

## بررسی مکان و راستای آشکارساز جهت مینیم نمودن ضریب انباشت شار پرتوهای گاما

علی رسولی و حسین توکلی عنبران\*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.

\*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱

پست الکترونیکی: Tavakoli.anbaran@gmail.com

### چکیده

هدف از این پژوهش گزینش بهترین مکان آشکارساز نسبت به حفاظ و چشمه‌ی گاما است که کمترین ضریب انباشت شار فوتون را داشته باشیم. در این کار تحقیقی ضریب انباشت شار پرتوهای گامای چشمه‌های سیلندری  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{14}\text{N}$  هم‌محور با حفاظ‌هایی از جنس آلومینیوم، آهن و سرب با ضخامت ثابت ۱/۵۵cm در آشکارساز CsI(Tl) با استفاده از کد MCNP-4C محاسبه گردید. بدین منظور آشکارساز به ترتیب در فواصل مختلف از ۹ الی ۱۸ سانتی‌متر و زوایای متفاوت نسبت به محور چشمه از ۳۰ الی ۱۵۰ درجه قرار گرفت. در این تحقیق سعی بر آن بوده است تا وابستگی ضریب انباشت به عدد اتمی ماده، انرژی پرتو گاما فاصله نسبی آشکارساز- ماده- چشمه و زاویه‌ی آشکارساز مورد بررسی قرار گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب انباشت در گستره‌ی وسیعی از ۱ تا ۳۰۵ تغییر می‌کند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، پیشنهاد می‌گردد چنانچه هدف کاهش ضریب انباشت باشد لازم است چشمه، حفاظ و آشکارساز هم‌محور باشند. در غیر این صورت هر چه انحراف آشکارساز از محور مرکزی بیشتر باشد ضریب انباشت شار پرتوهای فوتونی در آشکارساز بیشتر می‌گردد.

کلیدواژگان: ضریب انباشت شار، چشمه‌ی گاما  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$  و  $^{14}\text{N}$ ، آشکارساز CsI(Tl)، روش مونت کارلو.

### ۱. مقدمه

هایی مهم از کاربرد تابش‌های هسته‌ای در شاخه‌ی پزشکی است. در رادیوتراپی بافت تومور تحت تابش قرار می‌گیرد در حالی که در رادیوگرافی از بافت‌های مورد نظر عکس‌برداری می‌شود. در هر دو مورد اخیر باید از رسیدن تابش‌های هسته‌ای استفاده شده به بافت‌های سالم تا حد لزوم ممانعت به عمل آید. به عنوان مثال در رادیوگرافی از ران و لگن برای محافظت از غدد جنسی در کودکان از لایه‌ی حفاظی سرب با ضخامت ۱ mm استفاده می‌شود [۱]. همچنین در رادیوگرافی بافت‌های صورت برای محافظت از چشم از دو حفاظ سربی با ضخامت ۰/۲۵ mm استفاده می‌شود [۲]. در مثالی دیگر در رادیوتراپی

با پیشرفت‌های روز افزون علوم در شاخه‌های گوناگون، تکنولوژی‌های هسته‌ای به نوبه‌ی خود با کاربردهای گسترده‌ای که در پزشکی، صنعت، کشاورزی و ... دارند از ارزش‌های روزافزونی برخوردار هستند. کاربرد گسترده‌ی تابش‌های هسته‌ای بخصوص فوتون و ایکس در حیطه‌های مختلف سبب شده است که از حفاظ‌های مختلف برای ایمنی از خطرات ناشی از پرتوها استفاده شود. این تابش‌ها در پزشکی در دو حیطه درمان و تشخیص، بسیار پرکاربرد هستند. در حیطه‌های درمانی و تشخیصی دو فرآیند رادیوتراپی و رادیوگرافی نمونه-

بافت سینه، در حد فاصل بین کلاهک استفاده شده و قفسه سینه، از حفاظی که بخش اصلی سازنده‌ی آن تنگستن است استفاده می‌شود [۳]. در رادیوتراپی فک و صورت و سر و گردن و دهان حفاظی به شکل ماسک که از مواد با عدد اتمی بالا (۵۰٪ بیسموت، ۲۶.۷٪ سرب، ۳.۳٪ قلع و ۱۰٪ کادمیوم) [۴] ساخته شده است، کاربرد دارد.

علاوه بر حوزه پزشکی، در حوزه‌های کشاورزی و صنعت نمی‌توان از نقش مؤثر این کمیت روی نتایج حاصله چشم-پوشی نمود. به عنوان مثال در مباحث مربوط به مین‌یابی یا اکتشاف‌های معدنی در محاسبات سنجش رطوبت خاک و یا شناسایی عناصر سازنده‌ی خاک در آزمایشگاه یا هر وضعیتی که حفاظ استفاده می‌شود بررسی ضریب انباشت این پرتوها در خاک‌های مورد مطالعه و اقدام به بهینه کردن این پارامتر جهت دقیق‌تر شدن نتایج نهایی بسیار حائز اهمیت است [۵]. علاوه بر مثال‌های بالا در حوزه تشخیص و درمان برای تخمین دزهای رسیده به بافت‌های بدن محاسبه ضریب انباشت بافت-های بدن بسیار حائز اهمیت است [۹،۸].

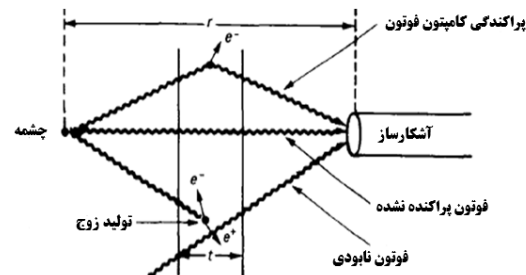
با توجه به اهمیت حضور حفاظ و این‌که بخش مهمی از تابش‌های اضافی بعد از پراکندگی‌های متعدد در داخل این حفاظ‌ها و بافت‌های تومور به بافت سالم می‌رسند و تأثیر بدی روی نتیجه‌ی خروجی می‌گذارند (به عنوان مثال در رادیوگرافی همین تابش‌های پراکنده شده در داخل حفاظ روی کیفیت عکس گرفته شده تأثیرگذار بوده و در رادیوتراپی باعث انباشته شدن شار اضافی در بافت‌های سالم اطراف تومور تحت درمان می‌شوند و در محاسباتی که نتیجه خروجی آن‌ها شار یا دز می‌باشد باعث ورود شار یا دز اضافی در محاسبات می‌شود). حذف این تابش‌های پراکنده شده که مسبب تولید ضرایب انباشت می‌باشند، ممکن نیست اما می‌توان این تابش‌ها را به حداقل رساند. ضریب انباشت این تابش‌ها در نقطه‌های مورد نظر کمیتی است که اثر این پرتوهای پراکنده شده را مدنظر قرار می‌دهد. یکی از مواردی که می‌توان با استفاده از آن

مقدار ضریب انباشت را بهینه ساخت چیدمان استفاده شده در آزمایش است. مکان چشمه و آشکارساز از مواردی است که روی کمیت ضریب انباشت تأثیرگذار می‌باشد. توضیحات اضافی مربوط به این کمیت در بخش فیزیک مسئله آورده شده است. با توجه به اهمیت کمیت ضریب انباشت در حوزه‌های مختلف تلاش‌های زیادی در جهت اندازه‌گیری این پارامتر انجام شده است. از آن‌جا که تعیین دقیق این ضرایب از طریق آزمایش در همه مواد و حالت‌های ممکن کار آسانی نیست، این ضرایب را اغلب با استفاده از سطح مقطع‌های جذب و پراکندگی فوتون‌ها محاسبه می‌کنند. کدهای مشهوری که می‌توان از آن‌ها برای محاسبه ضرایب انباشت استفاده نمود عبارتند از کد MCNP [۸]، کد BIGGI-4T [۱۰]، کد EGS4 [۱۱]، کد PALLAS-PL [۱۲] که به روش مونت-کارلو نوشته شده‌اند. در اکثر پژوهش‌هایی که در صده ۱۹۰۰ در رابطه با کمیت ضریب انباشت انجام شده است هدف محاسبه ضریب انباشت برای عناصر بوده است. هریمما در سال ۱۹۹۳ یک تاریخچه از ضریب انباشت جمع‌آوری کرده است که گواه این مطلب است [۱۱]. در این تاریخچه رابطه ضریب انباشت شار با انرژی و ترکیب مواد مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر تاریخچه‌ای که هریمما ارائه داده است در چند دهه اخیر پارامترهایی که ضریب انباشت با آن‌ها رابطه دارد با استفاده از کدهای مطرح شده مورد بررسی قرار گرفته است که در بین این کدها، کد MCNP نسبت به سایر کدها با اهمیت و پرکاربردتر است. تعدادی از این کارهای تحقیقاتی در مراجع ۱۳ تا ۱۷ ذکر شده‌اند. با توجه به مطالعات انجام گرفته از آنجایی که در تحقیقات انجام شده توسط دیگران تأثیر موضع آشکارساز و چشمه نسبت به هم روی ضریب انباشت شار مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است در این کار پژوهشی ما به بررسی اثر این پارامتر روی ضریب انباشت شار به روش مونت‌کارلو جهت استفاده در کاربردهای فیزیکی و پزشکی پرداخته‌ایم.

## ۲. فیزیک مسئله

ترابرد پرتو گاما در مواد برای یک باریکه‌ی همسانگرد نقطه‌ای از قانون تضعیف نمایی لامبرت بیر پیروی می‌کند.

$$I = B(E, X)I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$



شکل (۱): چشمه همسانگرد نقطه‌ای که در پشت سپری به ضخامت  $t$  قرار گرفته است و آشکارسازی که هم پرتوهای پراکنده شده و هم پرتوهای ناپراکنده را به سمت آشکارساز را ثبت می‌کند [۱۸].

هدف استفاده از حفاظ کاهش و یا ممانعت از رسیدن پرتوهای چشمه به نقطه مورد بررسی (بافت سالم، صفحه‌های رادیو گرافی، محیط اطراف چیدمان آزمایش) می‌باشد. اما در عمل شدت ثبت شده در آشکارساز بیشتر از شدتی است که فرمول لامبرت بیر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ این شدت اضافی ثبت شده توسط آشکارساز مربوط به فوتون‌هایی است که طی برهم‌کنش با حفاظ پراکنده شده و در حالی که قبلاً شانس برای رسیدن به آشکارساز نداشتند اکنون و در حضور حفاظ و به لطف اندرکنش‌های کامپتون و تولید زوج این شانس را برای رسیدن به آشکارساز به دست می‌آورند. در این شرایط معادله‌ای که برای شدت پرتو گاما ثبت شده در آشکارساز در نظر گرفته می‌شود، معادله‌ی تصحیح شده‌ی (با در نظر گرفتن ضریب انباشت) برای یک باریکه موازی به صورت ذیل است. و برای یک چشمه‌ی نقطه‌ای به صورت رابطه‌ی (۲) است.

$$I = \frac{B(E, X)I_0 e^{-\mu x}}{4\pi r^2} \quad (2)$$

در رابطه ۱ و ۲،  $I_0$  شدت پرتوهای گسیلی از چشمه،  $I$  شدت پرتوهای عبوری،  $r$  فاصله چشمه از آشکارساز،  $S$  تعداد گاماها گسیل شده توسط چشمه در یک ثانیه،  $B$  ضریب

انباشت،  $X$  ضخامت ماده جاذب و  $\mu$  ضریب تضعیف خطی است که به انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی محیط بستگی دارد. ضریب انباشت<sup>۱</sup> برای کمیت‌هایی چون شار<sup>۲</sup>، دز<sup>۳</sup> و پرتودهی<sup>۴</sup> به کار می‌رود. ضریب انباشت به صورت زیر تعریف می‌شود:

در عبور تابش از یک محیط، نسبت مقدار کل یک کمیت تابشی خاص (شار، دز، تعداد ذرات، انرژی ذخیره شده و...) در یک نقطه از توزیع به مقدار همان کمیت تابشی ثبت شده در نقطه مورد نظر بدون این که حتی یک برخورد داشته باشد. ضریب انباشت نامیده می‌شود.

پراکندگی پرتوهای مورد مطالعه در داخل حفاظ، کمیت موثر روی ضریب انباشت است با توجه به مطالعات انجام شده محاسبه‌ی شار این پرتوها که بعد از پراکندگی به آشکارساز می‌رسند با حل معادلات بسیار پیچیده‌ای همراه است. زیرا پارامترهایی مثل ضرایب تضعیف جرمی، سطوح مقاطع اندرکنش این پرتوها با مواد و... با عدد اتمی و انرژی رابطه پیچیده‌ای دارند، که بخشی از روابط مربوط به محاسبه‌ی شار پرتوهای مربوط به پراکندگی‌های چندگانه در ادامه ارائه خواهد شد. در ترابرد فوتون‌ها در گذر از مواد مسیر فوتون‌ها از چشمه تا آشکارساز به سه مرحله تقسیم می‌شود در مرحله اول تضعیف پرتو گاما در طول مسیر از چشمه تا نقطه پراکنده انجام شده و در مرحله دوم اندرکنش در حجم  $\Delta V$  و پراکندگی در زاویه‌ی فضایی  $d\Omega$  و در مرحله سوم تضعیف از حجم پراکنده تا آشکارساز انجام می‌گیرد. معادله حاصل از ترکیب این سه مرحله به صورت زیر است:

$$I(P) = I_0 \exp\left[\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x\right] \frac{d\sigma(E_0, \theta)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega \times \rho_e(P) V \exp\left[\frac{\mu(E)}{\rho}\rho x'\right] \quad (3)$$

<sup>1</sup>Buildup factor

<sup>2</sup>Flux

<sup>3</sup>Dose

<sup>4</sup>Exposure

ضریب انباشت در اصل به صورت آزمایشگاهی نیز محاسبه می‌شود؛ اما از آنجایی که ضرایب تضعیف و سطوح مقطع مواد با دقت قابل قبولی شناسایی شده‌اند، ضرایب انباشت مواد در بیشتر موارد با حل معادلهٔ ترابرد فوتون یا توسط روش مونت کارلو محاسبه می‌شوند [۲۰].

با توجه به توضیحات ارائه شده در فوق، در این پژوهش اثر تغییر مکان هندسی آشکارساز نسبت به چشمه به روی ضریب انباشت شار فوتون‌ها به روش مونت کارلو بررسی شده است. در همین راستا از کد محاسباتی دقیق MCNP [۲۱] استفاده شده است. همانطوری که در مقدمه ذکر شد، یکی از پارامترهایی که ضریب انباشت به آن وابسته است چیدمان آزمایشگاه می‌باشد. یکی از ابزارهای آزمایشگاهی، آشکارساز است و از آنجایی که پراکندگی پرتوهای گاما در راستاهایی نامشخص و به صورت کاتوره‌ای رخ می‌دهد، مکان آشکارساز که برای ثبت پرتوهای گاما به کار می‌رود تأثیر به‌سزایی روی ضریب انباشت دارد. از آنجایی که تحقیقات چندانی در این زمینه انجام نشده است، در این کار تحقیقی سعی بر این است که این پارامتر به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و راستایی که با قرارگرفتن آشکارساز در آن راستا، کمترین ضریب انباشت را داشته باشد، مشخص شود. و در انتها مشخص می‌شود که آیا تغییرات انرژی چشمه و تغییر فاصله شعاعی آشکارساز از حفاظ روی این راستا تأثیرگذار است یا خیر.

### ۳. روش کار

این کار محاسباتی در سه بخش انجام شد در بخش اول حین این که رابطه‌ی ضریب انباشت با تغییر راستای آشکارساز مورد بررسی قرار می‌گیرد این مقایسه و بررسی در سه فاصله شعاعی ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ سانتی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفته تا علاوه بر اینکه اثر تغییر زاویه‌ای مکان آشکارساز روی ضریب انباشت مورد بررسی قرارگیرد، تأثیر تغییر فاصله‌ی

که  $I_0$  شدت فرودی و  $\mu(E_0)/\rho$  ضریب تضعیف جرمی کل برای انرژی فرودی،  $\mu(E)/\rho$  ضریب تضعیف جرمی برای انرژی پراکنده شده،  $d\sigma(E_0, \theta)/d\Omega$  سطح مقطع پراکندگی دیفرانسیلی که به وسیله‌ی رابطه کلین-نیشینا داده می‌شود،  $S$  تابع پراکندگی کامپتون (یک تابعی از انرژی فوتون فرودی  $E_0$ ، زاویه پراکندگی  $\theta$ ، عدد اتمی عنصر  $Z$ )،  $d\Omega$  زاویه فضایی،  $V$  حجم کوچکی از ماده،  $x'$  و  $x$  به ترتیب مسیر فوتون‌های پراکنده شده و فرودی درون ماده،  $\rho_e(P)$  چگالی الکترون در نقطه‌ی پراکندگی  $P$  است. چگالی الکترون در نقطه  $P$  بستگی به ماده دارد و طبق رابطه زیر متناسب با چگالی فیزیکی  $\rho$  است:

$$\rho_e = \rho N \frac{Z}{A} \quad (۴)$$

که  $N$  عدد اتمی ماده و  $A$  وزن اتمی است. برای یک چشمه و آشکارساز با مکان‌های ثابت معادله ۱ به صورت زیر کاهش پیدا می‌کند:

$$I(P) = K\rho \exp\left[-\left(\frac{\mu(E_0)}{\rho}\right)\rho x\right] \exp\left[\frac{\mu(E)}{\rho}\rho x'\right] \quad (۵)$$

که

$$K = \frac{d\sigma(E_0, \theta)}{d\Omega} S(E_0, \theta, Z) d\Omega N \frac{Z}{A} V \quad (۶)$$

$$\mu(1/m) = \tau + \sigma + k$$

$$\tau(1/m) = \sigma N \frac{Z^m}{E\gamma^n}, 3 \leq (m, n) \leq 5 (\sim keV) \quad (۷)$$

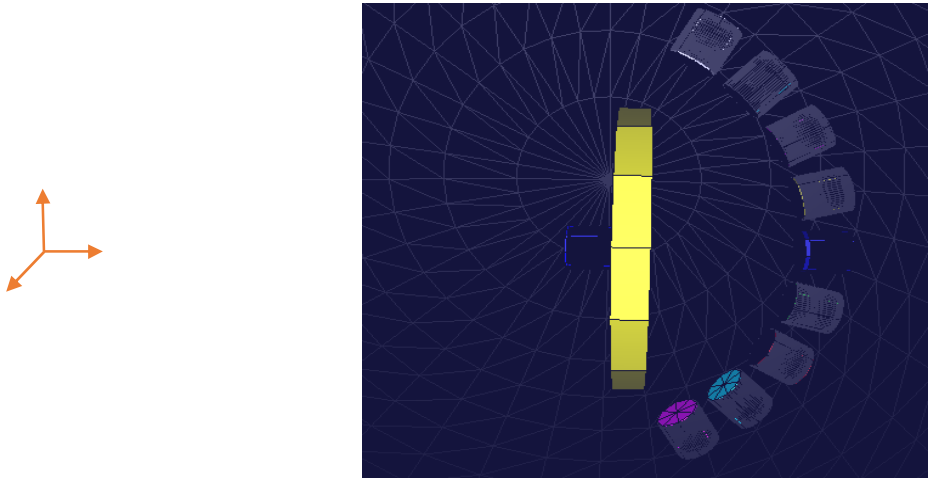
$$\sigma(1/m) = \sigma N z f(E_\gamma), 0.6 MeV \leq E_\gamma \leq 6 MeV \quad (۸)$$

$$k(1/m) = \sigma N z^2 f(E_\gamma), 6 MeV \leq E_\gamma \quad (۹)$$

$K$  برای یک مجموعه آزمایشگاهی و انرژی فرودی مفروض، ثابت است [۱۹]. در روابط بالا،  $\tau$ ، احتمال رخداد اندرکنش فوتو الکترونیک در واحد طول است که این اندرکنش برای فوتون‌هایی با انرژی در حدود کیلو الکترون ولت رخ می‌دهد.  $\sigma$  احتمال رخداد اندرکنش کامپتون در واحد طول است.  $k$  احتمال رخداد اندرکنش تولید زوج است.

برای بررسی تأثیر تغییر زاویه‌ای مکان آشکارساز روی ضریب انباشت، مطابق شکل ۲ آشکارساز با گام ۱۵ درجه‌ای، حول مرکز حفاظ چرخانده شد و در هر کدام از این مواضع محاسبات مربوطه انجام شد.

شعاعی آشکارساز روی ضریب انباشت نیز بررسی شود. شعاع‌ها و فواصل در شبیه‌سازی طوری انتخاب شده است که تداخل بین سطوح رخ ندهد. در این بررسی فاصله شعاعی نسبت به مرکز حفاظ در نظر گرفته شد.



شکل (۲): توزیع زاویه‌ای آشکارساز CSI(TI) در حضور چشمه فوتونی ( $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$  و  $^{14}\text{N}$ ) و لایه حفاظی فوتون (سرب، آهن و آلومینیوم) جهت بررسی اثر مکان آشکارساز روی ضریب انباشت.

این بخش علاوه بر بررسی تغییرات ضریب انباشت شار نسبت به راستای آشکارساز برای هر کدام از مواد، تغییرات ضریب انباشت نسبت به تغییر انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق آشکارساز استفاده شده، آشکارساز CsI(Tl) است. ضخامت ماده حفاظی ثابت و برابر ۱/۵۵cm است. در این پروژه برای بررسی اثر پارامتر مورد بررسی روی ضریب انباشت شار از کد شبیه‌ساز دقیق MCNP استفاده شده است که به روش مونت کارلو نوشته شده است. در کار به کمک تالی F4 (آشکارساز حجمی) شار کل فوتون‌ها و شار کل فوتون-های غیربرخوردی در حجم مورد نظر به دست آمده و طی یک برنامه‌ای که به زبان فرترن نوشته شده است ضرایب انباشت شار در حجم مورد نظر و حالت‌های مختلف به دست آمد. لازم به ذکر است که برای به حداقل رساندن اثر فاصله چشمه از حفاظ روی ضریب انباشت، چشمه با فاصله بسیار کمی نسبت به حفاظ قرار گرفته است. همچنین برای کاهش خطای آماری

در بخش دوم، اثر تغییر انرژی فوتون‌ها در محاسبات مربوطه وارد شد. به این صورت که بررسی اثر تغییر زاویه‌ای مکان آشکارساز روی ضریب انباشت در سه وضعیت انجام شد. در هر وضعیت از یکی از چشمه‌های  $^{137}\text{Cs}$  با انرژی ۰/۶۶ MeV،  $^{60}\text{Co}$  با انرژی متوسط ۱/۲۵ MeV و  $^{14}\text{N}$  با انرژی ۶/۲ MeV به عنوان چشمه‌ی فوتونی استفاده شده است. انتخاب این چشمه‌ها بر این اساس است که بخش گسترده‌ای از طیف انرژی که در آن بازه برهم‌کنش کامپتون، به عنوان مهمترین برهم‌کنش دخیل در کمیت ضریب انباشت، حضور دارد مورد بررسی قرار گیرد. از آنجایی که احتمال رخداد اندرکنش کامپتون در هر انرژی برای مواد با اعداد اتمی مختلف، متفاوت است. در این بخش بررسی هر انرژی برای سه ماده‌ی پرکاربرد به عنوان حفاظ فوتونی (Pb و Fe، Al) انجام شد. در بخش سوم که بیان دیگری از بخش دوم است برای هر کدام از مواد حفاظی بررسی سه انرژی مطرح شده انجام شد. در واقع در

زاویه‌های بزرگتر اختلاف بین ضرایب انباشت بیشتر می‌شود و در زاویه‌های کم آشکارساز نسبت به محور مرکزی اختلاف بین ضرایب انباشت کم است. با توجه به این‌که با افزایش فاصله از حفاظ زاویه فضایی بین آشکارساز و حفاظ افزایش یافته و سطح بیشتری از حفاظ را تحت پوشش قرار می‌دهد امکان رسیدن پرتوهای پراکنده شده از حفاظ به آشکارساز بیشتر می‌شود.

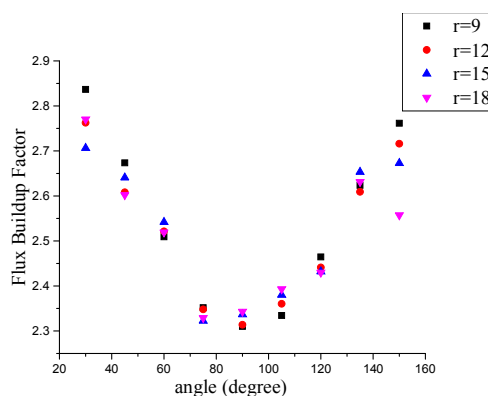
در زوایای مرکزی (۹۰، ۷۵، ۱۰۵) اختلاف بین ضرایب انباشت کم است و در تمام فاصله‌ها زاویه ۹۰ درجه (چشمه، آشکارساز و حفاظ در یک راستا) کمترین مقادیر برای ضرایب انباشت را به دست می‌دهد. با توجه به کاتوره‌ای بودن راستای فوتون‌های پس پراکنده شده در حضور چشمه‌ی فوتونی همسانگرد، ضرایب انباشت در زوایای ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۵۰ نسبت به بقیه زوایا مقدار بیشتری دارد و این خود معیاری است که در این زوایا احتمال رسیدن فوتون‌های ثانویه پراکنده شده از حفاظ به آشکارساز بیشتر است.

و محاسباتی کار، از کارت کاهش واریانس imp استفاده شده است و برنامه در هر کدام از مواد و انرژی‌های مربوطه اجرا شد.

نتایج هر کدام از بررسی‌های مربوط به هر بخش در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به صورت نمودار ارائه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی راستای ۹۰ درجه دارای کمترین مقدار ضریب انباشت می‌باشد. که این مطلب حاکی از این است که پرتوهای فوتونی کمتری بعد از برهمکنش در داخل حفاظ و پراکندگی به سمت آشکارساز در این راستا به آشکارساز رسیده اند.

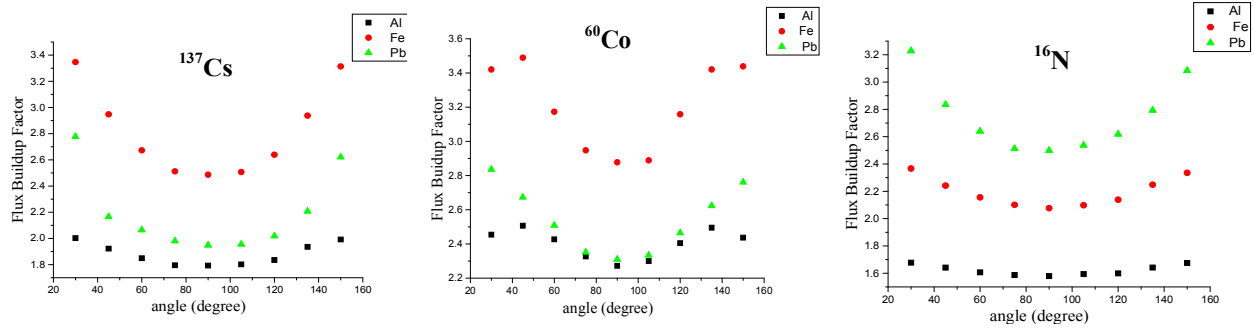
#### ۴. نتایج

۱.۴. بررسی تغییرات ضریب انباشت شار نسبت به فاصله شعاعی آشکارساز از مرکز حفاظ برای راستاهای مختلف آشکارساز نسبت به مرکز حفاظ  
با توجه به شکل ۳ با افزایش فاصله شعاعی از آشکارساز در



شکل (۳): بررسی تغییرات ضریب انباشت شار نسبت به فاصله شعاعی آشکارساز CsI(Tl) از مبدأ مختصات برای راستاهای مختلف آشکارساز نسبت به مرکز حفاظ سربی و در حضور چشمه کبالت با انرژی ۱/۲۵MeV

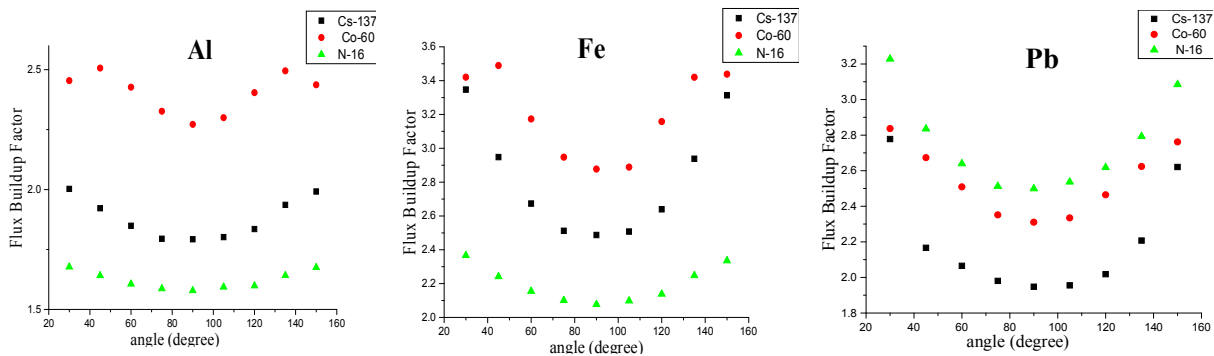
۲.۴. بررسی تغییرات ضریب انباشت شار نسبت به توزیع زاویه‌ای آشکارساز برای سه چشمه  $^{14}\text{N}$ ،  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{137}\text{Cs}$



شکل (۴): تغییر ضرایب انباشت شار نسبت به راستای آشکارساز برای سه ماده حفاظی Al، Fe و Pb برای سه چشمه  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$  و  $^{16}\text{N}$ .

۳.۴. بررسی تغییرات ضریب انباشت شار نسبت به توزیع زاویه‌ای آشکارساز برای سه ماده‌ی حفاظی از جنس

آلومینیوم، آهن و سرب

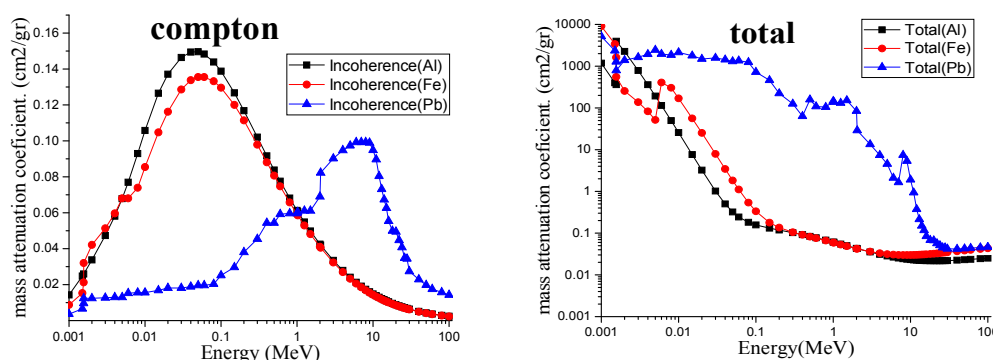


شکل (۵): تغییر ضرایب انباشت شار نسبت به راستای آشکارساز برای سه چشمه  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$  و  $^{16}\text{N}$  و برای سه ماده حفاظی Al، Fe و Pb.

اندرکنش‌ها در بررسی نمودارهای بالا بسیار مهم است. با توجه به انرژی چشمه‌های استفاده شده، اندرکنش غالب و تأثیرگذار روی کمیت ضریب انباشت شار در محل آشکارساز اندرکنش کامپتون است. در شکل ۶ احتمال رخداد اندرکنش کامپتون و احتمال اندرکنش کل با فوتون سه ماده حفاظی ترسیم شده است. لازم به ذکر است که سطوح مقطع اندرکنش با فوتون این مواد حفاظی از بانک اطلاعاتی NIST XCOM [۲۲] استخراج شده است.

احتمال اندرکنش‌های فوتون با عناصر (فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج) با توان‌های مثبت عدد اتمی رابطه‌ی مستقیم دارد، فرمول‌های ۸،۷ و ۹، با افزایش عدد اتمی احتمال اندرکنش‌ها بیشتر می‌شود.

با توجه به اینکه پرتوهای فوتونی ثانویه ایجاد شده حین اندرکنش فوتون اولیه با حفاظ و پراکندگی و عدم جذب این فوتون‌ها طی برهمکنش‌های بعدی در حفاظ تأثیر بسیاری روی کمیت ضریب انباشت دارند از این رو احتمال رخداد این



شکل (۶): تغییرات ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی برای دو حالت کامپتون و کل برای سه عنصر Fe, Al و Pb در بازه‌ی انرژی ۰ تا ۱۰۰

#### مگاالکترون ولت

بخش دوم است، هدف در درجه اول نشان دادن تغییرات ضریب انباشت با راستای آشکارساز و انتخاب راستای با کمترین ضریب انباشت است اما در درجه دوم بررسی این سوال است که رفتار تغییرات بررسی شده برای هر عنصر حفاظی در سه ناحیه انرژی چگونه است. با توجه به توضیحات داده شده علیرغم اینکه احتمال رخداد اندرکنش کامپتون برای آلومینیوم بیشتر از آهن و برای آهن هم بیشتر از سرب است، اما همانطور که قبلاً مطرح شد چگالی عناصر بررسی شده در اینجا نقش بسیار مؤثری در افزایش تعداد این اندرکنش در حفاظ سربی نسبت به حفاظ آهنی و در حفاظ آهنی نسبت به حفاظ آلومینیومی بازی می‌کند. وابستگی اندرکنش کامپتون به عدد اتمی بسیار ناچیز است و برای گستره‌ی وسیعی از عناصر رخ می‌دهد. برای موادی با عدد اتمی پایین مثل آلومینیوم و آهن، اندرکنش اصلی اندرکنش کامپتون است. با توجه به شکل ۶ اختلاف بین سطوح مقطع کامپتون برای فوتون‌های مربوط به چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  با انرژی  $0.661\text{MeV}$  و فوتون‌های مربوط به چشمه‌ی  $^{60}\text{Co}$  با انرژی  $1.20\text{MeV}$  و در حضور دو حفاظ آهنی و آلومینیومی بسیار کم است. احتمال جذب فوتون‌های ثانویه حاصل از برهمکنش فوتون‌های  $^{137}\text{Cs}$  با عناصر حفاظی بیشتر از  $^{60}\text{Co}$  است. این مطلب نشان می‌دهد که احتمال خروج فوتون‌های پراکنده شده از حفاظ مربوطه و رسیدن به آشکارساز در

با توجه به شکل ۶ احتمال رخداد اندرکنش کامپتون برای آلومینیوم و برای فوتون‌های مربوط به چشمه‌های مطرح شده، بیشتر از آهن و سرب است. اما با این وجود ضرایب انباشت شار برای سرب و آهن همانطوری که شکل ۴ نشان می‌دهد، بیشتر از آلومینیوم است. چگالی سرب و آهن نقش بسیار مهمی در کاهش پویش آزاد میانگین این دو عنصر بازی می‌کند. به صورتی که این عامل تعداد اندرکنش‌های پراکندگی را در این دو ماده‌ی حفاظی افزایش می‌دهد با توجه به شکل ۶ آلومینیوم دارای بیشترین پویش آزاد میانگین است و این به این معنی است که فوتون‌ها تا رخداد اولین برهم‌کنش کامپتون در داخل آلومینیوم ضخامت بیشتری از این ماده حفاظی را بدون هیچ برهم‌کنشی پشت سر می‌گذارد. به همین علت تعداد پرتوهای فوتونی اندرکنش کرده در داخل حفاظ آلومینیومی و به تبع آن پراکنده شده به سمت آشکارساز نسبت به حفاظ‌های آهنی و سربی کمتر است. در حالت استفاده از چشمه  $^{16}\text{N}$  وضعیت برای آهن و سرب کمی متفاوت‌تر از  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  است زیرا در این حالت برای سرب امکان رخداد اندرکنش تولید زوج نیز علاوه بر کامپتون وجود دارد. حضور این فوتون‌ها در داخل حفاظ و اندرکنش آن‌ها و پراکنده شدن آن‌ها به سمت آشکارساز علت زیاد بودن ضریب انباشت شار فوتون‌ها در حضور سرب به عنوان حفاظ و  $^{16}\text{N}$  به عنوان چشمه‌ی فوتونی می‌باشد. در بخش سوم که بیانی دیگر از



حضور  $^{60}\text{Co}$  بیشتر از  $^{137}\text{Cs}$  است. کمیت مهم دیگر پویش آزاد میانگین و تعداد اندرکنش‌های کامپتونی است که در مطالب قبلی توضیح داده شد. به خاطر این عوامل ضرایب انباشت در حالت استفاده از چشمه‌ی  $^{60}\text{Co}$  بزرگتر از  $^{137}\text{Cs}$  است. برای عناصری با عدد اتمی پایین در انرژی‌های بالا ( $^{16}\text{N}$ ) احتمال اندرکنش کامپتون کم شده و احتمال اندرکنش کل هم کاهش می‌یابد و این یعنی احتمال اندرکنش با حفاظ کم بوده و در نهایت پرتوهای فوتونی پراکنده شده‌ای که بعد از اندرکنش در حفاظ خود را به آشکارساز برسانند، کم خواهد بود. در حضور سرب و در انرژی‌های بالا احتمال رخداد اندرکنش تولید زوج هم وجود دارد این عامل در کنار اندرکنش‌های بیشتری که برای فوتون‌ها در داخل سرب نسبت به دو عنصر دیگر رخ می‌دهد عامل افزایش ضریب انباشت در حضور  $^{16}\text{N}$  نسبت به انرژی‌های پایین‌تر است. همانطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌شود راستای ۹۰ درجه‌ی آشکارساز در تمام حالت‌ها کمترین ضریب انباشت را نسبت به بقیه راستاها دارا می‌باشد. و این مطلب گواه این است که در این راستا فوتون‌های پراکنده شده‌ی کمتری به آشکارساز می‌رسند. با کاهش زاویه‌ی راستای آشکارساز به سمت زوایای ۷۵، ۶۰، ۴۵ و ۳۰ و همچنین افزایش این زاویه از ۹۰ به ۱۰۵، ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۵۰ به ترتیب ضریب انباشت در تمام حالات افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعداد فوتون‌هایی که دستخوش اندرکنش با حفاظ‌های مربوطه شده و به سمت آشکارسازها در این نقاط پراکنده می‌شوند بسیار بیشتر از راستای ۹۰ درجه‌ی آشکارساز است که همین عامل باعث افزایش شار کاذب در این نقاط شده و ضریب انباشت بیشتری را نسبت به راستای ۹۰ درجه موجب می‌شوند.

##### ۵. نتیجه‌گیری نهایی

برای آشکارسازی ذرات و اندازه‌گیری کمیت‌هایی از قبیل شار، دز و... آشکارسازها نقش بسیار مهمی را در آرایش تجهیزات

آزمایشگاهی بازی می‌کنند. از طرف دیگر یکی از کمیت‌های مهم در مباحث مربوط به ترابرد و تضعیف تابش‌های گاما ضرایب انباشت هستند. در این مطالعه سعی شد که اثر مکان آشکارساز روی این کمیت مورد مطالعه قرار گیرد. مواد استفاده شده در این مطالعه (Pb و Fe, Al) موادی بودند که کاربرد بسیاری در طراحی حفاظ برای پرتوهای فوتونی داشتند. چشمه‌های استفاده شده  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{60}\text{Co}$  و  $^{16}\text{N}$  بودند و سعی شد انرژی چشمه‌ها طوری باشد که بخش گسترده‌ای از طیف انرژی مد نظر قرار گیرد. در این مطالعه از کد شبیه‌ساز MCNP که به روش مونت‌کارلو نوشته شده است، استفاده شد. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش ۲ اندرکنش غالب در ایجاد انباشتگی فوتون در آشکارساز برای عناصری با اعداد اتمی پایین و میانی کامپتون است و بسته به انرژی فوتون فرودی احتمال این اندرکنش بالا و پایین می‌شود. و در انرژی‌های بالای فوتونی بسته به عدد اتمی عنصر تشکیل دهنده برهمکنش تولید زوج هم دارای احتمال رخداد بالا و پایین است. اما در تمام حالات مکانی و راستای آشکارساز که ضریب انباشت دارای کمترین مقدار است مکان‌ها و راستاهایی است که چشمه و آشکارساز و حفاظ هر سه در یک راستا قرار می‌گیرند. در نمودارهای ۳، ۴ و ۵ این راستا با زاویه‌ی ۹۰ درجه نشان داده شده است. پیشنهاد می‌شود برای انباشتگی کمتر فوتون‌ها در آشکارساز و کاهش دادن ضرایب انباشت در آزمایشگاه‌ها از این راستا برای ثبت کمیت‌های مورد مطالعه استفاده گردد. لازم به ذکر است که بسته به شرایط مسئله ضرایب انباشت نقش مفید و یا مضر را بازی می‌کند. به عبارت دیگر ممکن است در طی انجام مطالعات هدف افزایش شار در آشکارساز و به عبارت دیگر افزایش ضریب انباشت باشد در این شرایط زوایای با انحراف بیشتر از محور مرکزی پیشنهاد می‌شود.

## ۶. مراجع

- [1] Sl. Fawcett and et al. The use of gonad shielding in paediatric hip and pelvis radiographs. *The British Journal of Radiology*. 82(2009)363–370.
- [2] J.E. Ngaile and etal. Use of Lead Shields for Radiation Protection of Superficial Organs in Patients Undergoing Head Ct Examinations, *Radiation Protection Dosimetry*. 130(2008) 490–498.
- [3] J.S. Vaidya, J.S. Tobias, M. Baum and et al. Intraoperative radiotherapy for breast cancer. *Lancet Oncol*. 5(2004) 165–73.
- [4] M. Farahani, F. Eichmiller. Metalpolysiloxane shields for radiation therapy of maxillo-facial tumors. *Med. Phys*. 18 (1991) 273–278.
- [5] S.D. Jasbir, S. Barjinderpal, S.S. Gurdeep. Gamma ray photon energy absorption buildup factor study in some soils. *J. Appl. Phys*. 1(2012)14–21.
- [6] G.S. Brar, G.S. Sidhu, P.S. Sandhu, G.S. Mudahar. variation of buildup factors of soil with weight fractions of Iron and silicon. *Appl. Radiat. Isot*. 49(1998) 977-980.
- [7] S. Gupta, G. Singh Sidhu. A comprehensive study on energy absorption and exposure buildup factors for some soils and ceramic materials. *Journal of Applied Physics*. 2(2012)24–30.
- [8] S. Manohara. Energy absorption buildup factor of human organs and tissues at energies and penetration depths relevant for radiotherapy and diagnostics. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 12(2011) 296-312.
- [9] D. Sardari. Estimation of gamma and x-ray photons buildup factor in soft tissue with Monte Carlo method. *Applied Radiation and Isotope*. 67(2009) 1438-1440.
- [10] M.F. Chen, R.E. Faw. Build up factors for gamma rays obliquely incident on slab shields of concrete, iron and lead. *Radiation Protection Dosimetry*. 51(1994)27-33.
- [11] Y. Harima. An historical review and current status of buildup factor calculations and applications. *Radiat.Phys.Chem*. 41(1993)631-672.
- [12] Y. Harima. An historical review and current status of buildup factors calculation and application. *Radiat. Phys. Chem*. 152 (1992) 2-12.
- [13] k. Singh Man, J. Singla, V. Kumar, G.S. Sidhu. Verification of some building materials as gamma-ray shields. *Radiation protection dosimetry*. 151(2012) 183-195.
- [14] S. Vishwanath. The Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy material. *Annals of Nuclear Energy*, 64(2014)301-310.
- [15] S. Tejbir, K. Kumar. Chemical composition dependence of exposure buildup factor for some polymers. *Annals of Nuclear Energy*, 36(2009) 114-120.
- [16] V. Pathak. Energy absorption buildup factor studies in some solids. *IOSR Jurnal of Applied Physics*. 3 (2013)18-24.
- [17] V. Singh, N. Badiger. Photon energy absorption buildup factors of gaseous mixtures used in radiation detector. *Radioprotection*, 48(2013)63-78.
- [18] N. Tsoulfanidis. *Measurement and Detection of Radiation*. 2th edition University of Missouri-Rolla Press, (1995).
- [19] P. Priyada. An improved Compton scattering method for determination of concentration of solutions. *Applied Radiation and Isotopes*. 70(2012) 2421–2427.
- [20] A. Shirani. Calculation of exposure buildup factors for point isotropic gamma ray sources in stratified spherical shields of water surrounded by lead and optimization of water-lead combination. *Iranian Journal of Science & Technology*. 1(2013) 29-34.
- [21] D.B. Pelowitz. *MCNPX USER 'S MANUAL*. Version 2.5.0,(2005).
- [22] [http://www.nist.gov/pml/data/xray\\_gamma.cfm](http://www.nist.gov/pml/data/xray_gamma.cfm).
- [23] N.M. Schaeffer. *Reactor Shilding for Nuclear Engineers*. U.S.Atomic energy commission, (1973).
- [24] A. Chilton, J.K. Shultis and R. Faw. *Principle of radiation shielding*. Prentic Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1984).
- [25] V.P. Singh and N.M. Badiger. Comprehensive study of energy absorption and exposure build-up factors for concrete shielding in photon energy range 0.015-15 MeV up to 40 mfp penetration depth: dependency of density, chemical elements, photon energy. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*. 7(2015)75-99.
- [26] K. Shin, H. Hirayama. Calculation of gamma-ray build up factors for twolayered shields made of water, concrete and iron and application of approximating formula. *Radiation physics and chemistry*. 61(2001) 583-584.
- [27] M. Alamatsaz. A study of gamma ray exposure buildup factors in stratified shields for point isotropic sources, including the effects of incoherent scattering. *Journal of sciences, islamic republic of iran*. 13(2002) 271-279.
- [28] H. Kharrati. Monte Carlo simulation of photon buildup factors for shielding materials in diagnostic x-ray facilities. *Med. Phys*. 39(2012)6014-6021.
- [29] E. Bursalioglu. Energy absorption and exposure buildup factors of essential amino acids. *Bio Med Research International*. 2014(2014) 1-7.
- [30] MAK. Shahid, MA. Nadeem. Experimental investigation of gamma radiation shielding characteristics for different absorbing materials. *International Journal of Core Engineering & Management*. 2(2015) 1-15.