

## اندازه‌گیری ضریب انباشت شار پرتوهای گامای چشمه‌های سزیم و کبالت در فلزات آلومینیوم، مس و سرب به‌عنوان ماده محافظ

عمار واحدیان موحد\* و حسین توکلی عنبران

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.  
سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱.  
پست الکترونیکی: ammar.vahedian@gmail.com

### چکیده

در این تحقیق از فلزات آلومینیوم، مس و سرب به‌عنوان مواد محافظ در برابر پرتوهای گاما در انرژی‌های  $0.662 \text{ MeV}$ ،  $1.173 \text{ MeV}$ ،  $1.332 \text{ MeV}$  استفاده شده است. هر چه انرژی اشعه گاما بیشتر باشد، آسیب بیشتری به بافت انسان می‌زند. سرب یک ماده سمی است و از طرفی چگالی آن زیاد است؛ ولی آلومینیوم یک ماده غیرسمی است و چگالی آن نسبت به مس و سرب کمتر است. در هنگام ساخت لباس برای محافظت در برابر اشعه مضر هر چه وزن لباس کمتر باشد بهتر است؛ زیرا پرسنلی که از چنین لباس‌هایی استفاده می‌کنند، کمتر خسته می‌شوند. در گستره‌ای از انرژی پرتوهای گاما اثر تضعیف آلومینیوم و سرب با یکدیگر تقریباً برابر است و از طرفی چون آلومینیوم نسبت به سرب سبک‌تر است می‌توان از حفاظ ترکیبی آلومینیوم و سرب استفاده نمود که منجر به سبک‌شدن حفاظ می‌گردد. در واقع پرتوهای گاما در این گستره انرژی ابتدا با پراکندگی‌های کامپتون متوالی به ناحیه انرژی پایین منتقل می‌شوند و اگر همچنان از ماده خارج نشده باشند، در اتم‌های سرب جذب می‌گردند؛ بنابراین حفاظ ترکیبی منجر به کاهش وزن قابل توجه می‌گردد. در این تحقیق داده‌های تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه شده است و مطابقت خوبی با هم دارند. در محاسبه داده‌های شبیه‌سازی از کد MCNPX استفاده شده است.

کلیدواژه‌گان: ضریب انباشت، پرتوگاما، حفاظ، چشمه سزیم، چشمه کبالت.

### ۱. مقدمه

پرتوگاما و نوترون برخلاف ذرات آلفا و بتا خنثی هستند. این باعث از دست رفتن انرژی این ذرات باردار از طریق برهم‌کنش‌های کولنی با هوا می‌شود، بنابراین تشعشعات آلفا و بتا با چند سانتی‌متر حرکت در هوا متوقف می‌شوند. پرتوهای گاما و نوترون بسیار نافذ هستند و به راحتی می‌توانند مسافت را برحسب کیلومتر در هوا طی کنند. بنابراین می‌توان ارزیابی کرد که پرتوهای گاما و نوترون‌ها خطرناک‌ترین تشعشعات در مورد

اثرات مضر تشعشعات در دنیای امروز به‌خوبی شناخته شده است. به دلیل پیشرفت سریع فناوری، میزان تشعشعات روزبه‌روز در حال افزایش است؛ بنابراین محافظت از بدن انسان، حیوانات و حتی محیط‌زیست در برابر چنین اثرات خطرناک تشعشعات یونیزان ضروری است. در واقع تابش، انرژی است که به‌صورت امواج الکترومغناطیسی یا ذرات ساطع می‌شود. اساساً پرتوهای یونیزه‌کننده آلفا، بتا، نوترون و گاما هستند.

## ۲. فیزیک مسأله

برهم‌کنش فوتون‌ها با محیط جاذب، طیف انرژی آن‌ها را به دو جزء اصلی تقسیم می‌کند: برخورد نشده و برخورد شده. مؤلفه برخورد نشده متشکل از فوتون‌هایی است که هیچ برهم‌کنشی با محیط جاذب را تجربه نکرده‌اند. جزء برخورد شده به فوتون‌هایی اطلاق می‌شود که یک یا چند بار پراکنده شده‌اند و همچنین فوتون‌هایی ثانویه، مانند اشعه ایکس ناشی از تابش ترمزی<sup>۱</sup> یا پرتوهای گاما ناشی از نابودی زوج الکترون-پوزیترون [۷]. طبق قانون بیر-لامبرت برای پرتوهای موازی ایکس و گامای، تک انرژی و ماده جاذب با ضخامت نازک، پرتوهای ایکس و گاما پس از عبور از ماده جاذب مطابق رابطه (۱) تضعیف می‌شوند. در رابطه (۱) فرض می‌شود که هیچ پرتو پراکنده‌ای

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

نمی‌تواند به آشکارساز برسد؛ به عبارت دیگر در حالت ایده‌آل با برقراری سه شرط قانون بیر-لامبرت پرتوها یا بدون اندرکنش از ماده جاذب عبور می‌کنند و به آشکارساز می‌رسند یا یک‌بار با ماده جاذب برهم‌کنش می‌کنند و به آشکارساز نمی‌رسند. با افزایش ضخامت احتمال پراکندگی چندگانه افزایش می‌یابد؛ بنابراین احتمال رسیدن پرتوهای پراکنده به آشکارساز افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی برای تصحیح قانون بیر-لامبرت یک پارامتر اصلاحی مورد نیاز است. قانون اصلاح شده بیر-لامبرت در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$I = I_0 Be^{-\mu x} \quad (2)$$

نشت تشعشعات هسته‌ای هستند. با توجه به افزایش قرارگرفتن در معرض این تشعشعات، لازم است موادی تولید شوند که بتوان از آن‌ها به‌عنوان مواد محافظ برای محافظت از نفوذ نوترون‌ها و اشعه گاما استفاده کرد [۱]. تابش گاما در اثر برهم‌کنش با مواد محافظ توسط اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج ضعیف می‌شود [۲]. برای اهداف حفاظ‌گذاری، مهم‌ترین برهم‌کنش‌ها اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج الکترون-پوزیترون است. هر یک فرایندهای برهم‌کنش ممکن است منجر به فوتون‌های ثانویه شود که احتمال رسیدن به نقطه مورد نظر (محل آشکارساز) را دارند و بنابراین شار یا دز را افزایش می‌دهند. میزان افزایش از طریق ضریب انباشت توصیف می‌شود [۳]. ضریب انباشت به‌طور گسترده در سراسر جهان در طراحی حفاظ پرتو گاما استفاده شده است [۴]. ضریب انباشت برای تعیین دقیق ضخامت حفاظ استفاده می‌شود [۵]. مواد با چگالی بالا را می‌توان به‌طور مؤثر برای محافظت از تابش گاما استفاده کرد. سرب به دلیل خواصی مانند چگالی بالا، هزینه کم و راحتی در ساخت، ماده رایجی است که برای محافظت از اشعه ایکس و گاما استفاده می‌شود. با این حال، سرب ماده سمی است که باید در هنگام استفاده مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، علاقه به مواد محافظ بدون سرب در برابر اشعه گاما افزایش یافته است [۶]. در این تحقیق از فلزات آلومینیوم، مس و سرب به‌عنوان مواد محافظ در برابر پرتوهای گاما استفاده شده است تا خواص فلزات آلومینیوم و مس به‌عنوان مواد محافظ در مقایسه با فلز سرب بررسی شود.

<sup>1</sup> Bremsstrahlung Radiation

شار ناشی از پرتوهای گاما که بدون اندرکنش از ماده عبور می‌کند و به آشکارساز می‌رسند.

## ۲.۲. ضریب انباشت جذب انرژی

در مورد ضریب انباشت جذب انرژی، اگر جذب انرژی در بافت رخ بدهد به آن ضریب انباشت دز می‌گویند؛ بنابراین ضریب انباشت جذب انرژی در ماده، عبارت است از جذب انرژی ناشی از شار کل در ماده به جذب انرژی ناشی از شار ناپراکنده در ماده و ضریب انباشت دز، عبارت است از جذب انرژی ناشی از شار کل در بافت به جذب انرژی ناشی از شار ناپراکنده در بافت. ضریب انباشت جذب انرژی در ماده از رابطه (۶) و ضریب انباشت دز از رابطه (۷) به دست می‌آیند.

$$B_E = 1 + \frac{\sum_i \varphi(S)_i \mu(E_i)_a^{med} E_i}{\sum_j \varphi(u)_j \mu(E_j)_a^{med} E_j} \quad (6)$$

$$B_D = 1 + \frac{\sum_i \varphi(S)_i \mu(E_i)_a^{tis} E_i}{\sum_j \varphi(u)_j \mu(E_j)_a^{tis} E_j} \quad (7)$$

که در آن  $\varphi(S)_i$ ، شار ناشی از پرتوهای گاما که پس از برخورد با ماده دچار اندرکنش می‌شوند و به آشکارساز می‌رسند.  $\varphi(u)_j$ ، شار ناشی از پرتوهای گاما که بدون اندرکنش از ماده عبور می‌کنند و به آشکارساز می‌رسند.

$\mu(E_i)_a^{med}$ ، ضریب جذب مربوط به ماده در انرژی  $E_i$ .

$\mu(E_i)_a^{tis}$ ، ضریب جذب مربوط به بافت در انرژی  $E_i$ .

در رابطه‌های (۶) و (۷) اندیس‌های  $i$  و  $j$ ، مربوط به شماره کانال‌های  $i$  و  $j$  هستند.

که در آن  $I$  شدت پرتوهای فرودی که پس از برخورد با نمونه به آشکارساز می‌رسند،  $I$ ، شدت پرتوهای فرودی (بدون نمونه) که به آشکارساز می‌رسند،  $B$  ضریب انباشت،  $\mu$ ، ضریب تضعیف خطی که واحد آن  $\frac{1}{cm}$  است و  $X$  ضخامت ماده جاذب برحسب  $cm$  است. اگر ماده جاذب یک ترکیب یا مخلوط همگن باشد، ضریب تضعیف جرمی ماده جاذب از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (3)$$

که در آن  $W_i$  و  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  به ترتیب کسر وزنی و ضریب تضعیف جرمی عنصر تشکیل دهنده  $i$ ام در ترکیب شیمیایی ماده جاذب است.  $W_i$  از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_i n_i A_i} \quad (4)$$

که در آن  $A_i$  و  $n_i$  به ترتیب وزن اتمی و تعداد واحدهای عنصر  $i$ ام ترکیب شیمیایی ماده جاذب است [۱۸-۸]. ضریب انباشت سهم پرتوهای پراکنده را در نظر می‌گیرد. ضریب انباشت همیشه برابر یا بزرگ‌تر از یک است در حالت ایده‌آل ضریب انباشت دارای کم‌ترین مقدار و برابر با ۱ است و هر عاملی که بتواند اثر پراکندگی‌ها در هندسه را کاهش دهد سبب می‌شود ضریب انباشت به سمت ۱ میل کند [۱۹، ۲۰]. ضریب انباشت، عبارت است از کمیت موردنظر ناشی از شار کل به کمیت موردنظر ناشی از شار ناپراکنده. ضریب انباشت به دو دسته تقسیم می‌شود، که عبارت است از ضریب انباشت شار و ضریب انباشت جذب انرژی [۲۷-۲۱].

## ۱.۲. ضریب انباشت شار

ضریب انباشت شار از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۲].

$$B_N = \frac{\varphi_s + \varphi_u}{\varphi_u} = 1 + \frac{\varphi_s}{\varphi_u} \quad (5)$$

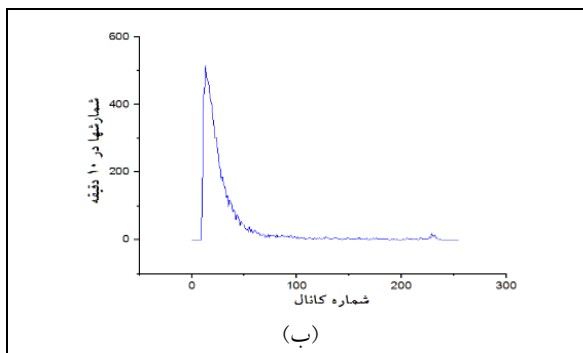
که در آن  $\varphi_s$ ، شار ناشی از پرتوهای گاما که پس از برخورد با ماده دچار اندرکنش می‌شوند و به آشکارساز می‌رسند.  $\varphi_u$ ،



شکل (۲). چیدمان آزمایش.

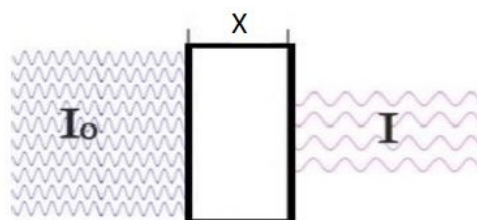
در شکل‌های ۳ تا ۶ آشکارساز مورد استفاده در آزمایش تجربی از نوع CsI(Tl) است. در شکل (۳-الف) چیدمان آزمایش بدون حضور چشمه و نمونه است و این چیدمان آزمایش مربوط به اندازه‌گیری تابش زمینه است.

در شکل (۳-ب) طیف حاصل از این آزمایش نشان داده شده است که محور افقی مربوط به شماره کانال MCA و محور عمودی مربوط به شمارش‌ها در بازه زمانی ۱۰ دقیقه است.



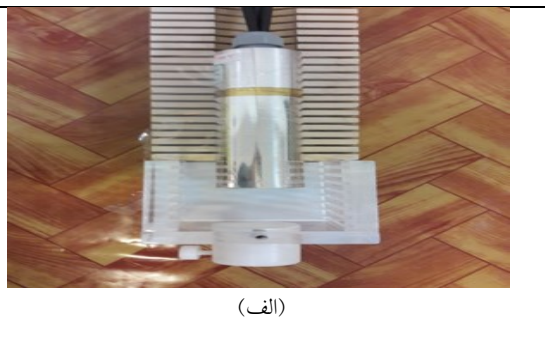
شکل (۳). شکل (الف) مربوط به تابش زمینه است. شکل (ب) مربوط به طیف تابش زمینه است.

حاصل از آن‌ها است که در این طیف محور افقی مربوط به شماره کانال MCA و محور عمودی مربوط به شمارش‌ها در بازه زمانی ۱۰ دقیقه است.



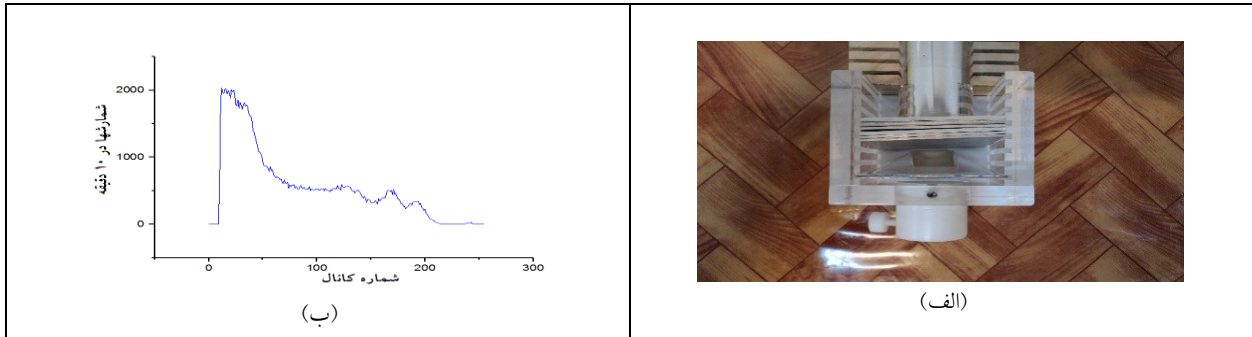
شکل (۱). نفوذ تابش از طریق جاذب [۲۸].

ضریب انباشت به متغیرهای زیادی بستگی دارد که عبارتند از: انرژی فوتون، توزیع زاویه‌ای تابش فرودی، شکل هندسی چشمه، ضخامت ماده جاذب و شکل هندسی آن، جنس ماده جاذب، موقعیت مکانی چشمه-ماده جاذب-آشکارساز. همچنین به‌طور غیرمستقیم فشار و دما هم می‌توانند تأثیرگذار باشند؛ بنابراین در تمام آزمایشات تجربی سعی بر آن بوده است که کلیه عوامل تأثیرگذار بر ضریب انباشت ثابت نگه داشته شود [۲۹-۳۴]. چیدمان آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. تمام آزمایشات در بازه زمانی ۱۰ دقیقه انجام شده است.

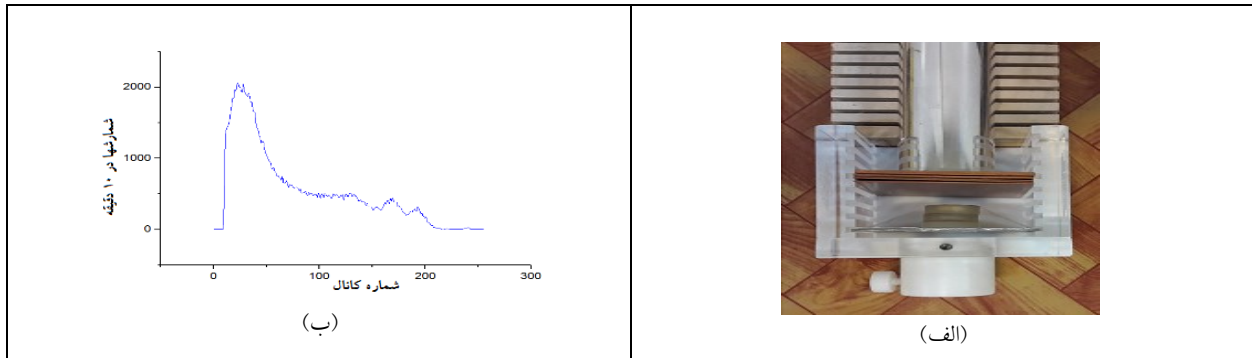


(الف)

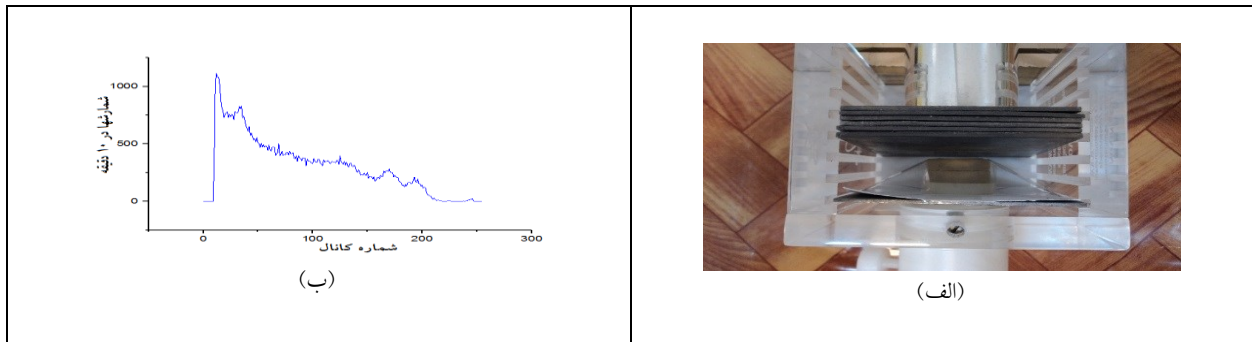
در شکل‌های (۴-الف) تا (۶-الف) چیدمان آزمایش مربوط به چشمه کبالت و به‌ترتیب حفاظ آلومینیوم در ضخامت cm ۱/۴۸۸، حفاظ مس در ضخامت cm ۰/۷۰۰ و حفاظ سرب در ضخامت cm ۱/۳۶۴ است و شکل‌های (۴-ب) تا (۶-ب) طیف



شکل (۴). (الف) مربوط به چشمه کبالت و حفاظ آلومینیوم در ضخامت  $1/488\text{ cm}$  است. شکل (ب) مربوط به طیف چشمه کبالت و حفاظ آلومینیوم در ضخامت  $1/488\text{ cm}$  است.



شکل (۵). (الف) مربوط به چشمه کبالت و حفاظ مس در ضخامت  $0/700\text{ cm}$  است. شکل (ب) مربوط به طیف چشمه کبالت و حفاظ مس در ضخامت  $0/700\text{ cm}$  است.



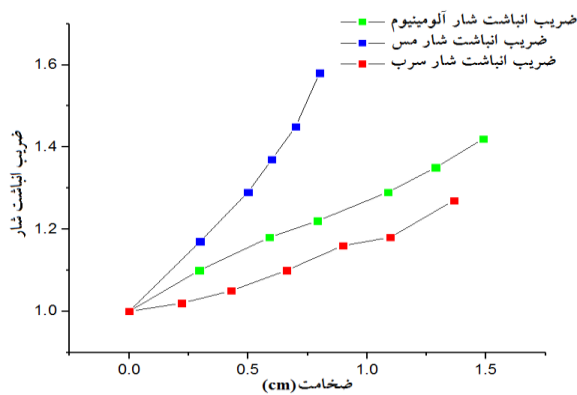
شکل (۶). (الف) مربوط به چشمه کبالت و حفاظ سرب در ضخامت  $1/364\text{ cm}$  است. شکل (ب) مربوط به طیف چشمه کبالت و حفاظ سرب در ضخامت  $1/364\text{ cm}$  است.

### ۳. اندازه‌گیری و نتایج

چشمه و آشکارساز قرار ندارد و حالتی که ماده بین چشمه و آشکارساز قرار دارد می‌توان پرتوهای که بدون اندرکنش از ماده عبور کرده‌اند و به آشکارساز رسیده‌اند و پرتوهای که در ماده دچار اندرکنش شده‌اند و به آشکارساز رسیده‌اند را به‌دست آورد

در این تحقیق از چشمه‌های نقطه‌ای سزیم و کبالت به‌عنوان منابع تولید پرتو گاما استفاده شده است. در محاسبه ضریب انباشت شار از مقایسه دو طیف آشکارساز مربوط به حالتی که ماده بین

که با افزایش انرژی، پرتوهای بیشتری پس از برخورد پرتو تک انرژی  $1/173 \text{ MeV}$  به حفاظ پراکنده می‌شود و به آشکارساز می‌رسند. با توجه به شکل (۸) در انرژی  $1/173 \text{ MeV}$  حفاظ سرب از حفاظ آلومینیوم بهتر است و حفاظ مس بهتر است.

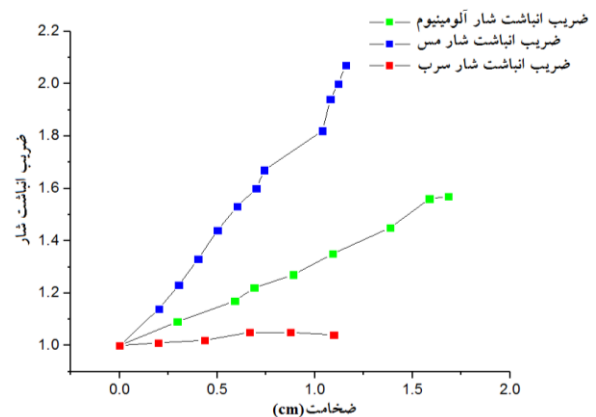


شکل (۸). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب در انرژی  $1/173 \text{ MeV}$  و در ضخامت‌های مختلف است.

شکل (۹) مربوط به اندازه‌گیری ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برای پرتو گاما در انرژی  $1/332 \text{ MeV}$  و در ضخامت‌های مختلف است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنیم در انرژی  $1/332 \text{ MeV}$  ضریب انباشت شار سرب و آلومینیوم تقریباً مثل هم هستند و این بدان معنی است که حفاظ آلومینیوم و سرب در انرژی  $1/332 \text{ MeV}$  کارایی یکسان به‌عنوان حفاظ دارند. با توجه به شکل (۹) در انرژی  $1/332 \text{ MeV}$  حفاظ سرب و آلومینیوم از حفاظ مس بهتر است.

مقادیر ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برای پرتو گاما در انرژی  $0/662 \text{ MeV}$ ،  $1/173 \text{ MeV}$  و

و سپس از این دو کمیت ضریب انباشت شار را طبق رابطه (۵) به‌دست آورد. شکل (۷) مربوط به اندازه‌گیری ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برای پرتو گاما در انرژی  $0/662 \text{ MeV}$  و در ضخامت‌های مختلف است همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنیم برای فلز سرب در ضخامت‌های مختلف ضریب انباشت شار تقریباً برابر یک است یعنی برای پرتو گاما در انرژی  $0/662 \text{ MeV}$ ، فلز سرب یک حفاظ خوب است. با توجه به شکل (۷) در انرژی  $0/662 \text{ MeV}$  حفاظ سرب از حفاظ آلومینیوم بهتر است و حفاظ مس بهتر است.



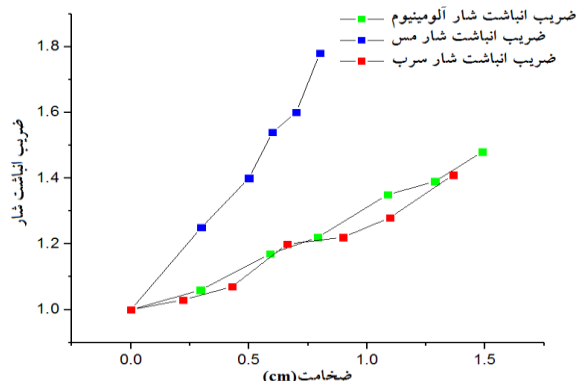
شکل (۷). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب در انرژی  $0/662 \text{ MeV}$  و در ضخامت‌های مختلف است.

شکل (۸) مربوط به اندازه‌گیری ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برای پرتو گاما در انرژی  $1/173 \text{ MeV}$  و در ضخامت‌های مختلف است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید، با افزایش انرژی ضریب انباشت شار فلز سرب در ضخامت‌های مختلف از یک بزرگتر است و علت آن این است

MeV ۱/۳۳۲ به ترتیب در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ بیان گردیده است.

جدول (۲). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برحسب ضخامت برای پرتوهای گاما با انرژی MeV ۱/۱۷۳، خطا نسبی کمتر از ۰/۰۲ است.

ضخامت انباشت شار سرب (cm)	ضریب انباشت شار آلومینیوم	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت شار مس	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت شار مس	ضخامت آلومینیوم (cm)	ضریب انباشت شار آلومینیوم
۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰
۱/۰۲	۱/۰۲	۰/۲۹۸	۱/۱۷	۰/۲۲۱	۱/۰۲	۰/۲۹۵	۱/۰۲
۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۴۹۹	۱/۲۹	۰/۴۲۹	۱/۰۵	۰/۵۹۰	۱/۰۵
۱/۱۰	۱/۱۰	۰/۶۰۰	۱/۳۷	۰/۶۶۲	۱/۱۰	۰/۷۹۱	۱/۱۰
۱/۱۶	۱/۱۶	۰/۷۰۰	۱/۴۵	۰/۸۹۸	۱/۱۶	۱/۰۸۷	۱/۱۶
۱/۱۸	۱/۱۸	۰/۸۰۰	۱/۵۸	۱/۰۹۷	۱/۱۸	۱/۲۸۸	۱/۱۸
۱/۲۷	۱/۲۷			۱/۳۶۴	۱/۲۷	۱/۴۸۸	۱/۲۷



شکل (۹). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب در انرژی MeV ۱/۳۳۲ و در ضخامت‌های مختلف است.

جدول (۳). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برحسب ضخامت برای پرتوهای گاما با انرژی MeV ۱/۳۳۲، خطا نسبی کمتر از ۰/۰۲ است.

ضخامت انباشت شار سرب (cm)	ضریب انباشت شار آلومینیوم	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت شار مس	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت شار مس	ضخامت آلومینیوم (cm)	ضریب انباشت شار آلومینیوم
۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰
۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۲۹۸	۱/۲۵	۰/۲۲۱	۱/۰۳	۰/۲۹۵	۱/۰۳
۱/۰۷	۱/۰۷	۰/۴۹۹	۱/۴۰	۰/۴۲۹	۱/۰۷	۰/۵۹۰	۱/۰۷
۱/۲۰	۱/۲۰	۰/۶۰۰	۱/۵۴	۰/۶۶۲	۱/۲۰	۰/۷۹۱	۱/۲۰
۱/۲۲	۱/۲۲	۰/۷۰۰	۱/۶۰	۰/۸۹۸	۱/۲۲	۱/۰۸۷	۱/۲۲
۱/۲۸	۱/۲۸	۰/۸۰۰	۱/۷۸	۱/۰۹۷	۱/۲۸	۱/۲۸۸	۱/۲۸
۱/۴۱	۱/۴۱			۱/۳۶۴	۱/۴۱	۱/۴۸۸	۱/۴۱

جدول (۱). ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم، مس و سرب برحسب ضخامت برای پرتوهای گاما با انرژی MeV ۰/۶۶۲، خطا نسبی مربوط به ضریب انباشت شار فلزات آلومینیوم و مس کمتر از ۰/۰۱ و خطای نسبی مربوط به ضریب انباشت شار فلز سرب کمتر از ۰/۰۲ است.

ضخامت سرب (cm)	ضریب انباشت شار سرب	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت شار مس	ضخامت آلومینیوم (cm)	ضریب انباشت شار آلومینیوم
۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰
۰/۱۹۸	۱/۰۱	۰/۲۰۱	۱/۱۴	۱/۰۹	۰/۲۹۵
۰/۴۳۵	۱/۰۲	۰/۳۰۲	۱/۲۳	۱/۱۷	۰/۵۹۰
۰/۶۶۷	۱/۰۵	۰/۴۰۲	۱/۳۳	۱/۲۲	۰/۶۸۹
۰/۸۷۵	۱/۰۵	۰/۵۰۱	۱/۴۴	۱/۲۷	۰/۸۹۰
۱/۰۹۷	۱/۰۴	۰/۶۰۱	۱/۵۳	۱/۳۵	۱/۰۹۱
		۰/۷۰۰	۱/۶۰	۱/۴۵	۱/۳۸۶
		۰/۷۴۱	۱/۶۷	۱/۵۶	۱/۵۸۷
		۱/۰۳۹	۱/۸۲	۱/۵۷	۱/۶۸۵
		۱/۰۷۹	۱/۹۴		
		۱/۱۱۹	۲/۰۰		
		۱/۱۵۸	۲/۰۷		

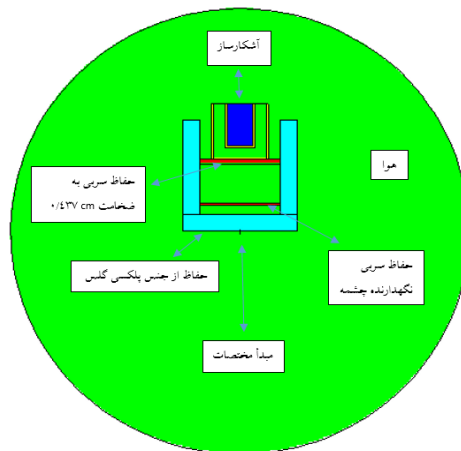
#### ۴. مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی

شکل ۱۰ مربوط به چیدمان آزمایش که توسط کد MCNPX، طراحی شده است در این شکل چشمه کبالت و حفاظ از نوع سرب به ضخامت ۰/۴۳۷ cm است.

۱۳ مشاهده می‌شود، داده‌های شبیه‌سازی و تجربی مطابقت خوبی با هم دارند. دو مورد اساسی در تفاوت بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد:

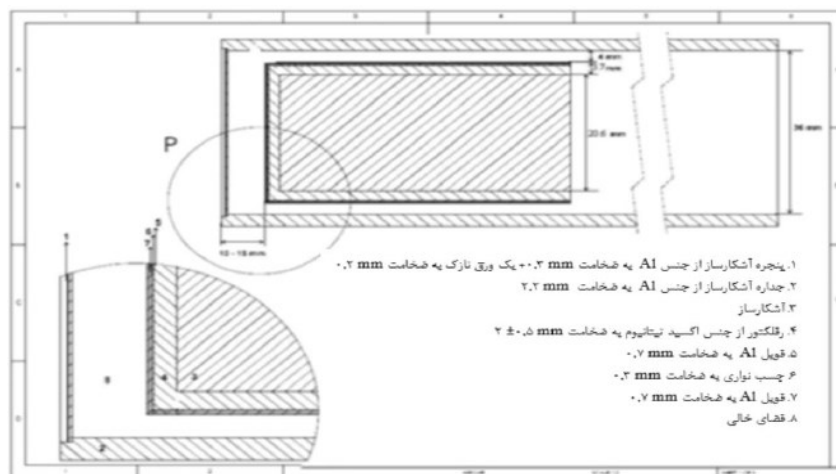
۱. در انجام آزمایش تجربی بعد از آشکارساز به ترتیب تکثیر کننده فوتون<sup>۱</sup>، پیش تقویت کننده<sup>۲</sup>، تقویت کننده<sup>۳</sup>، ولتاژ بالا<sup>۴</sup>، تحلیگر چندکاناله<sup>۵</sup> قرار دارد که هر کدام به نوبه خود نویز (تپ‌های ناخواسته) ایجاد می‌کنند که حتی انتخاب سطح تبعیض گر<sup>۶</sup> در تغییر نویز مؤثر است.

۲. تابش زمینه یعنی هر تابشی به غیر از تابش چشمه. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی دو مورد فوق تعریف نمی‌شود و انرژی دو مورد فوق در ناحیه انرژی‌های پایین قرار دارد؛ بنابراین این دو اثر باعث تفاوت در مشاهده طیف تجربی و شبیه‌سازی در انرژی‌های پایین می‌شود.



شکل (۱۰). مربوط به چیدمان آزمایش توسط کد MCNPX است.

شکل ۱۱ مربوط به آشکارساز مورد استفاده در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی، توسط کد MCNPX است. آشکارساز مورد استفاده در این تحقیق از نوع CsI(Tl) است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودار داده‌های به دست آمده از روش تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۱۲ و



شکل (۱۱). مربوط به مشخصات آشکارساز که از آن در آزمایش تجربی و کد MCNPX استفاده شده است [۳۵].

<sup>4</sup> HV

<sup>5</sup> Multi-Channel Analyzer (MCA)

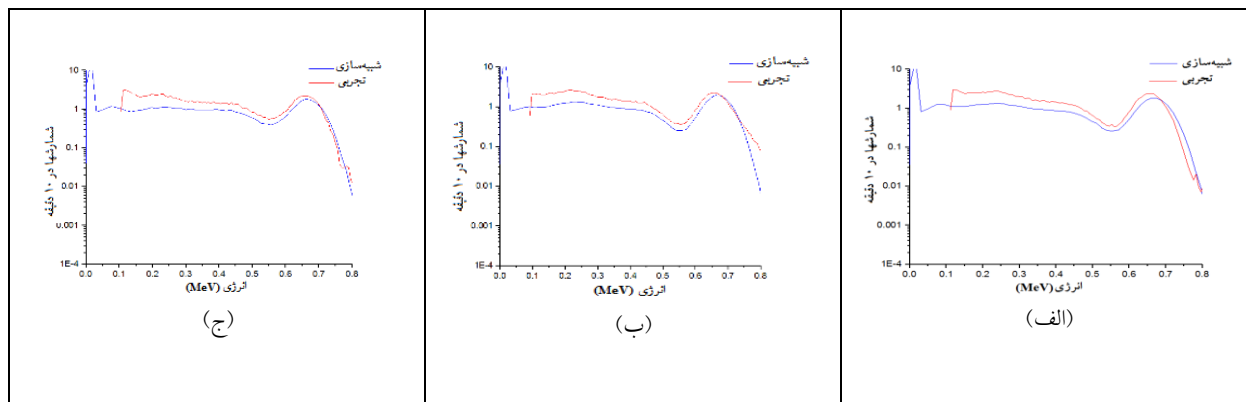
<sup>6</sup> Discriminator

<sup>1</sup> Phototube

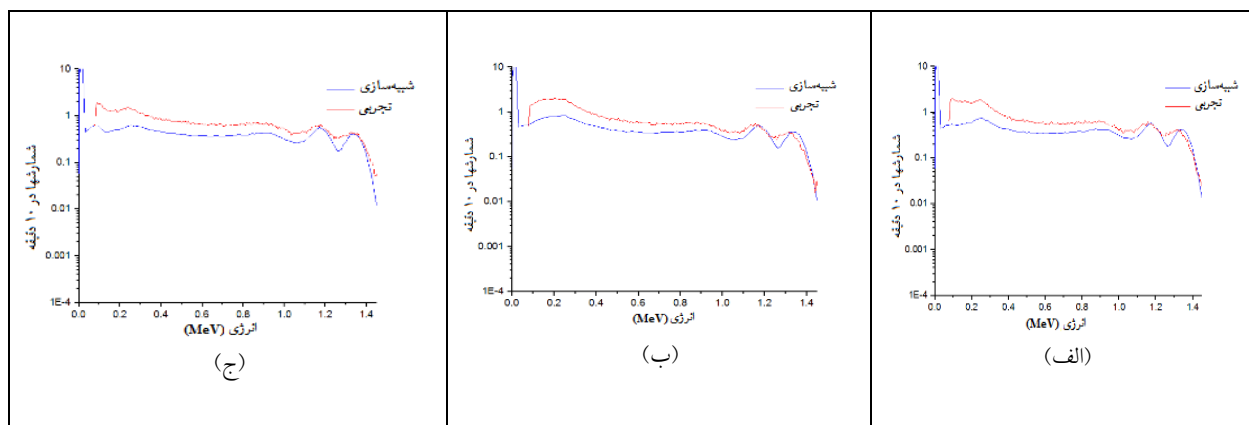
<sup>2</sup> Preamplifier

<sup>3</sup> Amplifier





شکل (۱۲). شکل (الف) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه سزیم و حفاظ آلومینیوم در ضخامت  $0.890$  cm است. شکل (ب) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه سزیم و حفاظ مس در ضخامت  $0.201$  cm است. شکل (ج) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه سزیم و حفاظ سرب در ضخامت  $0.105$  cm است.



شکل (۱۳). شکل (الف) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه کبالت و حفاظ آلومینیوم در ضخامت  $0.791$  cm است. شکل (ب) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه کبالت و حفاظ مس در ضخامت  $0.600$  cm است. شکل (ج) مربوط به مقایسه داده‌های تجربی و شبیه‌سازی چشمه کبالت و حفاظ سرب در ضخامت  $0.437$  cm است.

ترکیبات بافت نرم و ضریب انباشت دز در انرژی‌های  $0.662$  MeV،  $1.173$  MeV و  $1.332$  MeV است. شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶ به ترتیب مربوط به ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی‌های  $0.662$  MeV،  $1.173$  MeV و  $1.332$  MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌هایی از جنس آلومینیوم، مس و سرب است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌کنیم در انرژی  $0.662$  MeV برای محافظت از بافت نرم حفاظ سرب عملکرد

## ۵. تأثیر حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب در محافظت از بافت نرم

برای این منظور با فرض آن‌که در مکان آشکارساز بافت نرم قرار گرفته باشد، اقدام به به‌دست آوردن ضریب انباشت دز پرتوهای گامای عبوری از حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب در شرایط فوق نمودیم. جدول‌های ۴ تا ۷ به ترتیب

تقریباً با هم برابر است که این به علت استقلال ضریب تضعیف گرمی کامپتون از عدد اتمی ماده است.

با توجه به شکل ۲۱، ضریب تضعیف گرمی اثر فوتوالکتریک در کل گستره انرژی فوتون، سرب بیشتر از مس و مس بیشتر از آلومینیوم است؛ زیرا متناسب با  $Z^{n-1}$  که  $Z$  عدد اتمی عنصر و  $n$  عددی بین ۳ تا ۵ که بستگی به انرژی فوتون دارد.

با توجه به شکل ۲۲ که ضریب تضعیف گرمی تولید زوج برای سه عنصر نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد هرچه عدد اتمی بیشتر باشد، مقدار آن بیشتر شده است؛ زیرا این ضریب متناسب با عدد اتمی ماده است در نهایت با مقایسه ضریب تضعیف گرمی کل سه عنصر یاد شده در شکل ۲۳، ملاحظه می‌گردد که در گستره انرژی  $0.3 \text{ MeV}$  تا  $4 \text{ MeV}$  ضریب تضعیف گرمی کل دو عنصر آلومینیوم و مس برهم منطبق و گستره انرژی  $1 \text{ MeV}$  تا  $2 \text{ MeV}$  ضریب تضعیف گرمی هر سه عنصر برهم منطبق هستند بنابراین انتظار داریم برای چشمه سزیم که گاماها ی گسیلی از آن دارای انرژی  $0.662 \text{ MeV}$  است تفاوتی بین آلومینیوم، مس با سرب مشاهده کنیم و برای چشمه کبالت که به ترتیب پرتوهای گاما با انرژی  $1.173 \text{ MeV}$  و  $1.332 \text{ MeV}$  نقش سه عنصر آلومینیوم، مس و سرب به هم نزدیک باشد. از طرفی با توجه به رابطه (۸) می‌توان اهمیت سه برهم‌کنش فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج را نسبت به عدد اتمی ماده جاذب و انرژی پرتوهای گاما مورد بررسی قرار داد، که داریم [۲۷]:

$$\tau(\text{m}^{-1}) = \alpha N \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (8)$$

بهتری نسبت به حفاظ آلومینیوم دارد و حفاظ آلومینیوم عملکرد بهتری نسبت به حفاظ مس دارد. با افزایش انرژی به  $1.332 \text{ MeV}$  حفاظ آلومینیوم نسبت به حفاظهای مس و سرب عملکرد بهتری دارد. علت این پدیده را می‌توان به افزایش سطح مقطع پراکندگی کامپتون نسبت به سطح مقطع فوتوالکتریک و تولید زوج با افزایش انرژی پرتو گاما دانست که معمولاً در اکثر عناصر در گستره انرژی از  $0.1 \text{ MeV}$  تا  $4 \text{ MeV}$  است. برای مشخص شدن دقیق‌تر این موضوع در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ که ضریب تضعیف گرمی پراکندگی کامپتون، ضریب تضعیف گرمی فوتوالکتریک، ضریب تضعیف گرمی تولید زوج و ضریب تضعیف گرمی کل به ترتیب برای فلزات آلومینیوم، مس و سرب رسم شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌گردد برای آلومینیوم در گستره انرژی  $0.08 \text{ MeV}$  تا  $10 \text{ MeV}$  اندرکنش غالب پراکندگی کامپتون است و با توجه به شکل ۱۸ برای مس در گستره انرژی  $0.2 \text{ MeV}$  تا  $6 \text{ MeV}$  اندرکنش غالب پراکندگی کامپتون است و با توجه به شکل ۱۹ برای سرب در گستره انرژی  $0.08 \text{ MeV}$  تا  $4 \text{ MeV}$  اندرکنش غالب پراکندگی کامپتون است. برای مقایسه بهتر ضریب تضعیف گرمی پراکندگی کامپتون، ضریب تضعیف گرمی اثر فوتوالکتریک، ضریب تضعیف گرمی تولید زوج و ضریب تضعیف گرمی کل برای هر سه عنصر آلومینیوم، مس و سرب به‌طور هم‌زمان به ترتیب در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳ رسم شده‌اند.

با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد، ضریب تضعیف گرمی پراکندگی کامپتون آلومینیوم، مس و سرب در تمام گستره انرژی

$$\frac{\mu(m^{-1})}{\rho} = N_A \left( \frac{Z}{A} \right) \left[ \alpha \frac{Z^{n-1}}{E_\gamma^m} + f_1(E_\gamma) + Zf_2(E_\gamma, Z) \right]$$

$$\mu \left( \frac{m^1}{Kg} \right) \cong N_A \left( \frac{Z}{A} \right) \left[ \alpha \frac{Z^{n-1}}{E_\gamma^m} + f_1(E_\gamma) + Zf_2(E_\gamma, Z) \right] \quad (13)$$

برای اکثر مواد، جز هیدروژن،  $A \cong 2Z$  است. با توجه به رابطه (۱۳)، احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک با افزایش عدد اتمی ماده جاذب افزایش می‌یابد و با افزایش انرژی کاهش چشم‌گیر می‌یابد. احتمال رخداد پراکندگی کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده جاذب است. احتمال رخداد تولید زوج متناسب با عدد اتمی ماده جاذب است. با توجه به کلیه توضیحات بیان شده در گستره انرژی پرتوهای گاما از ۱ MeV تا ۲ MeV می‌توان از حفاظ ترکیبی از آلومینیوم و سرب استفاده نمود که منجر به سبک شدن حفاظ می‌گردد. در واقع پرتوهای گاما در این گستره انرژی ابتدا با پراکندگی‌های کامپتون متوالی به ناحیه انرژی پایین منتقل می‌شوند و در نهایت توسط سرب جذب می‌گردند؛ بنابراین حفاظ ترکیبی منجر به کاهش وزن قابل توجه می‌گردد.

جدول (۴). ترکیب شیمیایی و چگالی در بافت نرم [۳۳].

بافت نرم	
$\rho \left( \frac{g}{cm^3} \right)$	۱/۰۰۰
H	۰/۱۰۱
C	۰/۱۱۱
N	۰/۰۲۶
O	۰/۷۶۲

که  $\tau$  احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک بر واحد راهی که فوتون پیموده،  $\alpha$  یک ضریب ثابت و مستقل از  $Z$  و  $E_\gamma$ ،  $m$  و  $n$  ثابت‌هایی با مقدار بین ۳ تا ۵ (مقدار آن‌ها بستگی به  $E_\gamma$  دارد).

$$\sigma(m^{-1}) = NZf_1(E_\gamma) \quad (9)$$

که  $\sigma$  احتمال رخداد برهم‌کنش کامپتونی بر واحد راهی که فوتون پیموده و  $f_1(E_\gamma)$  تابعی است از انرژی فوتون.

$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f_2(E_\gamma, Z) \quad (10)$$

که در آن  $\kappa$  احتمال رخداد تولید زوج بر واحد راهی که فوتون پیموده و  $f_2(E_\gamma, Z)$  تابعی است که اندکی با  $Z$  تغییر می‌کند و با  $E_\gamma$  افزایش می‌یابد. احتمال کل برهم‌کنش در واحد طول مسیر فوتون،  $\mu$ ، که اصطلاحاً ضریب تضعیف خطی کل نامیده می‌شود، برابر با حاصل جمع سه احتمال فوق است:

$$\mu(m^{-1}) = \tau + \sigma + \kappa \quad (11)$$

$$N = \rho \left( \frac{N_A}{A} \right) \quad (12)$$

که  $N$  تعداد  $\frac{اتمها}{m^3}$  برای ماده‌ای که ذره در آن حرکت می‌کند،  $A$  عدد جرمی اتم،  $N_A$  عدد آووگادرو است. در ادامه می‌خواهیم ضریب تضعیف جرمی کل و اثر هر یک از پدیده‌های فوق را بر روی آن بررسی کنیم بنابراین با توجه به روابط فوق داریم:

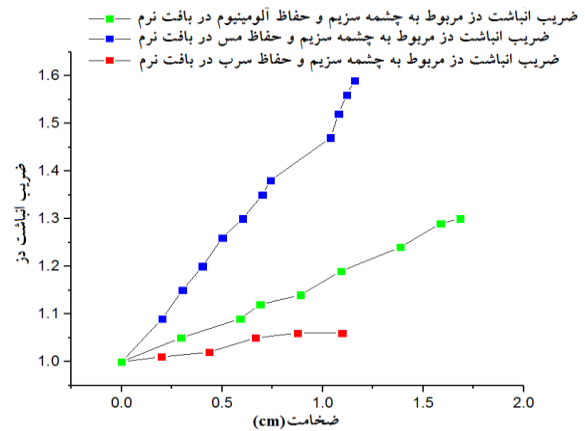
$$\begin{aligned} \mu(m^{-1}) &= \tau + \sigma + \kappa \\ &= \alpha N \frac{Z^n}{E_\gamma^m} + NZf_1(E_\gamma) + NZ^2 f_2(E_\gamma, Z) \\ &= \rho \left( \frac{N_A}{A} \right) Z \left[ \alpha \frac{Z^{n-1}}{E_\gamma^m} + f_1(E_\gamma) + Zf_2(E_\gamma, Z) \right] \end{aligned}$$

جدول (۵). ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۰/۶۶۲ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس سرب، مس و آلومینیوم. خطای نسبی کمتر از ۰/۰۴ است.

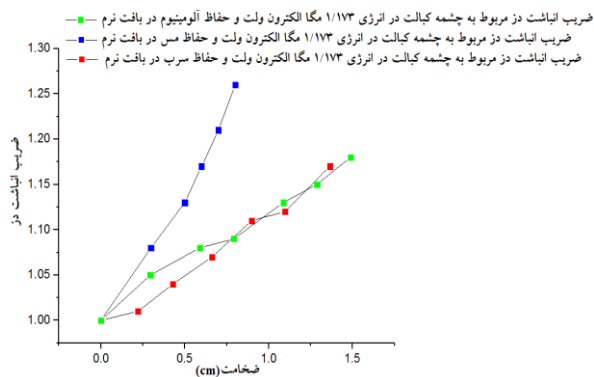
ضریب انباشت دز بافت نرم	ضخامت سرب (cm)	ضریب انباشت دز نرم	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت دز نرم	ضخامت آلومینیوم (cm)
۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰
۱/۰۱	۰/۱۹۸	۱/۰۹	۰/۲۰۱	۱/۰۵	۰/۲۹۵
۱/۰۲	۰/۴۳۵	۱/۱۵	۰/۳۰۲	۱/۰۹	۰/۵۹۰
۱/۰۵	۰/۶۶۷	۱/۲۰	۰/۴۰۲	۱/۱۲	۰/۶۸۹
۱/۰۶	۰/۸۷۵	۱/۲۶	۰/۵۰۱	۱/۱۴	۰/۸۹۰
۱/۰۶	۱/۰۹۷	۱/۳۰	۰/۶۰۱	۱/۱۹	۱/۰۹۱
		۱/۳۵	۰/۷۰۰	۱/۲۴	۱/۳۸۶
		۱/۳۸	۰/۷۴۱	۱/۲۹	۱/۵۸۷
		۱/۴۷	۱/۰۳۹	۱/۳۰	۱/۶۸۵
		۱/۵۲	۱/۰۷۹		
		۱/۵۶	۱/۱۱۹		
		۱/۵۹	۱/۱۵۸		

جدول (۶). ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۱/۱۷۳ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب. خطای نسبی کمتر از ۰/۰۵ است.

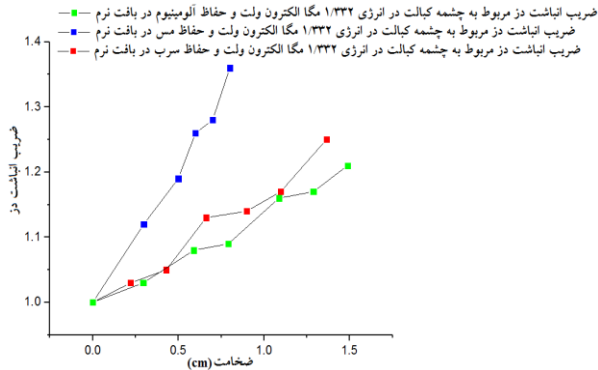
ضریب انباشت دز بافت نرم	ضخامت سرب (cm)	ضریب انباشت دز نرم	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت دز نرم	ضخامت آلومینیوم (cm)
۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰
۱/۰۱	۰/۲۲۱	۱/۰۸	۰/۲۹۸	۱/۰۵	۰/۲۹۵
۱/۰۴	۰/۴۲۹	۱/۱۳	۰/۴۹۹	۱/۰۸	۰/۵۹۰
۱/۰۷	۰/۶۶۲	۱/۱۷	۰/۶۰۰	۱/۰۹	۰/۷۹۱
۱/۱۱	۰/۸۹۸	۱/۲۱	۰/۷۰۰	۱/۱۳	۱/۰۸۷
۱/۱۲	۱/۰۹۷	۱/۲۶	۰/۸۰۰	۱/۱۵	۱/۲۸۸
۱/۱۷	۱/۳۶۴			۱/۱۸	۱/۴۸۸



شکل (۱۴). نمودار ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۰/۶۶۲ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب.



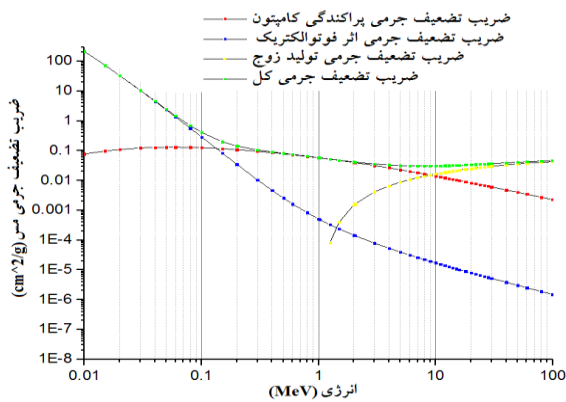
شکل (۱۵). نمودار ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۱/۱۷۳ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب.



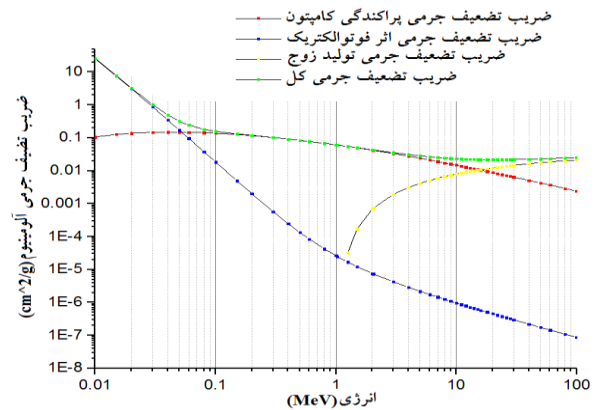
شکل (۱۶). نمودار ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۱/۳۳۲ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب.

جدول (۷). ضریب انباشت دز پرتوهای گاما در انرژی ۱/۳۳۲ MeV در بافت نرم با حضور حفاظ‌های از جنس آلومینیوم، مس و سرب. خطای نسبی کمتر از ۰/۰۵ است.

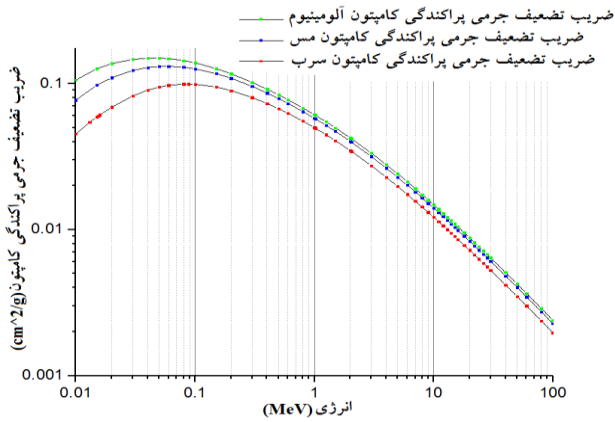
ضریب انباشت دز بافت نرم	ضخامت سرب (cm)	ضریب انباشت دز بافت نرم	ضخامت مس (cm)	ضریب انباشت دز بافت نرم	ضخامت آلومینیوم (cm)
۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰۰
۱/۰۳	۰/۲۲۱	۱/۱۲	۰/۲۹۸	۱/۰۳	۰/۲۹۵
۱/۰۵	۰/۴۲۹	۱/۱۹	۰/۴۹۹	۱/۰۸	۰/۵۹۰
۱/۱۳	۰/۶۶۲	۱/۲۶	۰/۶۰۰	۱/۰۹	۰/۷۹۱
۱/۱۴	۰/۸۹۸	۱/۲۸	۰/۷۰۰	۱/۱۶	۱/۰۸۷
۱/۱۷	۱/۰۹۷	۱/۳۶	۰/۸۰۰	۱/۱۷	۱/۲۸۸
۱/۲۵	۱/۳۶۴			۱/۲۱	۱/۴۸۸



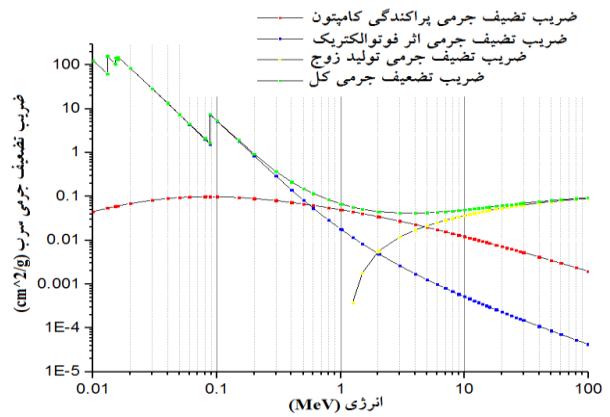
شکل (۱۷). ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون، ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک، ضریب تضعیف جرمی تولید زوج و ضریب تضعیف جرمی کل مربوط به مس. از انرژی ۰/۲ MeV تا انرژی ۶ MeV برهم کنش غالب پراکندگی کامپتون است [۳۷].



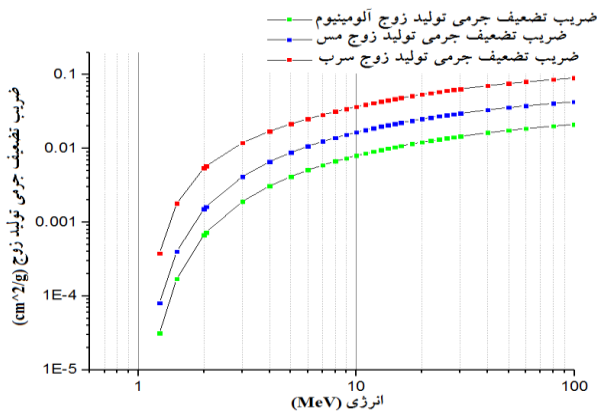
شکل (۱۸). ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون، ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک، ضریب تضعیف جرمی تولید زوج و ضریب تضعیف جرمی کل مربوط به آلومینیوم. از انرژی ۰/۰۸ MeV تا انرژی ۱۰ MeV برهم کنش غالب پراکندگی کامپتون است [۳۷].



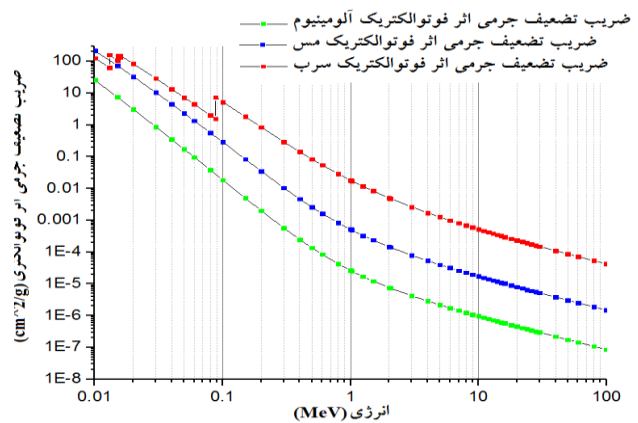
شکل (۲۰). ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون مربوط به آلومینیوم، مس و سرب [۳۷].



شکل (۱۹). ضریب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون، ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک، ضریب تضعیف جرمی تولید زوج و ضریب تضعیف جرمی کل مربوط به سرب. از انرژی ۰.۸ MeV تا انرژی ۴ MeV برهم کنش غالب پراکندگی کامپتون است [۳۷].

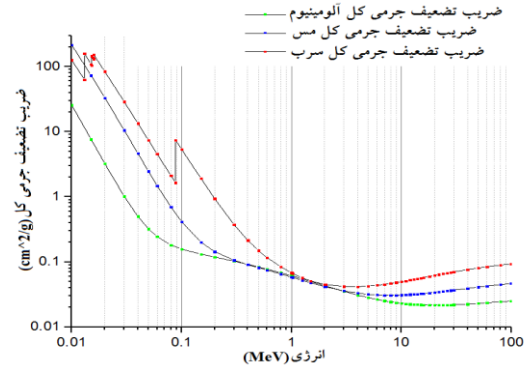


شکل (۲۲). ضریب تضعیف جرمی تولید زوج مربوط به آلومینیوم، مس و سرب [۳۷].



شکل (۲۱). ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک مربوط به آلومینیوم، مس و سرب [۳۷].

آن نسبت به مس و سرب کمتر است. در هنگام ساخت لباس‌های برای محافظت در برابر اشعه مضر هرچه وزن لباس کمتر باشد، بهتر است؛ زیرا پرسنلی که از چنین لباس‌های استفاده می‌کنند، کمتر خسته می‌شوند. در گستره انرژی پرتوهای گاما از ۱ MeV تا ۲ MeV اثر تضعیف آلومینیوم و سرب با یکدیگر تقریباً برابر است و از طرفی چون آلومینیوم نسبت به سرب سبکتر است می‌توان از حفاظ ترکیبی آلومینیوم و سرب استفاده نمود که منجر به سبک شدن حفاظ می‌گردد. در واقع پرتوهای گاما در این گستره انرژی ابتدا با پراکندگی‌های کامپتون متوالی به ناحیه انرژی پایین منتقل می‌شوند و اگر همچنان از ماده خارج نشده باشند، در اتم‌های سرب جذب می‌گردند. بنابراین حفاظ ترکیبی منجر به کاهش وزن قابل توجه می‌گردد.



شکل (۲۳). ضریب تضعیف جرمی کل مربوط به آلومینیوم، مس و سرب [۳۷].

## ۶. نتیجه‌گیری

هر چه انرژی اشعه گاما بیشتر باشد، آسیب بیشتری به بافت انسان می‌زند. سرب یک ماده سمی است و از طرفی چگالی آن زیاد است ولی آلومینیوم یک ماده غیر سمی است و چگالی

## ۷. مراجع

1. M. I. Sayyed. Half value layer, mean free path and exposure buildup factor for tellurite glasses with different oxide compositions. *J. Alloy. Compd.* 695 (2017) 3191-3197.
2. P. Aim-O, D. Wongsawaeng, S. Tancharakorn and Sophon. Buildup factor and mechanical properties of high-density cement mixed with crumb rubber and prompt gamma ray study. *Mater. Sci. Eng.* 244 (2017) 012023.
3. K. Trontl, T. Šmuc, D. Pevec. Support vector regression model for the estimation of  $\gamma$ -ray buildup factors for multi-layer shields. *Ann. Nucl. Energy* 34 (2007) 939-952.
4. K. Takeuchi, S. Tanaka. Absorbed-dose and dose-equivalent buildup factors of gamma rays including bremsstrahlung and annihilation radiation for water, concrete, iron and lead. *Appl. Radiat. Isot.* 37 (1986) 283-296.
5. M. M. Rafiei, H. Tavakoli-Anbaran. Calculation of the exposure buildup factors for X-ray photons with continuous energy spectrum by monte carlo code. *J. Radiol Prot.* 38 (2018) 207.
6. S. Yonphan, P. Limkitjaroenporn, P. Borisut, S. Kothan, N. Wongdamnern, Abdullah M. S. Alhuthali, M. I. Sayyed, J. Kaewkhao. The photon interactions and build-up factor for gadolinium sodium borate glass: theoretical experimental approaches. *Radiat. Phys. Chem.* 188 (2021) 109561.
7. I. Jarrah, M. I. Radaideh, T. Kozłowski, R. Uddin. Determination and validation of photon energy absorption buildup factor in human tissues using monte carlo simulation. *Radiat. Phys. Chem.* 160 (2019) 15-25.
8. S. Singh, A. Kumar, C. Singh, K. Singh Thind, G. S. Mudahar. Effect of finite sample dimensions and total scatter acceptance angle on the gamma

- ray buildup factor. *Ann. Nucl. Energy* 35 (2008) 2414-2416.
9. N. Eklinci, E. Kavaz, Y. Özdemir. A study of The energy absorption and exposure buildup factors of some anti-inflammatory drugs. *Appl. Radiat. Isotopes*. 90 (2014) 265-273.
  10. E. Kavaz, N. Ahmadishadbad, Y. Özdemir Y.ÖZDEMİR. Photon buildup factors of some chemotherapy drugs. *Biomed. Pharmacotherapy* 69 (2015) 34-41.
  11. O. Kilicoglu, H. O. Tekin. Bioactive glasses with TiO<sub>2</sub> additive: Behavior characterization against nuclear radiation and determination of buildup factors. *Ceram. Int.* 46 (2019) 10779-10787.
  12. M. I. Sayyed, H. Elhouichet. Variation of energy absorption and exposure buildup factors with incident photon energy and penetration depth for boro-tellurite (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TeO<sub>2</sub>) glasses. *Radiat. Phys. Chem.* 130 (2017) 335-342.
  13. S. S. Obaid, M.I. Sayyed, D.K. Gaikwad, P. P. Pawar. Attenuation coefficients and exposure buildup factor of some rocks for gamma ray shielding applications. *Radiat. Phys. Chem.* 148 (2018) 86-94.
  14. K. A. Mahmoud, F. I. El-Agwany, Y. S. Rammah, O. L. Tashlykov. Gamma ray shielding capacity and build up factors of CdO doped lithium borate glasses: theoretical and simulation study. *J. non-crysta. solids* 541 (2020) 120110.
  15. M. M. Alda'ajeh, J. M.sharaf, H. H.Saleh, Mefleh S. Hamideen. Determination of buildup factors for some human tissues using both MCNP5 and Phy-X/PSD. *Nucl. Eng. Tech.* 55 (2023) 4426-4430.
  16. N. Sabry, H. Y. Zahran, E. S. Yousef, H. Algami, A. Umar, H. B. Albargi, I.S. Yahia. Gamma-ray attenuation, fast neutron removal cross-section and build up factor of Cu<sub>2</sub>MnGe[S,Se,Te]<sub>4</sub> semiconductor compounds: Novel approach. *Radiat. Phys. Chem.* 179 (2021) 109248.
  17. K. Singh Mann. Measurement of exposure buildup factors: The influence of scattered photons on gamma-ray attenuation coefficients. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 877 (2018) 1-8.
  18. V. Pathak. To study buildup factor in concrete. *Neuroquantology* 20 (2022) 4217-4226.
  19. P. S. Singh, T. Singh, P. Kaur. Variation of energy absorption buildup factors with incident photon energy and penetration depth for some commonly used solvents. *Ann. Nucl. Energy* 35 (2008) 1093-1097.
  20. H. Alavian, H. Tavakoli-Anbaran. Investigating the effect and type of detector on the estimation of gamma ray buildup factors using monte carlo simulation based on variance reduction. *J. Radiat. Safety Measurement* 4 (2018) 65-79.
  21. K. Singh Mann, J. Singla, V. Kumar, G. Singh Sidhu. Investigations of mass attenuation coefficients and exposure buildup factors of some low-z building materials. *Ann. Nucl. Energy* 43 (2012) 157-166.
  22. K. Singh Mann, T. Korkut. Gamma-ray buildup factors study for deep penetration in some silicates. *Ann. Nucl. Energy* 51 (2013) 81-93.
  23. N. Kucuk. Computation of gamma-ray exposure buildup factors up to 10 mfp using generalized feed-forward neural network. *Expert Sys. Appl.* 37 (2010) 3762-3767.
  24. E. Kavaz, N. Yildiz Yorgun. Gamma ray buildup factors of lithium borate glasses doped with minerals. *J. Alloys Compounds* 752 (2018) 61-67.
  25. G. S. Brar, G. S. Sidhu, Parjit, S. sandhu , Gurmel S. Mudahar. Variation of buildup factors of soils with weight fractions of iron and silicon. *Appl. Radiat. Isot.* 49 (1998) 977-980.
  26. A. Shirani, M. H. Alamatsaz. 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. *Iran. J. Sci.* 37 (1) (2013) 29-34.
  27. N. Tsoulfanidis. *Measurement and Detection of Radiation*. 3<sup>rd</sup> Edition, Taylor & Francis, 2010.
  28. H. Akyildirim, F. Waheed, K. Günoğlu , İ Akkurt. Investigation of buildup factor in gamma-ray measurement. *Acta Phys. Polonica A.* 132 (2017) 1203-1206.
  29. L. Musílek, T. Čechák , J. Šeda. Empirical formulae for build-up factor calculations in wide conical γ-Ray beams. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 31 (1980) 623-627.



30. L. Musílek, T. Čechák, J. Šeda. The use of the monte carlo method for the calculation of build-up factors in wide conical gamma-radiation beams. *Nucl. Instrum. Methods* 174 (1980) 565-569.
31. A. Rasouli, H. Tavakoli-Anbaran. Study of relation between the gamma flux buildup factors and source geometry by M-C simulation. *Nucl. Sci. Tech.* 28 (2017) 136-140.
32. M. M. Rafiei, H. Tavakoli-Anbaran. Study of exposure buildup factors with detailed physics for cobalt-60 gamma source in water, iron, and lead using the MCNPX code. *European Phys. J. Plus* 133 (2018) 548-553.
33. M. M. Rafiei, H. Tavakoli-Anbaran. Calculation of buildup factors of gamma source with continuous energy spectrum for water, iron and lead by monte carlo code. *J. Radiat. Safety Measurement* 6 (2018) 25-32.
34. A. Rasouli, H. Tavakoli-Anbaran. Investigation the location and alignment of the detector to minimize the gamma ray flux buildup factor. *J. Radiat. Safety Measurement* 4 (2016) 1-10.
35. M. R. Skandarinia. *Simulation the Response Function of CsI Detector Using Monte Carlo Method in the Energy Range from 1 KeV to 1.5 MeV and its use for the Unfolding Unknown Gamma-Ray Source Spectrum*. M. Sc. Thesis, Shahrood University of Technology, 2016.
36. M. Kurudirek, Y. Kurucu. Estimation of energy absorption buildup factors of some human tissues at energies relevant to brachytherapy and external beam radiotherapy. *Int. J. Radiat. Biol.* 95 (2019) 1685-1695.
37. XCOM. Available at: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>