

ارزیابی مولفه‌های پراکندگی و نفوذ در کولیماتور HEGP دوربین گامای DST-XLi در تصویربرداری ۱۳۱

مصطفی شغایی^{۱*}، محمد رضا آی^۲، داریوش سرداری^۱

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

^۲ گروه فیزیک پزشکی و مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

^۳ مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

چکیده

کیفیت تصاویر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای تحت تاثیر پراکندگی و نفوذ فوتون‌ها در کولیماتور می‌باشد. محاسبه این کمیت‌ها از طریق تحلیلی بسیار دشوار بوده، و بهمین دلیل برای ارزیابی این مولفه‌ها از روش مونت کارلو استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی مونت کارلو از کد اختصاصی (SIMIND(Lund University)) که مخصوص شبیه‌سازی‌های SPECT می‌باشد، استفاده شد. در این مطالعه یک دستگاه دوربین گامای DST-XLi شرکت GE به‌مراه کولیماتور اختصاصی آن برای انرژی‌های بالا (HEGP) مدل‌سازی شد. آنالیز فوتون‌های آشکارشده در ۲۰٪ پنجره انرژی از یک چشمه نقطه‌ای ۱۳۱ انجام شد، تا مقدار فوتون‌های اولیه، پراکنده شده در کولیماتور و فوتون‌های نفوذی (فوتون‌هایی که از دیواره کولیماتور بدون برهمکنش عبور می‌کنند) بدست آورده شود. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند برای یک چشمه نقطه‌ای ۱۳۱ در هر ۶۴ درصد رخدادها را در پنجره انرژی، فوتون‌های پراکنده و نفوذی در کولیماتور تشکیل می‌دهند که با در نظر گرفتن تفاوت‌های دستگاه و کولیماتور با کارهای پیشین در این زمینه توافق خوبی دارد. همچنین حضور این پدیده‌ها در طیف انرژی و اثر آنها بر روی تصویر نشان داده شده است، که نشان دهنده اهمیت این دو پدیده در تصویربرداری در انرژی‌های بالا می‌باشد. نتایج نشان داد که فوتون‌های پراکنده و نفوذی در کولیماتور عامل مهمی در تصویربرداری از ۱۳۱ می‌باشند و روی تصاویر حاصله اثر مخربی بجای می‌گذارند.

کلمات کلیدی: دوربین گاما، پراکندگی در کولیماتور، نفوذ سپتایی، ۱۳۱

مقدمه

کیفیت تصاویر در تصویربرداری پزشکی هسته‌ای تحت تاثیر پراکندگی و نفوذ در کولیماتور قرار دارد [۱]. تعیین سهم فوتون‌های نفوذی و پراکنده در کولیماتور از طریق تحلیلی مشکل بوده و به فاصله چشمه بستگی دارد [۲]. حضور مقادیر زیاد نفوذ و پراکنده در کولیماتور، بر دقت کمی تصاویر اثر می‌گذارد. ۱۳۱ ایزوتوپی است که فوتون‌هایی با انرژی بالا از خود گسیل می‌کند، مهمترین این گسیل‌ها که در پنجره انرژی مورد استفاده در تصویربرداری نقش دارند عبارتند از: 364 KeV (۸۱/۷٪)، 637 KeV (۷/۲٪)، و 723 KeV (۱/۸٪). این درحالی است که پنجره مورد نظر برای تصویربرداری دارای عرض ۲۰٪ روی

فوتوپیک (364KeV) می باشد، یعنی گستره انرژی 328KeV تا 400KeV را شامل می شود. علاوه بر درصد واپاشی کم، فوتون های 637KeV و 723KeV سبب اغتشاش در کیفیت تصویر می گردند، مانند تار کردن تصویر، کاهش کنتراست، و کاهش رزولوشن مکانی. علاوه بر این، احتمال بیشتری برای پراکندگی و نفوذ این فوتون ها در دیواره سربی کولیماتور وجود دارد.

فوتون هایی که در تشکیل تصویر در 20% پنجره انرژی شرکت می کنند، می توانند منشاءهای مختلفی داشته باشند: فوتون هایی که از حفره های کولیماتور عبور می کنند و برهمکنشی با کولیماتور ندارند، را فوتون های هندسی گویند که بیشترین سهم را در تشکیل تصویر دارند. برخی فوتونها نیز با دیواره کولیماتور و یا مواد پراکنده دیگر برهم کنش کامپتون انجام می دهند و انرژی از دست می دهند. این فوتون ها می توانند در پنجره انرژی آشکارسازی شوند، حتی اگر از دو گسیل پراثری بالای 364KeV باشند. برخی دیگر از فوتون ها، نیز از حداقل یک دیواره کولیماتور (سپتا) عبور می کنند بدون اینکه برهمکنشی با آن داشته باشند. به این دسته از این فوتونها، فوتون های نفوذی از دیواره گفته می شود.

کارهای پیشین بر روی دو مولفه نفوذ و پراکندگی در کولیماتور محدود می باشد. Dewajara و همکاران با استفاده از روش مونت کارلو نشان دادند که 73% از فوتون های آشکار شده در پنجره انرژی را فوتون های پراکنده و نفوذی در کولیماتور تشکیل می دهند [۳]. Autret و همکاران نیز در بررسی این پدیده ها برای ید از کد MCNP و (Geant4 Application for Emission Tomography) GATE استفاده نمودند و نشان دادند برای یک چشمه نقطه ای 53% از رخدادها را مولفه های مذکور تشکیل می دهند [۴].

مواد و روشها

یک دستگاه دوربین گامای DST-XLi (General Electric Medical Systems) به منظور بررسی کسر فوتون های نفوذی، پراکنده و هندسی در کولیماتور مدل سازی شد. هدف اصلی، تمرکز بر روی چشمه هایی با انرژی بالا می باشد، لذا کولیماتور مورد استفاده نیز باید در همین محدوده انرژی انتخاب می شد. به همین دلیل و همچنین کاربرد بیشتر کولیماتور های HEGP (High Energy General Purpose) را برای این مطالعه انتخاب نمودیم. خصوصیات دوربین گامای شبیه سازی شده و همچنین کولیماتور HEGP نیز در جدول ۱ آورده شده است. این کولیماتور دارای حفره های موازی به شکل شش گوشه می باشد.

جدول ۱. خصوصیات کولیماتور و دوربین گامای شبیه سازی شده

$0/34\text{mm}$	قطر حفره کولیماتور
54mm	طول حفره
$0/16\text{mm}$	ضخامت دیواره
$9/8\%$ در انرژی 140KeV	رزولوشن انرژی
$540 \times 400\text{mm}^2$	میدان دید (FOV)

برای مدل‌سازی مونت کارلو از کد مونت کارلوی SIMIND در این مطالعه استفاده شده است [۵]. این کد در دانشگاه Lund و بر اساس زبان برنامه نویسی FORTRAN-90 نوشته شده است. از این کد در مقالات متعددی که به بررسی پدیده‌های مرتبط با SPECT پراخته اند، استفاده شده است که نشان دهنده مقبولیت این کد در مدل‌سازی مربوطه می باشد. این کد با استفاده از یک زیربرنامه قادر به مدل‌سازی پدیده‌های در کولیماتور می باشد و توانایی مدل‌سازی انواع کولیماتور ها و همچنین اشکال مختلف حفره‌های آن را دارا می باشد.

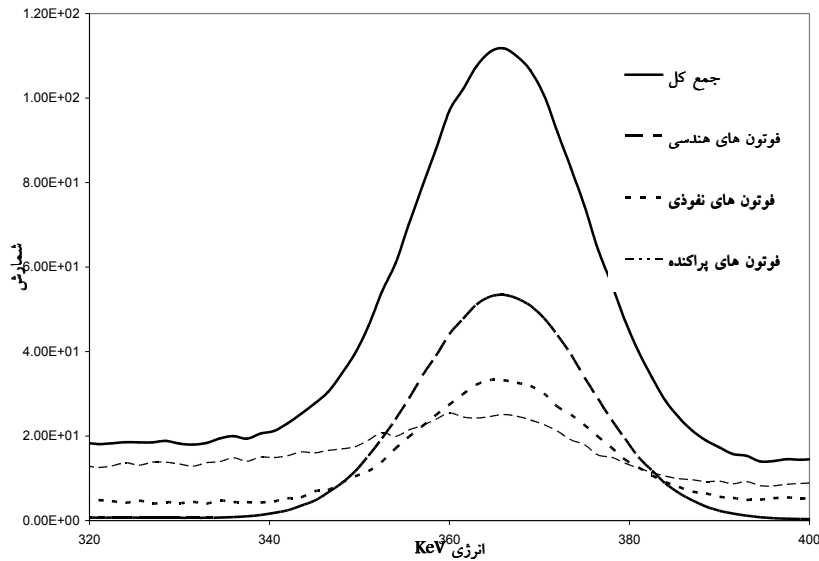
در مواقعی که به شبیه سازی یید ۱۳۱ می پردازیم، شبیه سازی فوتون هایی که بعد از پس پراکندگی از ساختارهای مختلف پشت کریستال مانند PMT، دوباره وارد کریستال می گردند، از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. کد SIMIND دارای انواع مختلف مواد برای شبیه سازی ماده PMT می باشد. در این مطالعه برای در نظر گرفتن اثر پس پراکندگی از یک PMT با چگالی $1/4 \text{Vgr/cm}^3$ استفاده شده است که با مقادیر استفاده شده در مقالات موجود نیز همسان می باشد [۳].

پاسخ دستگاه DST-XLi با کولیماتور برای یک چشمه نقطه ای یید ۱۳۱ که در ۲۰ سانتی متری از سطح آشکارساز قرار گرفته شده است مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای بررسی این پدیده‌ها، چشمه مذکور را در فاصله‌های مختلف از آشکارساز قرار داده شد تا اثر فاصله را روی مقادیر فوتونها مذکور ارزیابی کنیم.

نتایج

شکل ۱ طیف انرژی حاصل از شبیه سازی را برای یید ۱۳۱ به ازای فوتون های هندسی، نفوذی و پراکندگی در کولیماتور را نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست، فوتون های نفوذی و پراکندگی نقش عمده ای در طیف کل بدست آمده دارا می باشد.

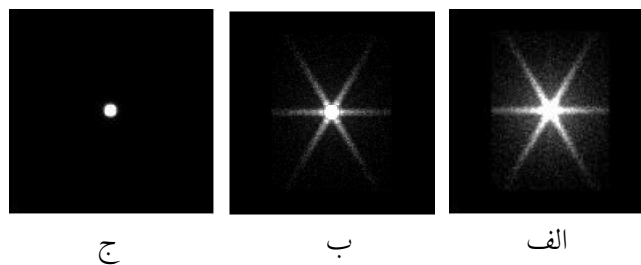
سهم فوتون های هندسی، پراکنده و نفوذی در کولیماتور برای یک چشمه نقطه ای یید ۱۳۱ در هوا که در فاصله ۲۰ سانتی متری از آشکارساز قرار گرفته، با کد مذکور محاسبه شد. جدول ۳ سهم هریک از این فوتون ها را در ۲۰٪ پنجره انرژی حول ۳۶۴ KeV نشان می دهد. شکل ۲ تصاویر شبیه سازی شده را در حضور و غیاب فوتون های پراکنده و نفوذی در کولیماتور را نشان می دهد. اثر شش گوشه نفوذ سپتایی نیز در تصویر ۲(ب) و (ج) مشخص می باشد، که ناشی از شکل شش گوشه حفره های کولیماتور می باشد.



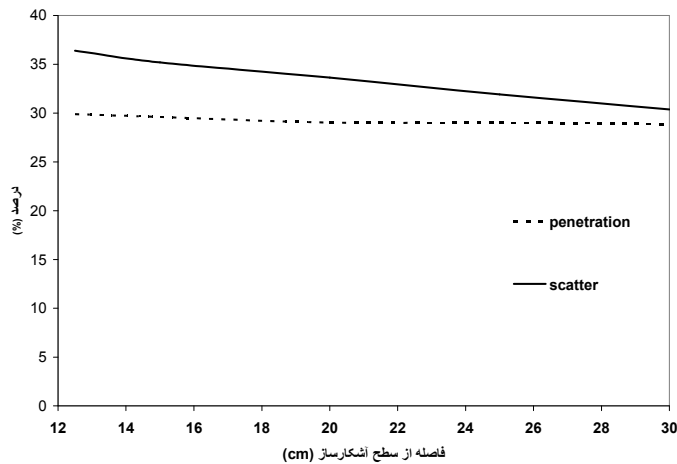
شکل ۱. طیف انرژی فوتون های کل، هندسی، نفوذی و پراکنده در کولیماتور در ۲۰٪ پنجره انرژی برای ید ۱۳۱

جدول ۳. کسر فوتون های هندسی، پراکنده و نفوذی در کولیماتور برای چشمه نقطه ای ید ۱۳۱ در فاصله ۲۰ سانتی متری از کولیماتور

فوتون های هندسی (%)	فوتونهای پراکنده (%)	فوتون های نفوذی (%)
۳۷/۳۶	۲۹/۰۲	۳۳/۶۳



شکل ۲. تصاویر شبیه سازی شده از یک چشمه نقطه ای ید ۱۳۱. الف) فوتون های هندسی. ب) جمع فوتون های هندسی و نفوذی. ج) جمع فوتونهای هندسی، نفوذی و پراکنده



شکل ۳ نمودار تغییرات درصد فوتون‌های هندسی، پراکندگی و نفوذی را بر حسب فاصله از آشکارساز را برای یک چشمه نقطه‌ای ۱۳۱ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل پیداست، درصد فوتون‌های نفوذی و پراکنده در کولیماتور کاهش می‌یابد و در نتیجه شاهد رشد درصد فوتون‌های هندسی می‌باشیم.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه بررسی نحوه کار کولیماتور HEGP بود که بطور معمول برای مطالعات درگیر با ید ۱۳۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج این مطالعه با مطالعات قبلی در این زمینه توافق خوبی دارد اختلاف موجود در مقادیر ذکر شده در کارهای قبلی و این کار، با در نظر گرفتن تفاوت‌های بین دوربین گاما و همچنین کولیماتور قابل قبول می‌باشد [۳ و ۴]. نتایج نشان دهنده اهمیت خصوصیات کولیماتور بویژه برای ید ۱۳۱ می‌باشند. مقادیر زیاد کسرهای نفوذ و پراکندگی کولیماتور در ۲۰٪ پنجره انرژی بیانگر محدودیت‌های کولیماتورهای کلینیکی موجود می‌باشند. نتایج نشان دادند که کولیماتور HEGP بخوبی برای تصویربرداری ید ۱۳۱ سازگار نیست.

در این مطالعه مقادیر پراکندگی و نفوذ در کولیماتور مورد ارزیابی قرار گرفتند و همچنین طیف انرژی بر حسب مبداء فوتون‌های آشکار شده جداسازی شد. این مقادیر را می‌توان برای ایجاد و ارزیابی تکنیک‌های جدید و موجود در زمینه جبران و تصحیح پراکندگی و نفوذ در کولیماتور مورد استفاده قرار گیرند. کارهای آینده در این زمینه می‌توانند به بررسی مقایسه‌ای برای کولیماتورهای دیگر با این کولیماتور بپردازند.



مراجع

- [1] X. He, E. C. Frey, J. M. Links, X. Song, and B. M. W. Tsui, "Comparison of penetration and scatter effects on defect contrast for GE and Siemens LEHR collimators in myocardial perfusion SPECT- A Monte Carlo study", IEEE Trans. Nucl. Sci., No. 5, vol. 52, 1359-64, 2005.
- [2] G. Muehllehner and H. Luig, "Septal penetration in scintillation camera collimators," Phys. Med. Biol., vol. 25, 1059-1070, 1980.
- [3] Y.K. Dewajara, M. Ljungberg, K.F. Karol, "Characterization of scatter and penetration using Monte Carlo simulation in I-131 imaging," J Nucl Med, 41-123, 2000.
- [4] D. Aurtret, A. Bitar, L. Ferrer, A. Lisbona, and M. Bardies, "Monte Carlo modeling of gamma camera for I-131 imaging in targeted radiotherapy," Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals, vol. 20, pp. 77-84, 2005.
- [5] SIMIND Version 4.5. The SIMIND Monte Carlo program, M. Ljungberg, [Online]<http://www.radfys.lu.se>.

این کمیت کوچکتر یا عبارتی ضخامت قله‌های طیف انرژی باریکتر باشد [۴]. بنابراین باریک بودن FWHM نشانه بالا بودن دقت اندازه‌گیری آشکار ساز است. اما این پارامتر اولاً این پارامتر به انرژی فوتون بستگی دارد. بطوریکه وایلد‌رمن و دیگران رابطه آنرا با انرژی بصورت

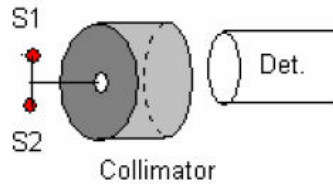
$$FWHM = 2.6132 * E^{0.4414}$$

بدست آورده‌اند [۵]. ثانیاً با استفاده از موازی ساز میتوان این پارامتر را بهینه کرد. ماده موازی ساز و مخصوصاً قطر روزنه آن در FWHM طیف گاما تاثیر بسیار دارد. خود موازی‌ساز بعنوان جاذب عمل میکند و مناسبترین جاذب برای تابش گاما تا ۱/۴ MeV، سرب به ضخامت ۲۰mm میباشد. بررسی اندازه موازی ساز و ضخامت جاذب بطور همزمان میتواند نقش موثری در تصحیح پاسخ آشکارساز داشته باشد [۶ و ۷ و ۸]. چنانکه اشاره شد اثر موازی‌ساز به روش تحلیلی و عددی بررسی شده است. اما در روش بکار گرفته شده در این تحقیق از دو چشمه گامای همسان و تقریباً با قدرت یکسان بطور همزمان استفاده شده است. برای بدست آوردن نتایج تئوری و محاسبات مونت کارلو از کد MCNP4C و برای بدست آوردن نتایج تجربی از چشمه‌های ^{137}Cs و آشکارساز یدور سدیم $2'' \times 2''$ استفاده شده است.

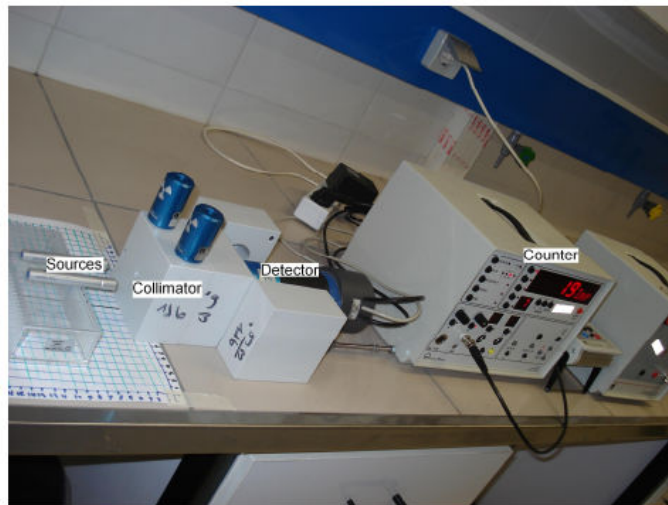
۲- روش تحقیق

مطابق شکل ۱ دو چشمه همسان ^{137}Cs و با قدرت تقریباً یکسان $5\mu\text{Ci}$ را در مقابل آشکار ساز $2'' \times 2''$ یدور سدیم که با یک موازی ساز سربی پوشیده شده قرار داده‌ایم. با شمارش تعداد متوسط فوتونهای رسیده به آشکارساز تاثیر ضخامت موازی ساز، قطر روزنه موازی ساز و فاصله چشمه با آشکارساز را بررسی کرده‌ایم. نتایج تئوری را با استفاده از محاسبات مونت کارلو و کد MCNP4C بدست آورده‌ایم. برای بدست آوردن نتایج تجربی از صفحات نیم سانتیمتری سرب با قطر روزنه 0.15cm بعنوان موازی ساز استفاده کرده‌ایم. مجموعه وسایل آزمایش را مطابق شکل ۲ چیده و فوتونها را شمارش کرده‌ایم. برای بررسی بهتر نتایج از پارامتر جدید کتراتر استفاده کرده‌ایم [۶]. کتراتر عبارت است از: $C = \frac{N - N_0}{N_0} \times 100$. در این رابطه N_0 شمارش مینیمم فوتونهای گاما و N شمارش در هر نقطه است.

¹ -Full-Width at Half-Maximum



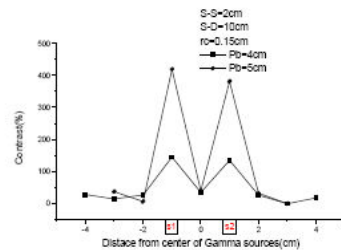
شکل ۱: شبیه سازی مونت کارلو که برای ورودی کد MCNP طراحی شده است.



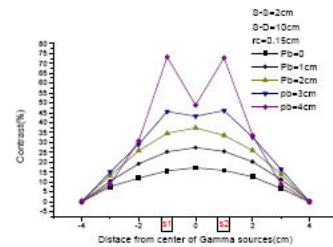
شکل ۲: مجموعه آزمایشگاهی استفاده شده در ایت تحقیق

۳- محاسبات مونت کارلو

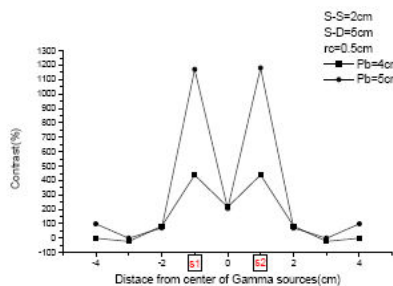
ردیابی فوتونهای و در نظر گرفتن احتمال برهمکنش آن با محیط هرچند کار دشواری است اما بکمک کد محاسباتی MCNP4C شدنی است. براساس نیاز این تحقیق، فایل ورودی کد مذکور در این تحقیق مطابق شکل ۱ شبیه سازی و ساخته شد. برای این منظور دو چشمه همسان ^{137}Cs با قدرت یکسان در نظر گرفته شد. در محاسبات تئوری دو موازی ساز سریبی با شعاعهای 0.15cm و 0.5cm بکار گرفته شده است. ضخامت سرب را با کامهای 1cm افزایش داده و کنتراست را بدست آوردیم. شکلهای ۳ تا ۶ نتایج تئوری نشان میدهند. در این شکلها: S-D فاصله مرکز دو چشمه از آشکارساز، S-S فاصله دو چشمه از هم، 1cm شعاع روزنه موازی ساز، Pb ضخامت سرب است.



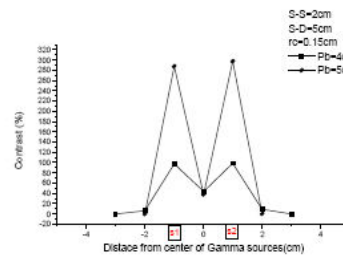
شکل ۲: خروجی کد MCNP برای ضخامت‌های ۴ و ۵ سانتیمتری سرب (فاصله چشمه و آشکارساز ۱۰ سانتیمتر)



شکل ۳: خروجی کد MCNP برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۱۰ سانتیمتر)



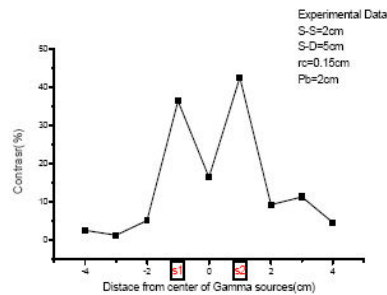
شکل ۴: خروجی کد MCNP برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۵ سانتیمتر و rc=0.5cm)



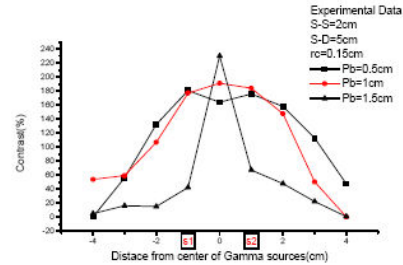
شکل ۵: خروجی کد MCNP برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۵ سانتیمتر)

۴- کارهای تجربی

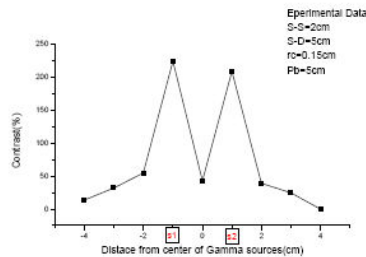
در این تحقیق تلاش شده است چیدمان آزمایشگاهی مطابق مدل شبیه سازی شده باشد. چشمه های استفاده شده در آزمایشها از نوع ^{137}Cs با قدرت حدود $0.5\mu\text{Ci}$ بود. میدانیم این چشمه یک نوع گاما با انرژی 0.662MeV گسیل میکند [۹]. آشکارساز استفاده شده از نوع یدور سدیم به ابعاد $3'' \times 2''$ بود. صفحات سربی با ضخامت‌های نیم سانتی که روزنه هائی به قطر 0.15 mm در آنها ایجاد شده بود بعنوان موازی ساز (کلیماتور) مورد استفاده قرار گرفتند. داده های تجربی بدست آمده بصورت منحنی‌هایی در شکل‌های ۷ تا ۱۰ رسم شده است. چنانکه در شکل ۷ مشاهده میشود، وقتی که فاصله آشکارساز و چشمه ها (S-D) ۵cm است، آشکار ساز قدرت تفکیک دو چشمه از هم را ندارد. اما وقتی که ضخامت سرب به 2 cm میرسد چشمه ها به راحتی قابل تفکیک هستند (شکل‌های ۸ و ۹). بدین ترتیب تا زمانی که ضخامت سرب $1/5\text{ cm}$ است، شدت عبور فوتونها از رابطه $I = I_0 B(t, E_\gamma) e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)t}$ تبعیت میکند. که در آن I_0 شدت اولیه، I شدت فوتونهای عبور کرده، B ضریب بیلد آپ، t ضخامت، $\frac{\mu}{\rho}$ ضریب کاهش جرمی، ρ چگالی و E_γ انرژی گاما است [۱۰]. شکل ۸ نشان میدهد هرچه فاصله بیشتر باشد ضخامت سرب بکار رفته نیز باید افزایش یابد.



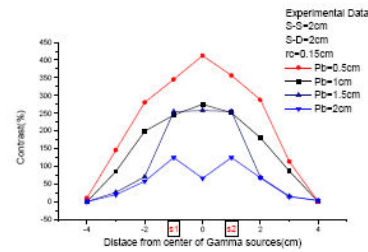
شکل ۷: نتایج تجربی برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۵ سانتیمتر و $rc=0.15\text{cm}$)



شکل ۸: نتایج تجربی برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۵ سانتیمتر و $rc=0.15\text{cm}$)



شکل ۹: نتایج تجربی برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۵ سانتیمتر و $Pb=5\text{cm}$)



شکل ۱۰: نتایج تجربی برای ضخامت‌های متفاوت سربی (فاصله چشمه و آشکارساز ۲ سانتیمتر)

۵- نتیجه

یکی از روشهای موثر برای افزایش قدرت تفکیک انرژی در آشکارسازهای پدور سدیم استفاده از موازی سازها است. عوامل متعددی در بهینه سازی این کمیّت میتوانند نقش داشته باشند که میتوان از جمله به فاصله چشمه تا آشکارساز، جنس موازی ساز، ضخامت موازی ساز، قطر روزنه موازی ساز و انرژی گاما اشاره کرد. برای یک قطر معین هرچه فاصله چشمه تا آشکارساز بیشتر باشد ضخامت موازی ساز نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق بر اساس همخوانی نتایج تئوری و تجربی، برای قطر ۳mm ضخامت موازی ساز سربی را ۲cm بدست آوردیم.



- [1]- Manpreet Singh, Gurvinderjit Singh, B.S. Sandhu, Bhajan Singh, *Effect of detector collimator and sample thickness on 0.662MeV multiply Compton-scattered gamma rays*, Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 373-378
- [2]- Patricia Mortreau, Reinhard Berndt, *Attenuation of a non-parallel beam of gamma radiation by thick shielding—application to the determination of the ^{235}U enrichment with NaI detectors* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 550 (2005) 675-690
- [3]- J.vanderMarel, B. Cederwall, *Collimator less imaging of gamma rays with help of gamma-ray tracking* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A471(2001)276-280
- [4]- نیکلاس سولفانندیس - ترجمه دکتر کوهی و دکتر هادی‌زاده - اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای - انتشارات کتابستان مشهد
- [6]- Wanno Lee, Gyuseong Cho, *Pinhole collimator design for nuclear survey system*, Annals of Nuclear Energy 29 (2002) 2029-2040
- [7]- N. Giokarisa, b, G. Loudosa, D. Maintasa, A. Karabarounisa, V. Spanoudakia, E. Stiliarisa, S. Boukisa, A. Gektinc, A. Boyarintsevc, *Crystal and collimator optimization studies of a high-resolution g-camera based on a position sensitive photomultiplier* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 527 (2004) 134-139
- [8]- Gurdeep S. Sidhu, Karamjit Singh, Parjit S. Singh, Gurnel S. Mudahar, *Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements*, Radiation Physics and Chemistry 56 (1999) 535-537
- [9]- M. E. HOSSEINI-ASHRAFI, *Quantitative Consideration of Collimator Parameters in Radio-isotope Imaging and its Application to Collimator Optimization*, Appl. Radiat. Isot. Vol. 49, No. 8, pp. 939-954, 1998
- [10]- Chang-Min Lee, Yoon Hee Lee, Kun Jai Lee, *Cracking effect on gamma-ray shielding performance in concrete structure*, Progress in Nuclear Energy 49 (2007) 303e312