با دقت زیادی صورت گیرد تا هر دو پارامتر بهره وری و قدرت تفکیک مکانی توأم با همدیگر افزایش یابند.

نتایج حاصل از افزایش پارامتر پراکندگی بین کریستالی با افزایش طول کریستال نشان داد با افزایش طول کریستال، تعداد برخوردهای کامپتون افزایش یافته و پدیده پراکندگی بین - کریستالی نیز بدنبال آن رشد چشمگیری پیدامی کند. با افزایش اندازه سطح کریستال، پدیده پراکندگی بین کریستالی کاهش یافته است. این نتیجه بدین صورت قابل توصیف است که با

پدیده پراکندگی بین کریستالی در پروسه بازسازی تصویر جهت رسیدن به تصاویری با قدرت تفکیک بالاتر بسیار مفید است. همچنین نتایج بدست آمده حاکی از آنستکه کد مونت کارلو (MCNP4C) ابزاری مفید جهت ارزیابی برهمکنش فوتونها در کریستالهای سیستم PET بمنظور مدلسازی دقیق رفتار پارامتر پراکندگی بین کریستالی در پروسه بازسازی تصویر جهت بهبود قدرت تفکیک مکانی این سیستم می باشد.

۵- تشکر و قدردانی

این کار نتیجه تحقیقات انجام گرفته در مرکز تحقیقات و تکنولوژی علوم در پزشکی بیمارستان امام خمینی - دانشگاه علوم پزشکی تهران می باشد. بدینوسیله از همکاری جناب آقای دکتر سرکار ریاست محترم مرکز تحقیقات و تکنولوژی علوم در پزشکی و نیز معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی تهران، گروه فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، به پاس زحمات و تلاشهای ارزنده شان در جهت تکمیل این پروژه سپاسگزاری می گردد.

افزایش اندازه سطح کریستال، احتمال برخوردهای متعدد کامپتون که بدنال اولین برهمکنش فوتون با کریستال اتفاق می افتد، تا توقف نهایی، در کریستال تحت تابش افزایش یافته و پدیده پراکندگی بین کریستالی کاهش می یابد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مشخص گردید که در بین ۵ کریستال انتخاب شده (BGO, LSO, LYSO, LuAP, GSO)، بالاترین صحت تشخیص محل برهمکنش و پایین ترین مقدار پراکندگی بین کریستالی متعلق به BGO و پایین ترین صحت تشخیص محل برهمکنش و بالاترین مقدار پراکندگی بین کریستالی متعلق به GSO می باشد.

همچنین نتایج نشان داد که کریستالهای BGO بالاترین قدرت تفکیک مکانی را در بین ۵ کریستال انتخاب شده در این تحقیق دارا می باشند.

اگرچه کریستالهای BGO بعنوان کریستال مناسب از لحاظ تضعیف فوتونی در این تحقیق معرفی شده است ولی میزان نور تولیدی در کریستال LSO و LYSO و همچنین سرعت بالای میرا شدن نور در این کریستالها باعث شده است که این دو کریستال در بیشتر سیستمهای PET مورد استفاده قرار گیرند. این اطلاعات برای اندازه گیری و مدل سازی دقیق

منابع

1. Cherry S R, Sorenson J. Phelps M. Physics in Nuclear Medicine, Third Edition, Pennsylvania, Elsevier 2003: 235-358.
2. Qi J, Leahy RM, Chinghan H, Farquhar TH, Cherry SR. Fully 3D Bayesian image reconstruction for the ECAT EXACT HR+. IEEE Trans Nucl Sci 1998; 45:1096-103.
3. Selivanov VV, Picard Y, Cadorette J. Detector response models for statistical iterative image reconstruction in high resolution PET. IEEE Trans Nucl Sci 2000; 47:1168-75.
4. Reader AJ, Julyan PJ, Williams H. EM Algorithm System Modeling by Image-Space Techniques for PET reconstruction. IEEE Trans Nucl Sci 2003; 50:1392-97.
5. Panin VY, Kehren F, Rothfuss H, Hu D, Michel C, Casey M E. PET reconstruction with system matrix derived from point source measurements. IEEE Trans Nucl Sci 2006; 53: 152.

6. Rahmim A, Lodge MA, Tang J, Lashkari S, Ay MR. Analytic System Matrix Resolution Modeling in PET: An Application to Rb-82 Cardiac Imaging. 14th congress of the international society for burn injuries. Montreal 2008:1307-10.
7. Shao Y, Cherry SR, Siegel S, Silverman RW. A study of Inter- Crystal Scatter in Small Scintillator Arrays Designed for High Resolution PET Imaging. IEEE Trans Nucl Sci 1996; 43:1938-44.
8. Knoll GF, Knoll TF, Henderso TM. Light collection in scintillating detector composites for neutron detection. IEEE Trans Nucl Sci 1988; 35:872-5.