

محاسبات دزیمتری سیستم فرضی PGNAA با استفاده از فانتوم ORNL-MIRD و کد محاسباتی مونت کارلو

مهدی امیری^{۱*}، سجاد بیات^۲، حمید شفایی دوک^۱ و ایوب هاجم‌بچاری^۱

^۱دانشگاه شهید بهشتی، تهران، تهران، ایران.

^۲دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۱۹۸۳۹-۶۹۴۱۱

پست الکترونیکی: Mah.Amiri@mail.sbu.ac.ir

چکیده

رشد فزاینده‌ی فعالیت‌های تروریستی و تهدیدات به روز و ترانزیت محموله‌های غیر مجاز منجر به پیشرفت بسیار زیاد سیستم‌های کشف و آشکارسازی شده است. در این مقاله جهت کشف و آشکارسازی مواد، از روش آنالیز گامای آبی در فعال‌سازی نوترونی (PGNAA) استفاده شده است. در کنار استفاده از سیستم فرضی شبیه‌سازی شده می‌بایست توجه ویژه‌ای نیز به مباحث ایمنی پرتو و ملاحظات مربوط به فیزیک بهداشت داشت. در صورتی که میزان دز دریافتی نسبتاً زیاد باشد، اثرات قطعی پدیدار می‌شود و اثرات احتمالی ممکن است در تمام سطوح پرتوگیری رخ دهد. بنابراین برای تعیین نواحی مجاز و حفاظت شده به منظور تردد پرسنل و عموم مردم از فانتوم ORNL-MIRD استفاده شد. فانتوم ORNL-MIRD مدل تحلیلی از بدن انسان را ارائه می‌کند. محاسبه دز در اندام‌ها نیازمند توصیف دقیق از هندسه اندام‌ها و ساختار شیمیایی بافت می‌باشد. در سیستم فرضی موجود از چشمه ^{252}Cf به عنوان مولد نوترون و آشکارساز NaI(Tl) جهت دریافت گامای منتشره استفاده شده است. در این سیستم، جهت شبیه‌سازی ترابرد نوترون - فوتون از کد MCNPX2.7 استفاده گردیده است. با در نظر گرفتن جزئیات سیستم مفروض، ناحیه حفاظت‌شده و ناحیه مجاز برای فعالیت پرتوکاران به ترتیب تا شعاع ۷۰ و ۱۳۰ سانتی‌متری از دستگاه به دست آمده است. همچنین سیستم طراحی شده می‌تواند ماده منفجره HMX را با وزن‌های ۱۵۸ و ۵۰۱ گرم را به ترتیب در مدت زمانی ۱ و ۱۰ دقیقه شناسایی نماید.

کلیدواژه‌گان: مواد منفجره، دزیمتری تابش، کد MCNP، روش PGNAA، فانتوم ORNL-MIRD.

۱. مقدمه

کشف و آشکارسازی، پیشرفت بسیار زیادی داشته باشند. جهت کشف و آشکارسازی تهدیدات مواد منفجره پنهان شده

رشد فزاینده‌ی فعالیت‌های تروریستی و تهدیدات به روز و ترانزیت محموله‌های غیرمجاز، منجر شده است که سیستم‌های

روش‌ها عبارتند از: فعال‌سازی نوترون حرارتی^۲ TNA [۶, ۵]، فعال‌سازی نوترون سریع^۳ FNA [۷]، فعال‌سازی نوترون سریع پالسی^۴ PFNA [۸, ۹]، فعال‌سازی نوترون سریع پالسی حرارتی شده^۵ PFTNA [۱۰]. یکی از روش‌های آنالیز عنصری پرترفدار که در پروژه‌های صنعتی استفاده می‌شود روش آنالیز گامای آنی در فعال‌سازی نوترونی می‌باشد [۱۱]. در روش PGNAA پرتوهای گامای آنی از طریق پراکندگی ناکشسان نوترون و واکنش‌های گیراندازی نوترون حرارتی تولید می‌شوند. کارایی سیستم PGNAA به انرژی نوترون و سطح مقطع‌های برخورد با ماده بستگی دارد [۱۲].

جهت جلوگیری از اثرات قطعی تابش و کاهش پرتوگیری احتمالی، رعایت مقررات حفاظت در برابر اشعه، امری الزامی است. در صورتی که میزان دز دریافتی نسبتاً زیاد باشد اثرات قطعی پدیدار می‌شود و اثرات احتمالی ممکن است در تمام سطوح پرتوگیری رخ دهد. تماس با مقدار بیش از حد پرتوهای یوننده می‌تواند اثراتی روی دستگاه خون‌ساز، دستگاه گوارش، سیستم اعصاب مرکزی و در نهایت کل بدن بگذارد. بنابراین دزیمتری تابش و ملاحظات فیزیک بهداشت و رعایت حد دز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۳].

در این مقاله سعی شده تا با در نظر گرفتن یک سیستم فرضی برای کشف و آشکارسازی مواد منفجره، بتوان نواحی مختلف دز، از جمله ناحیه حفاظت شده، ناحیه مجاز و ناحیه معمولی را با توجه به ساختار شبیه‌سازی شده با کمک کد MCNPX به دست آورد. به منظور به‌دست آوردن نواحی مختلف دز از فانتوم بدن انسان بر اساس اصول^۶ ORNL-MIRD استفاده شده است.

درون خودروها و کمربندهای انفجاری، سیستم‌های بازرسی دقیق و کارآمد نیاز است. همچنین به منظور افزایش امنیت در مراکز حساس و نواحی مربوط به حمل و نقل محموله‌ها و جلوگیری از فعالیت‌های تروریستی، قاچاق اسلحه، مواد منفجره و رادیواکتیو، مواد مخدر و سایر مواد ممنوعه، سیستم‌های تصویربرداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند.

روش‌های گوناگونی از جمله روش هسته‌ای برای آشکارسازی این مواد منفجره وجود دارد. روش هسته‌ای به دو روش کلی تحلیل گامای آنی ناشی از فعال‌سازی نوترون^۱ (PGNAA) و پس‌پراکندگی نوترون تقسیم‌بندی می‌شود. هر کدام از این دو روش، بر پایه اصل مکان‌یابی شکل گرفته‌اند. در روش تحلیل گامای آنی ناشی از فعال‌سازی نوترون، طیف اشعه‌ی گاما شامل اطلاعاتی در مورد عناصر شیمیایی مواد تحت آنالیز است و کاری به ساختار مولکولی ماده ندارد. نکته قابل ملاحظه و مهم در این ارزیابی، توجه به بحث دزیمتری و رعایت نواحی مختلف برای کار در این نواحی می‌باشد [۱]. زیرا عدم حفاظت در برابر پرتوها و عدم آگاهی از کمیت دز دریافتی پرسنل حین فعالیت با پرتوهای مختلف، می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری بر افراد موجود در محیط وارد کند و خطر آفرین باشد [۲].

روش‌های هسته‌ای جهت شناسایی مواد، به دو فرآیند اصلی بستگی دارند: ۱- تغییر انرژی هسته هدف، که در اثر برهمکنش بین یک پرتابه ورودی و هسته هدف ایجاد می‌گردد ۲- اندازه‌گیری انرژی و کمیت‌های پرتو پخش شده پس از برهمکنشی که روی می‌دهد [۳]. برای شناسایی مواد منفجره به طور گسترده از روش‌های نوترونی استفاده می‌شود [۴]. این

²Thermal Neutron Analysis

³Fast Neutron Analysis

⁴Pulsed Fast Neutron Analysis

⁵Pulsed Fast-Thermal Neutron Analysis

⁶Oak Ridge National Laboratory – Medical Internal Radiation Dose

¹Prompt Gama Neutron Activation Analysis

۲. مواد و روش کار

رفتار نوترون‌ها با ماده بستگی زیادی با انرژی جنبشی آن‌ها دارد. نوترون‌های سریع ترجیحاً به صورت پراکندگی و واکنش-های هسته‌ای برخورد می‌کنند. احتمال واکنش (سطح مقطع) برای نوترون‌های کند از یک عنصر به عنصر دیگر مطابق با انرژی نوترون متغیر است، و با تشدیدهای منحصر به فرد با خصوصیات قله‌ها در نمودارهای سطح مقطع مشخص می‌شود. نوترون حرارتی نوترونی است که از توزیع بولتزمن^۱ پیروی می‌کند. یعنی در دمای اتاق برای آن $kT = 0.0235 \text{ eV}$ که به عبارت دیگر مشخصه سرعت آن $2/2 \text{ km/s}$ می‌گردد. در بسیاری از مواد واکنش‌های نوترون حرارتی سطح مقطع مؤثرتری نسبت به نوترون‌های سریع دارند؛ به همین دلیل نوترون‌های حرارتی با احتمال بیشتری جذب هسته‌ای که با آن برخورد می‌کنند می‌شوند.

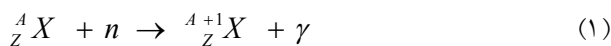
تمامی سیستم‌هایی که از نوع طیف‌سنجی گاما بر پایه روش‌های نوترونی هستند در نهایت مرکب از یک منبع نوترونی و یک آشکارساز اشعه‌ی گاما هستند. نوترون می‌تواند از یک چشمه رادیواکتیو و یا یک شتاب دهنده^۲ ایجاد شود، و احتمالاً یک کندکننده^۳ هم وجود دارد (که غنی از مواد هیدروژن‌دار است که نوترون‌های سریع را با استفاده از پراکندگی کشسان آهسته می‌کند).

آشکارساز اشعه‌ی گاما یک عضو کلیدی دیگر از سیستم است. آشکارساز ژرمانیومی فوق خالص HPGe (High Purity Germanium) یک آشکارساز اشعه‌ی گاما است. HPGe از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد و کارایی آن خیلی سریع با افزایش انرژی کاهش می‌یابد، و همراه آن یک سیستم خنک‌کننده نیز می‌باشد. به خاطر وجود این شرایط

آشکارسازهای دیگری پیشنهاد می‌شود، مانند BGO (Bismuth Germanate) یا NaI (sodium iodide)، که قدرت تفکیک انرژی ضعیف دارد اما می‌تواند خیلی سریع کار کند (آهنگ شمارش بالا). این آشکارسازها خیلی مقرون به-صرفه هستند و نیازی به سیستم خنک‌کننده هم ندارند. بسیاری از سیستم‌ها چندین دقیقه وقت نیاز دارند تا یک آمار و ارقام کافی برای رسیدن به یک اظهار نظر دقیق را به دست آورند.

آنالیز نوترون حرارتی، ترکیب مواد مورد بررسی را با اندازه‌گیری نتایج برخورد نوترون‌های آهسته با مواد هدف را مشخص می‌کند. سیستم TNA بر غلظت بالای نیتروژن در مواد منفجره برای شناسایی آن‌ها متکی است، به ویژه در گیر-اندازی تابشی از نوترون‌های حرارتی در نیتروژن $(N(n_{th}, \gamma)N)$ ، که نتایج آن در حدود ۱۴٪ از موارد با مشخصه $10/83 \text{ MeV}$ اشعه‌های گاما همراه است (بالاترین انرژی اشعه گاما تولیدی از ایزوتوپ طبیعی رخ می‌دهد). نیتروژن به جز گامای با انرژی $10/83 \text{ MeV}$ ، گاما‌های دیگری را نیز در برخورد با نوترون از خود نشان می‌دهد. درصد تولید این گاماها بسیار کم بوده و همچنین با دیگر گاما‌های حاصل از عناصر مختلف موجود در ماده دارای همپوشانی می‌باشند و دارای قابلیت کاربردی برای سیستم TNA نمی‌باشد [۱].

در روش تحلیل گامای آنی ناشی از فعال‌سازی نوترونی (PGNAA)، اشعه گامای آنی حاصل از برهم‌کنش (n, γ) نوترون‌های حرارتی با هدف، مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۴]. پس از جذب یک نوترون حرارتی توسط یک هسته ایزوتوپ جدیدی با عدد جرمی یک واحد بیشتر به وجود می‌آید. این ایزوتوپ به‌طور آنی یک پرتوی گاما که خاص آن هسته است، گسیل می‌کند. انرژی گامای تابشی مساوی با انرژی جدایی نوترون از هسته جدید است.

^۱Boltzmann distributed^۲Accelerator^۳Moderator

هنگامی که هسته مرکب پس از برخورد نوترون بمباران به هسته هدف تشکیل گردید، انرژی برانگیختگی را می‌توان براساس اختلاف جرمی ارزیابی نمود. در واکنش گیراندازی نوترون حرارتی برای هسته نیتروژن، انرژی کل اشعه گامای آنی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} E^* &= B_n \\ &= ([M(^{14}N) + M_n] - M(^{15}N))C^2 \\ &= 10.83 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2)$$

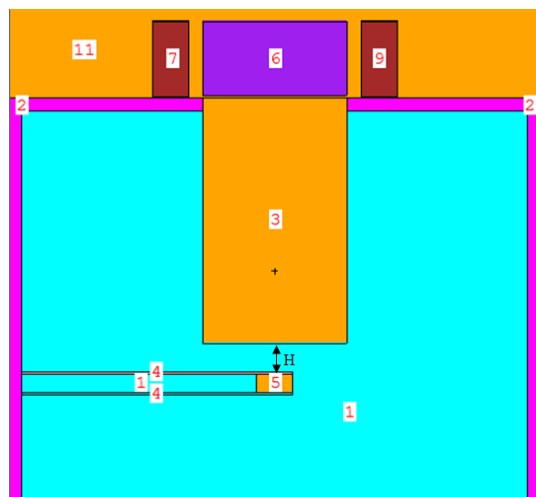
M جرم جسم (kg) و C سرعت نور در خلاء (m/s) است. انرژی برانگیختگی کل E^* که به طور تجربی برابر ۱۰/۸۳ MeV تعیین گردیده به‌عنوان انرژی واکنش متعاقب تا حالت پایه عمل کرده و ممکن است هسته در یک مرحله با به کاربردن انرژی کل E^* یا از طریق چندین حالت برانگیخته، واکنش یافته شده و اشعه‌های زیادی از گامای آنی با انرژی پایین دفع نماید.

این اشعه‌ی گامای آنی ۱۰/۸۳ MeV می‌تواند برای شناسایی کمی عنصر نیتروژن مورد استفاده قرار گیرد، ولی به این دلیل که گامای ۱۰/۸۳ MeV بالاترین انرژی این واکنش است و در نتیجه با زمینه طیفی کمتری روبرو خواهد بود، نسبت به دیگر گاماها آنی ارجحیت خواهد داشت [۱۵].

پس از واکنش جذب نوترون‌های حرارتی توسط هسته ایزوتوپ پایدار ^{14}N ، هسته برانگیخته ^{15}N تولید شده و بلافاصله با انتشار گامای آنی با انرژی ۱۰/۸۳ MeV به حالت پایدار خود می‌رسد. از آنجا که برای انجام این مطالعه نیاز به تولید نوترون‌های حرارتی می‌باشد و از طرفی نیز در بین چشمه‌های رادیواکتیو، ^{252}Cf پایین‌ترین میانگین انرژی را دارد لذا با یک ضخامت کندکننده معین می‌توان به نوترون‌های حرارتی دست پیدا کرد. چشمه ^{252}Cf مورد استفاده در این شبیه‌سازی دارای شدت نوترونی $10^7 \times 10^7 \text{ n/s}$ می‌باشد (جدول ۱).

معمولاً هر عنصر پس از جذب نوترون چند پرتو گامای آنی با شدت متفاوت گسیل می‌کند که از میان آن‌ها پرتوهای که دارای شدت و انرژی بیشتری بوده و با پرتوهای گامای ناشی از عناصر دیگر تداخل نمی‌کنند برای شناسایی آن عنصر مورد استفاده قرار می‌گیرند. قدرت نفوذ زیاد نوترون و گاما در ماده سبب می‌شود که روش PGNAA برخلاف بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری از خصوصیات مهمی مانند تجزیه و تحلیل مواد در نمونه حجیم، بررسی فوری در محل، غیر مخرب بودن روش و عدم نیاز به آماده‌سازی قبلی نمونه برخوردار باشد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه پرتوهای گامای آنی بلافاصله پس از جذب نوترون در هسته گسیل می‌شوند مشکل ناشی از نیمه عمرهای خیلی کوتاه و خیلی بلند مطرح نیست و کلیه عناصری که سطح مقطع جذب ماکروسکوپی پایین نداشته و دارای پرتوهای گامای آنی با شدت مناسب باشند توسط این روش قابل شناسایی می‌باشند. در اغلب عناصر، سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی خیلی بیشتر از سطح مقطع پراکندگی ناکشسان نوترون‌های سریع است، و انرژی اغلب پرتوهای گامای آنی عناصر در گستره ۳ تا ۱۱ MeV می‌باشد. چون پرتوهای گامای آنی در مقایسه با پرتوهای گامای تأخیری، انرژی بیشتری دارند، لذا اکثر قله‌های موجود در طیف، مربوط به پرتوهای گامای آنی ناشی از جذب نوترون‌های حرارتی‌اند.

مواد منفجره عموماً حاوی ترکیبات ازت هستند، و در نتیجه، با تشخیص وجود ازت در داخل یک بسته یا کیف می‌توان به احتمال وجود مواد انفجاری در آن پی‌برد. ازت با استفاده از پرتوهای گامای ۱۰/۸۳ MeV حاصل از جذب نوترون‌های حرارتی یا پرتوهای گامای ۲/۳۱ MeV ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون‌های سریع شناسایی می‌شود. این پرتو گامای مشخصه ازت است.



شکل (۱): سطح مقطع سیستم شبیه سازی شده.

همان طور که از شکل ۱ پیداست، جهت آشکارسازی پرتوهای گاما از دو آشکارساز سنتیلاتور NaI(Tl) که درست روبروی حجم فعال سازی قرار می گیرند، استفاده شد. حجم فعال سازی نیز برای سیستم با ابعاد $10 \times 20 \times 20$ سانتی متر در نظر گرفته شد.

دز معادل مؤثر E یکی از کمیت های اصلی در اصول حفاظت در برابر اشعه می باشد. سطوح مختلف دز و حدود قانونی آن برای عموم مردم و متخصصین فقط به این کمیت وابسته می باشد. دز معادل مؤثر که توسط کمیسیون بین المللی حفاظت پرتوشناختی (ICRP¹) تعریف شده است به صورت زیر می باشد:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3)$$

که در آن w_T ضریب وزنی برای بافت T و H_T دز معادل بافت T است [۱۶].

دز معادل مؤثر کمیتی است که علاوه بر نقش اثرات بیولوژیکی پرتوهای مختلف، نقش بافت های مختلف بدن را (در ارتباط با وقوع آثار آماری نظیر سرطان ها) در نظر می گیرد.

جدول (۱): اطلاعات چشمه به کار رفته در طراحی سیستم.

واپاشی ^{252}Cf و انتشار نوترون های حاصل از شکافت خود به خودی	
نیمه عمر (شکافت خود به خودی)	۸۵ سال
شدت نوترون	$2/3 \times 10^9$ نوترون بر ثانیه به ازای هر میلی گرم ^{252}Cf
میانگین انرژی نوترون	۲ MeV
فعالیت ویژه	۲۰ گیگا بکرل به ازای هر میلی گرم ^{252}Cf

از آنجایی که چشمه در نظر گرفته برای شبیه سازی، دارای طیف انرژی نوترونی با میانگین ۲ MeV می باشد، برای افزایش احتمال واکنش گیراندازی می بایست انرژی نوترون های خروجی از چشمه را تا حد دمای محیط (انرژی نوترون های حرارتی 0.025 eV)، کاهش داد. لذا از پارافینی با چگالی 0.89 gr/cm^3 استفاده شد. در شکل ۱ مقطع سیستم نوترونی شبیه سازی شده داده شده است که جزئیات آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): قسمت های مختلف سیستم شبیه سازی شده.

شماره ماده	ویژگی ماده
۱	ماده کندکننده
۲	حفاظ سربی
۳	کانال عبور نوترون ها
۴	محل قرارگیری لوله جهت ورود و خروج چشمه
۵	محل قرارگیری چشمه
۶	حجم فعال سازی (نمونه)
۷ و ۹	محل قرارگیری آشکارسازها
۱۱	محیط اطراف

¹International Commission on Radiological Protection

جدول (۳): تقسیم‌بندی نواحی مختلف برای کار با پرتو.

محدوده دز	وضعیت
کم‌تر از $2.5 \mu Sv / h$	ناحیه معمولی و مردم عادی می‌توانند در این ناحیه تردد کنند
ما بین $2.5 \mu Sv / h$ و $7.5 \mu Sv / h$	ناحیه مجاز برای پرتوکاران
ما بین $7.5 \mu Sv / h$ و $2000 \mu Sv / h$	ناحیه حفاظت شده، در این ناحیه پرتوکاران با هماهنگی مسئول فیزیک بهداشت می‌توانند تردد کنند
بیش‌تر از $2000 \mu Sv / h$	ناحیه ممنوعه، کسی مجاز به تردد در این ناحیه نیست

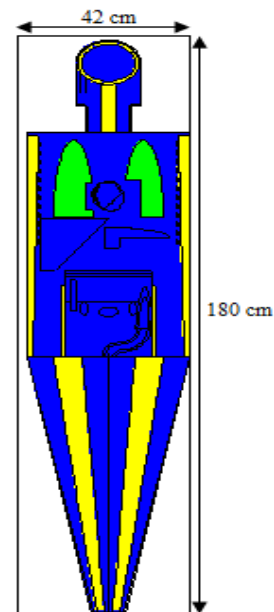
۳. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

MCNP یک کد چند منظوره بسیار قوی است که با استفاده از روش مونت کارلو و داده‌های تجربی می‌تواند به محاسبه انتقال نوترون، الکترون، فوتون و یا مجموعه‌ای از آنها طی عبور از محیط‌های مختلف پرداخته و شبیه‌سازی خوبی از سیستم‌های نوترونی را ارائه دهد [۲۱]. در این مطالعه، از ورژن MCNPX2.7 و کامپیوتر ۶۴ بیتی Core(TM)i3 با قدرت پردازش 2.1GHz و از RAM ۴ گیگ استفاده شده است.

برای شبیه‌سازی سیستم فرضی مذکور ضخامتی که برای لایه H در ما بین چشمه و حجم فعال‌سازی در نظر گرفته شد برابر ۶ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین ضخامت پارافین به‌کار رفته در سیستم به‌منظور جذب تابش‌های نوترونی ناشی از شکافت خود به خودی چشمه، از چشمه تا دیواره‌های کناری سیستم برابر ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد، در لایه خارجی سیستم نیز لایه سربی به ضخامت $1/80$ سانتی‌متر برای جذب پرتوهای گامای حاصل از واکنش در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

به‌منظور آگاهی از دز معادل مؤثر، تعیین دز جذبی و معادل آن در تمام ارگان‌های بدن انسان ضروری می‌باشد. دز معادل مؤثر از طریق محاسبه دز جذب شده در اندام‌های مختلف بدن برای شرایط مختلف تابش به‌دست می‌آید. برای انجام این کار، یک مدل از بدن انسان که با عنوان "فانتوم" شناخته شده است مورد نیاز است [۱۷، ۱۸].

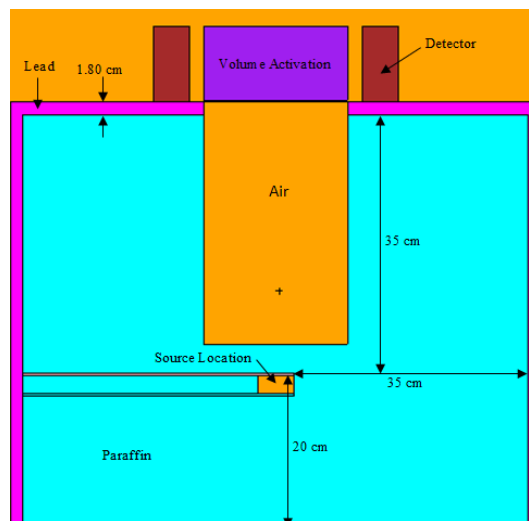
مدل تحلیلی بدن انسان توسط انتشارات ORNL-MIRD شرح داده شده است. تمام ارگان‌های بدن انسان با هندسه‌های مختلف با معادلات تحلیلی نشان داده شده است. فانتوم ORNL-MIRD شامل سه بخش می‌باشد: ۱- تنه و بازوها به عنوان استوانه‌های بیضوی نشان داده شده است؛ ۲- پاها به صورت دو مخروط ناقص می‌باشد؛ و ۳- گردن و سر به صورت استوانه‌ای دایره‌ای و بیضوی می‌باشند. علاوه بر اشکال هندسی، ساختار شیمیایی و چگالی بافت‌های خاص اندام بدن برای محاسبات دز جذب نیاز می‌باشد [۱۹].



شکل (۲): اندازه‌های فانتوم مورد استفاده در شبیه‌سازی.

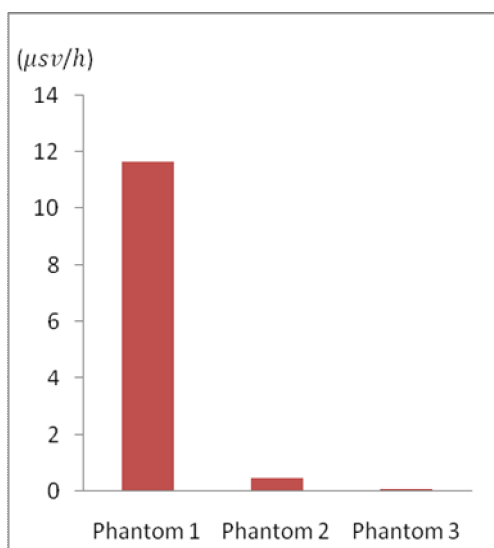
تقسیم‌بندی برای کار، در مراکز کار با پرتو برای افراد پرتو کار و مردم عادی در جدول ۳ آورده شده است [۲۰].

(آهنگ گسیل نوترون حدود $1/15 \times 10^7$ n/s) انجام گرفت و سپس، آهنگ دز معادل بر حسب میکروسیورت بر ثانیه برای سه فانتوم در نظر گرفته شده در فواصل ۱۱، ۷۰ و ۱۳۰ سانتی-متر از سطح خارجی سیستم، هم برای فوتون و هم برای نوترون و همچنین دز معادل کل برای هر یک از فانتومها ثبت و رسم شدند. نتایج این محاسبات در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

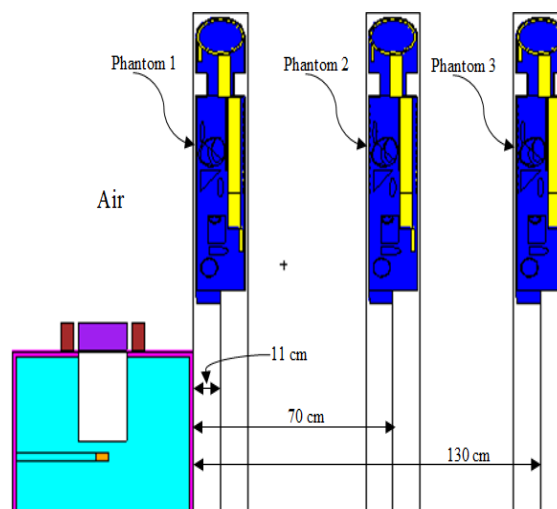


شکل (۳): سیستم شبیه‌سازی شده.

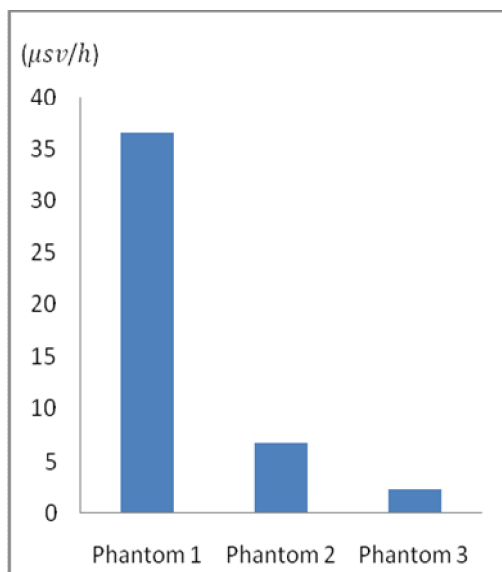
برای انجام محاسبات مربوط به دزیمتری و مشخص کردن نواحی مختلف دز طبق جدول ۲ فانتوم‌های متعددی در فواصل مختلفی از سیستم آشکارسازی فرضی قرار داده شد (شکل ۴).



شکل (۵): آهنگ دز معادل نوترون برای فانتوم‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی.



شکل (۴): هندسه شبیه‌سازی شده برای تعیین دز معادل.



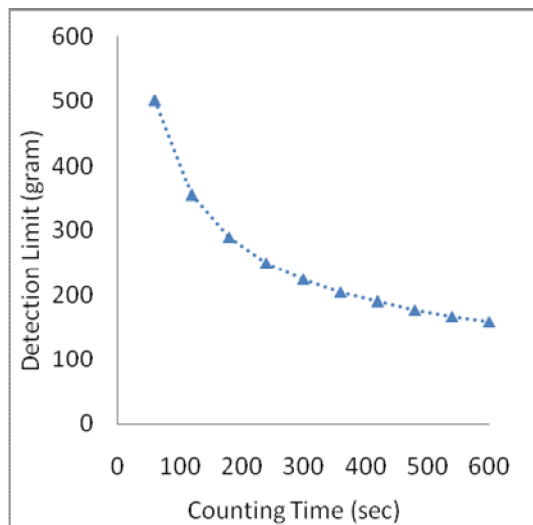
شکل (۶): آهنگ دز معادل گاما برای فانتوم‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی.

برای محاسبه شار فوتون و نوترون بر روی فانتوم‌های مورد بررسی از تالی F4 استفاده شد. همچنین برای بررسی میزان دز جذبی نوترون و گاما برای هر یک از فانتوم‌های شبیه‌سازی شده، از ضرایب تبدیل شار به دز، DE و DF استفاده شد. با انجام شبیه‌سازی مربوطه و به‌دست آوردن خروجی کد و انجام محاسبات دزیمتری، محاسبات مربوط به قدرت چشمه نوترون

است:

$$DL = 3.29[(dB/dt)/t_c]^{0.5} / S \text{ (gr)} \quad (4)$$

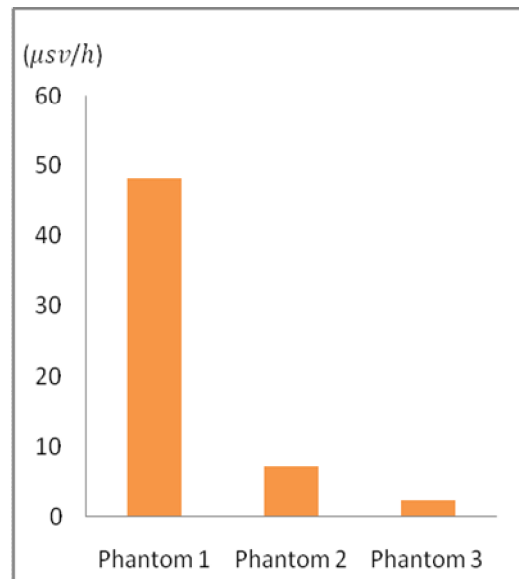
بنابراین با توجه به مقدار S (حساسیت شمارش عنصری)، dB/dt (نرخ زمینه موجود در ناحیه انرژی مربوطه) و t_c (زمان‌های مختلف شمارش) حد آشکارسازی قابل پیش‌بینی خواهد بود [۲۲]. ماده مورد استفاده در شبیه‌سازی ماده منفجره HMX با چگالی $1/96 \text{ gr/cm}^3$ می‌باشد. حجم فعال‌سازی مورد نظر برابر ۴۰۰۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. با توجه به روابط بالا می‌توان حد آشکارسازی را برای ماده منفجره HMX که محتوی ۳۷/۸٪ نیتروژن می‌باشد بر حسب زمان شمارش، به دست آورد. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، سیستم طراحی شده می‌تواند ماده منفجره HMX را با وزن‌های ۱۵۸ و ۵۰۱ گرم را به ترتیب در مدت زمانی ۱۰ و ۱ دقیقه شناسایی نماید.



شکل (۸): حد آشکارسازی (گرم) بر حسب زمان شمارش HMX.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با در نظر گرفتن یک سیستم فرضی شبیه‌سازی شده برای آشکارسازی مواد منفجره، سعی بر آن شد تا بتوان ملاحظات ایمنی مورد نیاز برای کار در چنین محیطی را



شکل (۷): آهنگ دز معادل مجموع نوترون و فوتون برای فانتوم‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی.

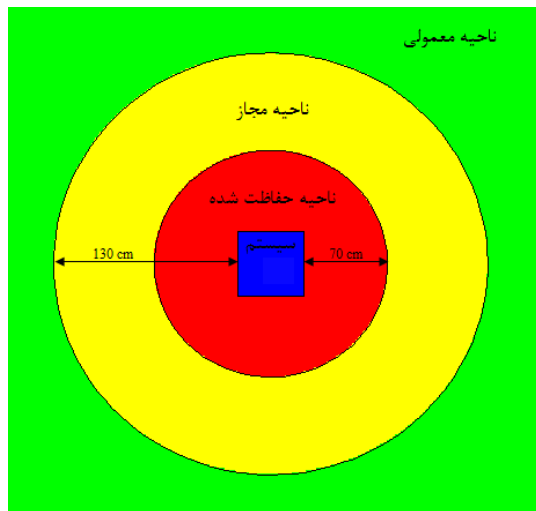
همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، آهنگ دز نوترون فانتوم شماره ۲ و ۳ اختلاف کمتری دارند. همچنین نشان می‌دهد که به طور کل، برد ذره نوترون در فضا بسیار کم بوده و لذا پس از طی مسیری بالغ بر یک متر دیگر آنچنان تأثیری در دز معادل ندارد. اما همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد دز دریافتی فانتوم از گاما همانند نوترون با افزایش فاصله نیز کاهش می‌یابد ولی در کل می‌توان گفت که برد پرتوی گاما به مراتب از نوترون بیشتر بوده و لذا اکثر دز معادل کل نیز ناشی از همین پرتوی گاما می‌باشد.

با توجه به شکل ۷ و جدول ۳ حال می‌توان نواحی مختلف دز را برای کار در محیط سیستم فرضی معین کرد، بدین صورت که هیچ ناحیه ممنوعه‌ای برای سیستم فرضی وجود ندارد و تا شعاع ۷۰ سانتی‌متری سیستم فرضی ناحیه حفاظت شده، و تا شعاع ۱۳۰ سانتی‌متری ناحیه مجاز برای پرتوکاران و از ۱۳۰ سانتی‌متری به بعد نیز ناحیه معمولی می‌باشد.

حد آشکارسازی با توجه به رابطه ۴ برای هر عنصر DL^1 با نوسانات پس زمینه و حساسیت شماری عنصری متناسب

¹Detection Limit

HMX را با وزنهای ۱۵۸ و ۵۰۱ گرم را به ترتیب در مدت زمانی ۱۰ و ۱ دقیقه شناسایی نماید.



شکل (۹): تقسیم‌بندی نواحی مختلف کاری با سیستم فرضی.

رعایت کرد، و نواحی مختلفی را به جهت رعایت نکات فیزیکی بهداشت به منظور جلوگیری از پذیرش بیش از حد دز همان‌طور که در شکل ۹ آورده شده است را تعیین نمود. لذا به دلیل پرخطر بودن این نواحی حفاظت شده و ممنوعه برای انسان پیشنهاد می‌شود که همواره برای کار در این چنین محیط‌هایی مدیریت صورت گیرد. تأثیرپذیری نسبی زیستی به متغیرهای بسیاری مانند ماهیت فیزیکی میدان تابش، نوع ماده زیستی، پاسخ ویژه زیستی، درجه‌ی پاسخ و دز تابش و آهنگ دز بستگی دارد. هر چند که روش مورد استفاده برای شناسایی مواد منفجره از لحاظ زمانی روش نسبتاً طولانی بوده، ولی به دلیل پاسخ مناسب و مطمئن و امکان شناسایی غیرمخرب عناصر ماده، مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ویژگی‌های سیستم شبیه‌سازی شده، سیستم می‌تواند ماده منفجره

۵. مراجع

- [1] C. Bruschini. Commercial systems for the direct detection of explosives for explosive ordnance disposal tasks. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. 2(3)(2001) 299-336.
- [۲] بازول، جی، روشهای آزمایشگاهی رادیوایزوتوپ ها، انتشارات سازمان انرژی اتمی ایران، چاپ سوم، (۱۳۸۸).
- [3] E. Rauhala and Z. Alfassi. *Chemical Analysis by Nuclear Methods*. (1994), Wiley, New York.
- [4] A. Buffler, Contraband detection with fast neutrons. *Radiation Physics and Chemistry*. 71(3)(2004) 853-861.
- [5] T. Gozani & et al. Explosive detection system based on thermal neutron activation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 4(12)(1989) 17-20.
- [6] S.K. Sharma & et al. Explosive detection system using pulsed 14MeV neutron source. *Fusion Engineering and Design*. 85(7)(2010) 1562-1564.
- [7] F. Brooks & et al. Determination of HCNO concentrations by fast neutron scattering analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 410(2)(1998) 319-328.
- [8] D. Brown & et al. Application of pulsed fast neutrons analysis to cargo inspection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 353(1-3)(1994) 684-688.
- [9] W. Nunes & et al. Explosives detection using prompt-gamma neutron activation and neural networks. *Applied radiation and isotopes*. 56(6)(2002) 937-943.
- [10] G. Vourvopoulos and F. Schultz. A pulsed fast-thermal neutron system for the detection of hidden explosives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 79(1-4)(1993) 585-588.
- [11] B. Sowerby and J. Watt. Nuclear techniques for on-line analysis in the mineraland energy industries. in 9th Pacific Basin Nuclear Conference: Nuclear Energy, Science and Technology Pacific Partnership; Proceedings of the. (1994). Institution of Engineers, Australia.
- [12] C. Oliveira, J. Salgado and F. Carvalho. Optimization of PGNA instrument design for cement raw materials using the MCNP code. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 216(2)(1997) 191-198.
- [۱۳] شولتیس، جی. کنت، حفاظت‌سازی تابش، سیمای دانش،

- Roentgenology. 120(1974) 708-709.
- [19] D. Krstić and D. Nikezić. Input files with ORNL—mathematical phantoms of the human body for MCNP-4B. Computer physics communications. 176(1)(2007) 33-37.
- [۲۰] استانداردهای پایه حفاظت در برابر اشعه، سازمان انرژی اتمی ایران، معاونت نظام ایمنی هسته ای کشور، (۱۳۸۰).
- [21] J.F. Briesmeister. MCNP version 4A. (1993), Los Alamos National Laboratory.
- [22] J.K. Shultis and R.E. Faw. Radiation shielding and radiological protection, in Handbook of nuclear engineering. Springer. (2010) 1313-1448.
- [۲۳] امیری، مهدی. بیات، سجاد. شفایی دوک، حمید. هاشمی-نژاد، سید محمد. طراحی و شبیه سازی یک سیستم فرضی جهت کشف مواد منفجره بر مبنای تکنیک PGNAA. نشریه تابش و فناوری هسته‌ای، دوره ۲، شماره ۴، (۱۳۹۴) ۱-۱۱.
- (۱۳۹۳)، ص ۱۸۹.
- [۱۴] کوهی فایق، رحیم، کاربرد روش فعال‌سازی نوترونی در کشف مواد منفجره پلاستیکی، فیزیک پژوهش ایران، (۱۳۷۹).
- [15] D. Garber and R. Kinsey. BNL 325: Neutron Cross Sections. (1976), Curves.
- [16] R. Sievert and G. Failla. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Health Physics (England), (1959).
- [17] I.C.o.r.p.C. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: the Skeleton: A Report of a Task Group of Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection Adopted by the Commission in July (1994).
- [18] H.O. Wyckoff. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) report to the International Executive Committee of the XIIIth International Congress of Radiology. American Journal of