

کاربرد روش "فعال سازی نوترونی" در کشف مواد منفجره پلاستیکی

سیدهاشم میری حکیم آباد، رحیم کوهی فایق و محمدهادی هادی زاده یزدی

گروه فیزیک دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد
مشهد، ایران، ۹۱۷۳۵-۶۵۴

(دریافت مقاله: ۷۸/۵/۲۴ دریافت نسخه نهایی: ۷۸/۱۲/۱۸)

چکیده

شناسایی وسایل مسافران خطوط هوایی یا بسته‌های پستی، از نظر وجود بمبهای پلاستیکی در آنها، با استفاده از کاوردهای نوترونی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مواد منفجره از نظر مقدار ازت بسیار غنی هستند. ازت با استفاده از پرتوهای گاما با انرژی $10/83 \text{ MeV}$ حاصل از جذب نوترونهاي حرارتي قابل شناسایی است. ابتدا این روش به صورت نظری بررسی می‌شود، یعنی با محاسبات تراپرد توأم نوترون و پرتوهای گامای آبی حاصل از برهمکنشهای نوترون به روش مونت-کارلو و استفاده از کد محاسباتی MCNP طیف پرتوهای گامای آبی با استفاده از شبیه سازی مونت-کارلو به دست می‌آید. بنابراین، فاصله‌ها و مکانهای بهینه چشمه، آشکارساز و نمونه نسبت به یکدیگر و نیز ضخامت مناسب کندکننده، با لحاظ کردن اثر مهم انباشت تعیین می‌شوند. سپس، با مدل مبتنی بر یافته‌های عددی در قسمت قبل، کارهای عملی با استفاده از چشمه نوترون Am-Be انجام می‌گیرد. در عمل، به دلیل نقش چشمه و اثر انباشت، شرایط بهینه محاسباتی تغییر داده می‌شود، و طرح اولیه، براساس نتایج عملی، مورد تجدید نظر قرار می‌گیرد. از مجموع بررسیهای به عمل آمده و تأثیر عوامل مختلف بر پاسخ آشکارسازها و تحلیل نتایج به دست آمده برای دو نوع کندکننده پارافین و گرافیت، میزان توانمندی این روش نقد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فعال سازی نوترونی، مواد منفجره، مونت کارلو

۱. مقدمه

این حوادث وجود دارد؟ به عبارت دیگر، آیا می‌توان به وجود ماده منفجره در چمدان مسافران پی برد؟ بازرسی سنتی چمدانها با اشعه X، گرچه می‌تواند وجود اسلحه را نشان دهد ولی به دلیل شفاف بودن مواد منفجره نسبت به آن مناسب نیست زیرا، این مواد مانند مواد پلاستیکی یا انواع پارچه‌ها نسبت به اشعه X عمل می‌کنند. مسئولان سازمانهای هوانوردی، یک دستگاه آشکارساز را موفق می‌نامند که بتواند در مدت زمان کوتاهی یک تا دو کیلوگرم ماده منفجره را آشکار کند [۱].

نیتروگلیسییرین، نیتروسولوز، و نیترات آمونیم، که در شمار مواد منفجره هستند، بین ۱۵ تا ۴۰ درصد ازت دارند. برای

حدود یک میلیارد مسافر در سال با هواپیماهای مسافربری به گوشه و کنار جهان مسافرت می‌کنند و، از نظر ایمنی، کیف و چمدان هر مسافر باید کنترل شود، زیرا بروز حوادث ناگوار ناشی از پنهان کردن مواد منفجره توسط مسافران هواپیماها امری است که در گذشته زیاد اتفاق افتاده و احتمال بروز آن در آینده نیز منتفی نیست. سقوط پرواز Pan Am 103 بر فراز لاکربی اسکاتلند ناشی از یک تا دو کیلوگرم ماده منفجره بوده است. چنین مقدار کمی از مواد منفجره را به راحتی می‌توان در مقدار زیادی مواد بی خطر پنهان کرد. آیا راهی برای جلوگیری از

پستخانه‌ها استفاده کرد.

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 پی برد. ازت با استفاده از پرتوهای گامای $10/83 \text{ MeV}$ حاصل از جذب نوترونهای حرارتی یا پرتوهای گامای $2/31 \text{ MeV}$ ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترونهای سریع شناسایی می‌شود. سطح مقطع گیراندازی ^{14}N برای نوترونهای حرارتی در حدود $0/75$ بارن است. پرتوهای گامای آنی که پس از جذب نوترون از هسته برانگیخته $^{15}\text{N}^*$ گسیل می‌شوند دارای انرژی $10/83 \text{ MeV}$ هستند. از آنجا که ^{15}N هسته پایدار است، هیچ گامای تأخیری ایجاد نمی‌کند. از طرفی سطح مقطع ^{15}N برای جذب نوترونهای حرارتی $0/0004$ بارن است پس حتی در صورت جذب نوترون توسط هسته‌های ^{15}N که منجر به تشکیل ایزوتوپ پرتوزای ^{16}N با نیم عمر $7/2$ ثانیه می‌شود. میزان پرتوهای گامای تأخیری در مقایسه با پرتوهای گامای آنی بسیار کم و غیرقابل آشکارسازی خواهد بود. مهمترین ویژگی پرتوهای گامای آنی حاصل از جذب نوترون در ازت، انرژی بالای آنهاست که مانع از تداخل آنها با پرتوهای گامای حاصل از برهمکنش نوترون با عناصر دیگر و همچنین پرتوهای گامای زمینه می‌گردد و راحت‌تر قابل تشخیص است.

۲. بررسی‌های نظری

توزیع نوترون در محیط را نمی‌توان جز در برخی موارد ساده با حل معادله پخش به دست آورد. برای تعیین شار وابسته به انرژی و مکان نوترون و گاما، به حل معادله ترابرد توأم نوترون و گاما در دستگاه نیاز داریم. از طرفی شکل و شرایط مسئله و تعداد گروه‌های انرژی لازم برای تعیین طیف پرتوهای گاما، به کارگیری روشهای مبتنی بر حل معادله ترابرد را بسیار مشکل و در برخی موارد غیرممکن می‌سازد، لذا اغلب از شبیه سازی مونت کارلو استفاده می‌شود. با توجه به طبیعت کاتوره‌ای برهمکنشهای هسته‌ای، شبیه سازی مونت کارلو بسیار واقعی و دور از کلیه تقریبهای مربوط به روشهای محاسباتی دیگر است، زیرا در این روش کلیه فرایندها مطابق آنچه در عالم واقع رخ می‌دهد دنبال می‌شوند و احتمال هر رویداد با توجه به مقادیر تجربی، در قالب سطح مقطع، تعیین می‌گردد. در این پروژه شبیه

آشکارسازی ازت می‌توان از بمباران نوترونی استفاده کرد. فوتون گامای گسیل شده با انرژی معین در اثر جذب نوترون در ازت را می‌توان توسط آشکارساز شناسایی و، در نتیجه، ماده منفجره را کشف کرد.

۱.۱. اصول روش گامای آنی

پس از جذب یک نوترون حرارتی توسط یک هسته ایزوتوپ جدیدی با عدد جرمی یک واحد بیشتر به وجود می‌آید. این ایزوتوپ به طور آنی (در مدت زمانی از مرتبه 10^{-12} ثانیه) یک پرتوی گاما که خاص آن هسته است، گسیل می‌کند. انرژی گامای تابشی مساوی با انرژی جدایی نوترون از هسته جدید است

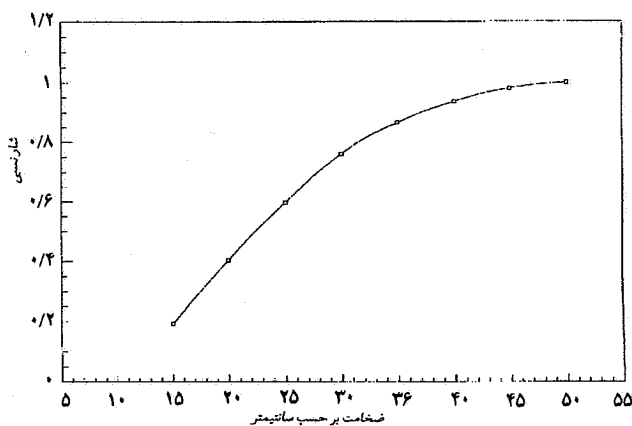


معمولاً هر عنصر پس از جذب نوترون چند پرتوگامای آنی با شدتهای متفاوت گسیل می‌کند که از میان آنها پرتوهایی که دارای شدت و انرژی بیشتری بوده و با پرتوهای گامای ناشی از عناصر دیگر تداخل نمی‌کنند برای شناسایی آن عنصر مورد استفاده قرار می‌گیرند. قدرت نفوذ زیاد نوترون و گاما در ماده سبب می‌شود که این روش، PGNAA، برخلاف بسیاری از روشهای اندازه‌گیری دارای خصوصیات مهمی باشد، از جمله آنالیز مواد در نمونه حجیم، آنالیز فوری در محل، غیرمخرب بودن روش و عدم نیاز به آماده سازی قبلی نمونه. از سوی دیگر، با توجه به اینکه پرتوهای گامای آنی بلافاصله پس از جذب نوترون در هسته گسیل می‌شوند مشکل ناشی از نیم 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 بیش از سطح مقطع پراکندگی ناکشسان نوترونهای سریع است، و اغلب پرتوهای گامای آنی عناصر در گستره 3 تا 11 MeV می‌باشند. چون پرتوهای گامای آنی در مقایسه با پرتوهای گامای تأخیری، انرژی بیشتر دارند، لذا اکثر قله‌های موجود در طیف، مربوط به پرتوهای گامای آنی ناشی از جذب نوترونهای حرارتی‌اند.

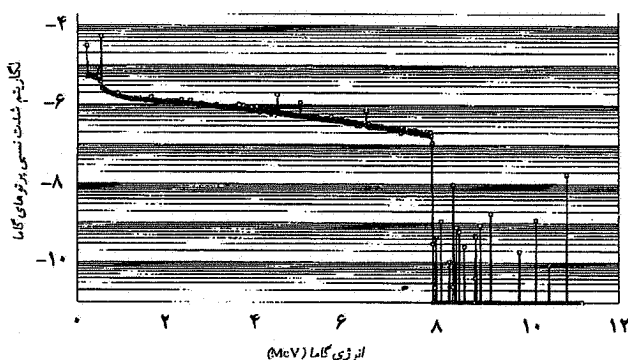
۲.۱. روش PGNAA برای تشخیص مواد منفجره شیمیایی

یکی از کاربردهای PGNAA، آنالیز فوری مواد منفجره شیمیایی است و، به این ترتیب، می‌توان از آن در فرودگاهها و

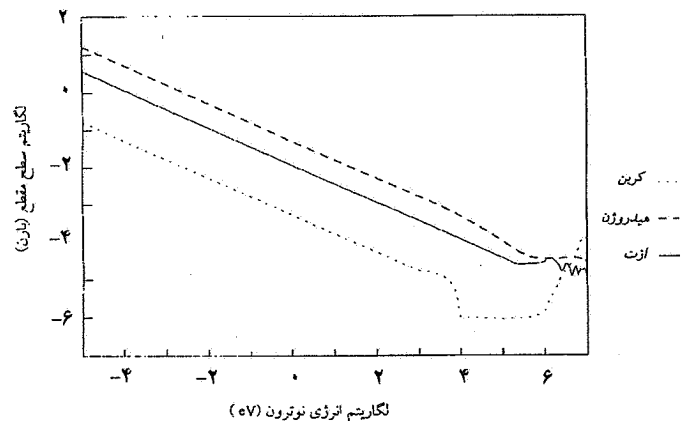
نوترونهاي حرارتي تا ضخامت ۳۰ سانتيمتر به سرعت، و از ۳۰ تا ۵۰ سانتيمتر به آرامي افزايش مي يابد، و از آن پس تغيير نمي کند. بنا بر اين ضخامت ۳۰ تا ۴۰ سانتيمتر گرافيت به عنوان کندکننده در هر طرف کاواک مناسب است اين ضخامت براي کندکننده پارافين حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتيمتر است. آنچه که براي کاهش اثر انباشت مهم است، کاهش نسبت قله کربن به قله ازت براي کندکننده گرافيت و کاهش نسبت قله هيدروژن به قله ازت براي کندکننده پارافين است. محاسبات نشان داد که با افزايش ضخامت گرافيت تا حدود ۴۰ سانتيمتر ارتفاع قله گامای $4/43 \text{ MeV}$ کربن تغيير نمي کند اما قله ازت تا ۱۰ برابر افزايش مي يابد. شکلهاي ۳ و ۴، به ترتيب، معرف نتيجه محاسبات براي ضخامتهای ۴۰ و ۲۰ سانتيمتر گرافيت هستند. ساختارهای برجسته این طیفها عبارتند از قله توليد زوج دو گامای ناشی از فعال شدگی سدیم



شکل ۲. تغییرات نسبی شار نوترونهاي حرارتي درون کاواک گرافيت در بازه انرژی ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ eV.



شکل ۳. طیف محاسباتی انرژی پروتهای گاما برای ۴۰ cm گرافيت.



شکل ۱. سطح مقطعی (n,γ) برای ازت، هیدروژن، و کربن [۴].

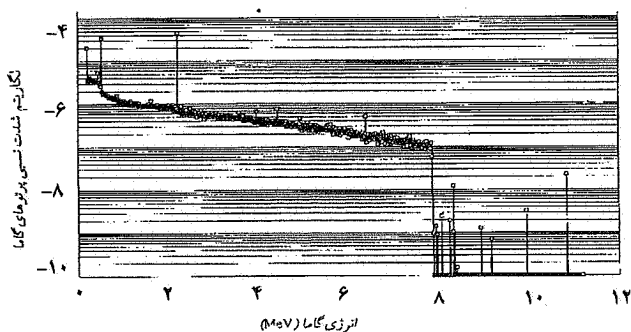
سازی مونت کارلو با استفاده از کد محاسباتی MCNP^۱، انجام گرفته است. کد MCNP ترابرد نوترون، فوتون و الکترون را به روش مونت کارلو دنبال کرده و نتایج ترابرد ذره را به صورت تابعی از مکان و انرژی ارائه می دهد [۲].

کد MCNP 4A یکی از جامعترین کدهایی است که قابلیتهای گستردهای برای حل مسایل ترابرد نوترون، فوتون و الکترون دارد. در این کد بررسی ترابرد توام نوترون، فوتون و الکترون امکان پذیر است.

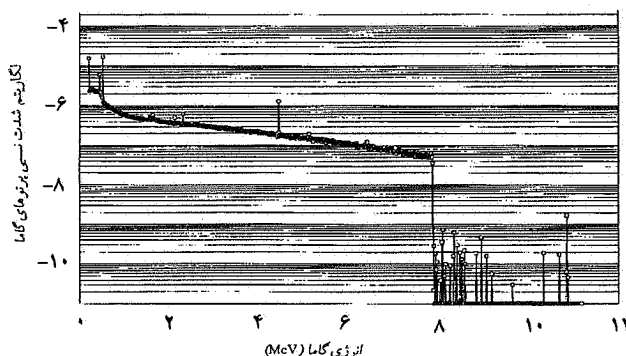
۱.۲. انتخاب کندکننده

مطابق شکل ۱ چون بهره واکنش (n,γ) برای نوترونهاي حرارتي خیلی بالاست [۴]، و سطح مقطع ازت برای این واکنش نیز زیاد است لذا لازم است که برای افزايش شدت پروتهای گامای حاصل از نمونه ازت، شار نوترونهاي حرارتي روی نمونه بیشینه بشود. از سوی دیگر ملاحظه می کنیم که سطح مقطع واکنش یاد شده برای کربن، ۱۰۰ برابر نسبت به هیدروژن کاهش می يابد. لذا از این نظر استفاده از کندکننده گرافيت برای کاهش اثر زمینه مناسب است.

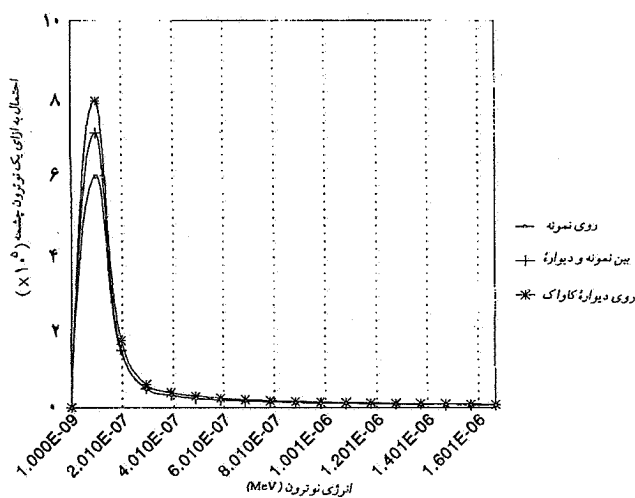
برای دست یابی به یک دستگاه بهینه، نمونه را وسط کاواکی به ابعاد (۳۰ cm) × (۳۰ cm) × (۳۰ cm) قرار داده و اطراف آن را با ضخامتهای مختلفی از گرافيت پوشش می دهیم. چشمه نوترونی Am-Be در زیر نمونه و چسبیده به آن قرار دارد. سپس با استفاده از کد MCNP شار نوترونهاي حرارتي روی نمونه را برای ضخامتهای متفاوت گرافيت محاسبه می کنیم. تغییرات شار نوترونهاي حرارتي بر حسب ضخامت گرافيت در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می کنیم شار



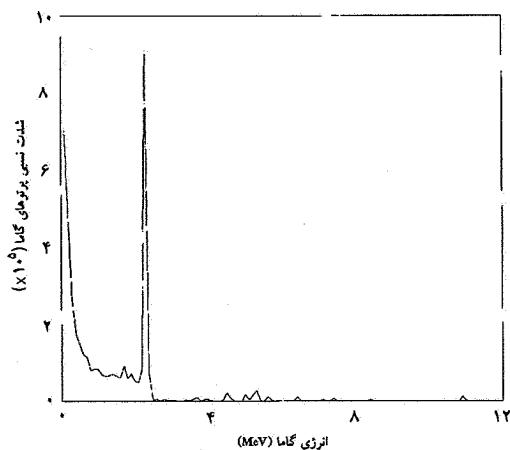
شکل ۵. طیف محاسباتی انرژی پرتوهای گاما برای ۲۰ cm پارافین.



شکل ۴. طیف محاسباتی انرژی پرتوهای گاما برای ۲۰ cm گرافیت.



شکل ۶. شار نوترونهاي حرارتی درون کاواک گرافیت به ازای مکانهای متفاوت چشمه.



شکل ۷. طیف انرژی پرتوهای گاما برای کندکننده پارافین.

گاماهای ناشی از برانگیختگی ناکشسان کربن (۴/۴۳ MeV)، سرب (۶/۸۶ MeV)، ازت (۱۰/۸۳ MeV) و قله‌های دیگری مربوط به این مواد می‌باشند. در شکل ۳ قله ۴/۴۳ MeV کربن متناظر با 2×10^{-6} (احتمال تولید گاما به ازای یک نوترون) و قله ازت متناظر با 2×10^{-8} است که نسبت این دو برای ۴۰ سانتیمتر گرافیت ۱۰۰ است. اما در شکل ۴، قله ۴/۴۳ MeV کربن تقریباً روی عدد 2×10^{-6} ثابت می‌ماند اما قله ازت به 2×10^{-9} افزایش می‌یابد و، در نتیجه، نسبت پیش گفته برای ضخامت ۲۰ سانتیمتری گرافیت ۱۰ بار بیش از حالتی است که از ضخامت ۴۰ سانتیمتری گرافیت استفاده کنیم.

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است برای محیطی با ضخامت ۲۰ سانتیمتر کندکننده پارافین، ارتفاع قله ازت در بهترین حالت 2×10^{-8} به ازای یک نوترون چشمه می‌رسد اما ارتفاع قله هیدروژن در این حالت بسیار بالا و از مرتبه 4×10^{-5} است.

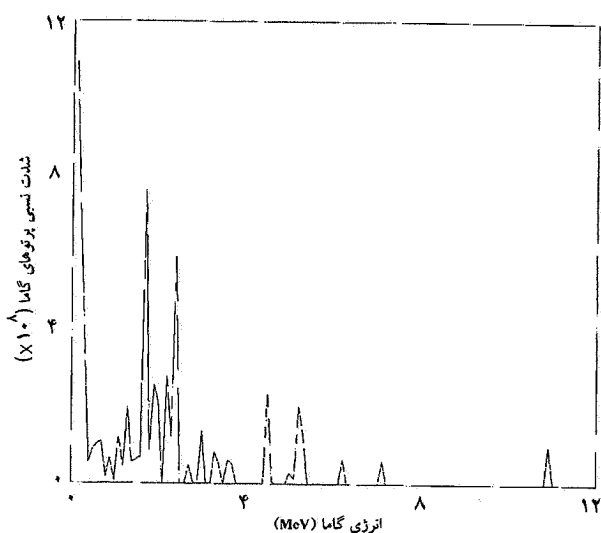
بنابراین هرگاه از کندکننده پارافین استفاده کنیم، نسبت قله $2/23 \text{ MeV}$ هیدروژن به قله $10/83 \text{ MeV}$ ازت برای بهترین ضخامت پارافین یعنی حدود ۲۰ سانتیمتر، تقریباً ۱۰۰۰ است. لذا اثر انباشت در کندکننده پارافین بیش از گرافیت است.

شار نوترونهاي حرارتی روی نمونه هنگامی که چشمه به نمونه چسبیده باشد بیشینه است، زیرا در این وضعیت، علاوه بر کند شدن نوترونهاي سریع، نوترونهاي کند چشمه نیز موثر خواهند بود. شار نوترونهاي حرارتی روی نمونه، به ازای مکانهای متفاوت چشمه در درون کاواک در شکل ۶ رسم شده است. از مقایسه شکل‌های ۷، ۸ و ۹ که به ترتیب طیفهای انرژی محاسبه شده را برای کندکننده‌های پارافین، گرافیت، و آب

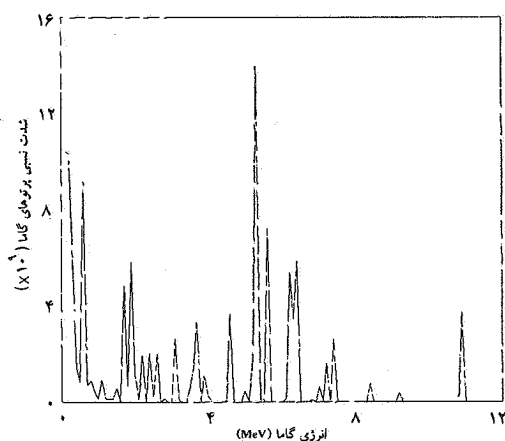
جدا کرد. کاربست آشکارسازهای نیم رسانای HPGE، که قدرت تفکیک بسیار بالایی دارند، به علت مشکلات ناشی از تحریم هسته‌ای ایران و محدودیتهای مالی و فنی، از جمله لزوم کاربرد زمراها و آسیب پذیری بیشتر بلورهای HPGE در مقایسه با NaI، و افت قدرت تفکیک در نتیجه این آسیب، میسر نبود. لذا تصمیم گرفته شد که از آشکارسازهای NaI استفاده شود.

۳.۲. مواضع بهینه برای چشمه، آشکارساز، و نمونه

با محاسبات مونت کارلو نشان داده‌ایم که شار نوترون با دور شدن از چشمه کاهش می‌یابد بنابراین شدت پرتوهای گامای آتی حاصل از گیراندازی یا پراکندگی ناکشسان نوترون با عناصر مختلف محیط در نزدیکی چشمه بیشتر است با دور شدن از چشمه، همراه با کاهش شار نوترون، میزان تولید پرتوهای گامای آتی نیز کاهش می‌یابد و اثر زمینه کم می‌شود. از سوی دیگر، همان گونه که پیش از این متذکر شدیم، شار نوترونیهای حرارتی روی نمونه وقتی بیشینه است که چشمه به نمونه چسبیده باشد زیرا در این وضعیت شار نوترونیهای حرارتی روی نمونه عبارت از حاصل جمع شار نوترونیهای حرارتی چشمه و شار نوترونیهای حرارتی حاصل از پراکندگی کشسان نوترون با کاندکننده خواهد بود. از آنجا که میزان تولید پرتوهای گامای آتی حاصل از گیراندازی نوترونیهای کند در نمونه با افزایش شار این نوترونها بالا می‌رود، و با توجه به اینکه هر چه میزان شمارش پرتوهای گامای آتی بیشتر باشد زمان لازم برای اندازه‌گیری و تحلیل طیف کاهش می‌یابد، بهتر آن است که تا حد امکان چشمه به نمونه نزدیک باشد. از طرف دیگر، هر چه از نمونه دورتر شویم شدت پرتوهای گاما کاهش می‌یابد. هر چه آشکارساز به نمونه نزدیکتر باشد شدت پرتوهای گامای آتی حاصل از نمونه نیز بیشتر می‌شود که مناسب منظور ماست، اما اگر این امر مترادف با احاطه بیشتر آشکارساز با کاندکننده باشد، شدت پرتوهای گامای آتی حاصل از کاندکننده و مواد دیگر نیز افزایش می‌یابد که مناسب منظور ما نیست زیرا منجر به افزایش زمینه می‌شود. آنچه که مهم است، افزایش نسبت گاماهاى آتی حاصل از ازت به گاماهاى حاصل از کاندکننده است. با محاسبات مونت کارلو و تغییر مکان آشکارساز نسبت به نمونه نتیجه گرفتیم که بهترین حالت، نزدیکی آشکارساز به نمونه است و باید وضعیت بهینه‌ای را انتخاب کرد که تا حد امکان آشکارساز به نمونه و نمونه به چشمه نزدیکتر باشند.



شکل ۸. طیف انرژی پرتوهای گاما برای کاندکننده‌ی گرافیت.



شکل ۹. طیف انرژی پرتوهای گاما برای کاندکننده‌ی آب سنگین.

سنگین نشان می‌دهند، به این نتیجه می‌رسیم که آب سنگین بهترین کاندکننده است زیرا دارای کمترین اثر انباشت می‌باشد، اما به دلیل گرانی و دسترس ناپذیری آن از پارافین و گرافیت استفاده می‌کنیم.

۲.۲. انتخاب آشکارساز

گسترده‌ی طیف انرژی پرتوهای گامای آتی هر یک از عناصر موجود در نمونه و محیط، سبب می‌شود که قله‌های زیادی در طیف ظاهر شوند. از سوی دیگر، با توجه به انرژی بالای پرتوهای گامای آتی (۳ تا ۱۱ MeV)، علاوه بر قله اصلی هر پرتو گاما، قله‌های انرژی تک - فراری و دو - فراری نیز در طیف ظاهر می‌شوند. بنابراین، در روند طیف سنجی باید قدرت تفکیک آشکارسازها خیلی بالا باشد که بتوان این قله‌ها را از هم

هر کوری چشمه Am-Be در حدود $n/s \times 10^6 / 2$ تولید می‌کند، بسته به مقدار فعالیت چشمه و مدت زمان مناسب برای بهره برداری از آشکارساز، می‌توان فاصله چشمه تا آشکارساز را تنظیم کرد.

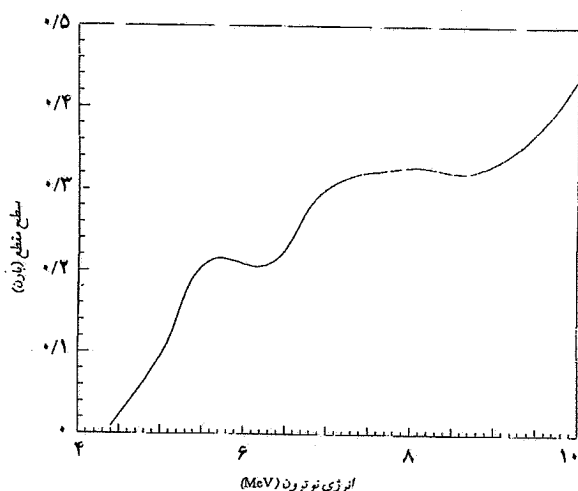
۵.۲. نقش چشمه

سطح مقطع اکثر عناصر با نوترون در انرژیهای پایین به صورت $\frac{1}{v}$ تغییر می‌کند و مقدار آن در انرژیهای بالا بسیار کم است. بنابراین، بیشتر پرتوهای گاما از گیراندازی نوترونهای حرارتی تولید می‌شوند. اگرچه نوترونهای سریع نیز می‌توانند جذب شوند ولی احتمال جذب نوترونهای حرارتی به مراتب بیشتر است. سطح مقطع جذب نوترون در ناحیه حرارتی به طور متوسط 10^3 تا 10^4 بار از سطح مقطع جذب برای نوترونهای سریع بیشتر است. بنابراین، هر چه متوسط انرژی چشمه نوترون پایین‌تر باشد شار نوترونهای حرارتی افزایش یافته، و به این ترتیب، بازدهی چشمه برای تولید پرتوهای گامای آبی ناشی از گیراندازی نوترونهای حرارتی افزایش خواهد یافت. چون چشمه‌های (α, n) ، مانند Am-Be، در مقایسه با چشمه‌های (f, n) مثل ^{252}Cf ، انرژی بالاتری دارند، لذا بازدهی کمتری برای تولید پرتوهای گامای آبی ناشی از گیراندازی نوترونهای حرارتی دارند ولی با توجه به انرژی متوسط MeV ۴-۴/۵، بازدهی آنها برای تولید پرتوهای گامای آبی ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون بالاست. نوترونهای سریع، با برخورد های کشسان و ناکشسان انرژی خود را از دست داده و کند می‌شوند. در پراکندگی ناکشسان، بخشی از انرژی نوترون صرف برانگیختگی هسته می‌شود و هسته هدف پس از برخورد، با گسیل یک یا چند پرتو گاما انرژی برانگیختگی خود را از دست می‌دهد. پراکندگی ناکشسان فقط در صورتی رخ می‌دهد که نوترون انرژی لازم برای برانگیختن هسته را داشته باشد. مقدار انرژی آستانه برای هسته‌های سبک، در مقایسه با هسته‌های سنگین بیشتر است. برای مثال انرژی اولین تراز برانگیخته کربن MeV ۴/۴۳ است. پرتوهای گامای ناشی از پراکندگی ناکشسان در فاصله زمانی بسیار کوتاهی پس از برخورد از هسته گسیل و جزء پرتوهای گامای آبی محسوب می‌شوند. چون در اغلب عناصر، سطح مقطع جذب نوترونهای حرارتی خیلی بیش از سطح مقطع پراکندگی ناکشسان با نوترونهای سریع است، اکثر قله‌های موجود در طیف، ناشی از جذب نوترونهای حرارتی هستند، اما عنصری مانند کربن دارای

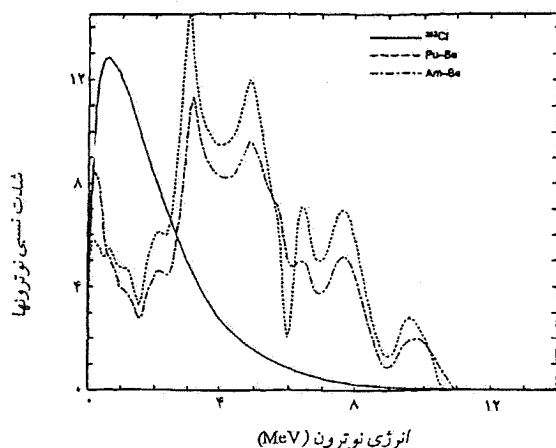
۴.۲. کاهش آسیب ناشی از تابش، و بهبود "زمینه" در آشکارساز در کاربست آشکارساز NaI برای جمع آوری طیف گاما، باید توجه داشت که عدم استفاده از حفاظ مناسب می‌تواند آثار مخربی بر روی طیف، و خود آشکارساز داشته باشد، زیرا نوترونهای رسیده به آشکارساز اولاً، باعث نقص در بلور شده و توان تفکیک آشکارساز را خراب می‌کنند [۳]، ثانیاً زمان مرده قدرت تفکیک آشکارساز را هم خراب می‌کند، لذا لازم است که حفاظ مناسبی روی آشکارساز قرار بگیرد، و فاصله حداقلی برای حفاظت آشکارساز از نوترونهایی که پس از برخورد با محیط و پراکندگی به آشکارساز می‌رسند رعایت شود. علاوه بر نوترون، پرتوهای گامای گسیل شده از چشمه نوترون نیز سبب بالا رفتن زمینه و افزایش زمان مرده دستگاه شمارش می‌شوند. بنابراین لازم است که تا حد ممکن از رسیدن این پرتوها به آشکارساز جلوگیری شود. ماده حفاظ باید چنان انتخاب شود که موجب کند شدن نوترونهای سریع و پراکندگی آنها به سمت نمونه شود همچنین در صورت جذب نوترون، پرتوهای گامای دیگری تولید نکند تا موجب افزایش زمینه و مشکل‌تر شدن تحلیل طیف پرتوهای گامای آبی گردد.

برای حفاظت آشکارساز از برخورد نوترونهای سریع حفاظی روی آشکارساز قرار می‌گیرد که جنس آن از مواد کندکننده و جاذب نوترون باشد. مواد جاذب نوترون نیز چنان اختیار می‌شوند که علاوه بر سطح مقطع جذب بالا برای گیراندازی نوترونهای کند منجر به تولید پرتوهای گامای پرانرژی نگردند. ترکیبات بور نظیر اسیدبوریک با توجه به سطح مقطع بالای واکنش $^{7}\text{Li}(n, \alpha)^{4}\text{He}$ و سطح مقطع پایین واکنش گیراندازی $^{10}\text{B}(n, \gamma)^{11}\text{B}$ ، ماده جاذب مناسبی برای این منظور است. البته، همراه با گسیل ذره آلفا از هسته مرکب، ممکن است پرتو گاما نیز از این مواد گسیل شود ولی از آنجا که انرژی پرتوهای گامای گسیل شده پایین است مشکلی در طیف نهایی ایجاد نمی‌کند، و فقط زمان مرده را اندکی بالا می‌برد. به عنوان مثال، پرتوهای گامای حاصل از واکنش $\text{B}(n, \alpha)\text{Li}$ دارای انرژی ۴۷۸ keV می‌باشند که با لایه نازکی از آلومینیم جذب می‌شوند. بنابراین، برای حفاظت آشکارسازها استوانه‌های سرباز مجوفی از اسیدبوریک به ضخامت ۱ سانتیمتر در لفافه‌هایی از آلومینیم به ضخامت ۲ میلیمتر ساخته و بر روی آنها قرار دادیم.

مقدار شار نوترونهای حرارتی و سریع در محل آشکارسازها به میزان فعالیت چشمه بستگی دارد، و با توجه به اینکه برخورد تقریباً 10^9 n/cm^2 موجب تخریب آشکارسازها می‌شود [۳] و



شکل ۱۰. سطح مقطع پراکندگی ناکشسان نوترون با کربن [۴].



شکل ۱۱. طیف انرژی چشمه کالیفرنیم - ۲۵۲ و چشمه های ایزوتوپی (α, n) [۵].

۱.۳. مدار آزمایش

اگر یک MCA و چند آشکارساز داشته باشیم به کمک یک چندراهی رابط حافظه MCA را به دو یا سه یا چند قسمت تقسیم می‌کنیم و هر کدام را به یک آشکارساز اختصاص می‌دهیم. مدار آزمایش در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.

۲.۳. مدرج سازی سیستم آشکارساز

در مدرج کردن آشکارسازها، از چشمه های کم انرژی ^{60}Co با دو گامای 1.17 MeV و 1.33 MeV و ^{137}Cs با گامای 0.664 MeV و همچنین از قله های گامای هیدروژن با انرژی 2.223 MeV و کربن با انرژی 4.43 MeV ، و در صورت

سطح مقطع جذب پایینی است و لذا گامای آنی ناشی از جذب نوترون در کربن کم است، و از این رو کندکننده گرافیت در مقایسه با پارافین یا آب، برای کاهش اثرات زمینه مناسبتر است. از سوی دیگر، میزان حساسیت آشکارسازی پرتوهای گامای آنی ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون کاملاً به انرژی نوترونهای فرودی بستگی دارد (شکل ۱۰) [۴]. هر چه انرژی نوترون افزایش یابد پرتوهای گامای آنی حاصل از پراکندگی ناکشسان نوترونهای سریع توسط کربن نیز زیادتر می‌شوند. با افزایش انرژی نوترون، قله های موجود در طیف بزرگتر شده و میزان شمارش ناشی از زمینه نیز به این ترتیب بیشتر، و قدرت تفکیک آشکارساز کمتر و زمان مرده آن بیشتر می‌شود و بازده آشکارساز کاهش می‌یابد.

چشمه ^{252}Cf ، با توجه به میانگین انرژی نوترون پایینتر نسبت به چشمه های (α, n) ، برای تولید پرتوهای گامای آنی ناشی از گیراندازی نوترون در نمونه مناسبتر است، و تولید پرتوهای گامای آنی ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون از کربن نیز در آن کمتر است. به این ترتیب، به دو دلیل زمان مرده کاهش یافته و بازده بالاتر می‌رود، و چشمه های شکافت خودبخودی مانند ^{252}Cf عملاً دارای بازده بالاتری برای آشکارسازی قله های ازت نیستند. طیفهای انرژی سه چشمه ^{252}Cf و Pu-Be و Am-Be در شکل ۱۱ رسم شده اند [۵].

۳. اقدامات تجربی

بر اساس محاسبات انجام شده، نمونه را وسط کاواکی به ابعاد $30 \times 30 \times 30$ (سانتیمتر مکعب)، که اطراف آن را از هر سو 30 سانتیمتر گرافیت فرا گرفته است، قرار می‌دهیم، آشکارسازها، که همه دارای حفاظ اسیدبوریک هستند، به گونه ای داخل تونلهای منتهی به کاواک قرار می‌گیرند که وجه جلو هر یک از آنها مماس بر لبه کاواک باشد. تعداد آشکارسازها سه تا، نوع آنها سوسوزن NaI(Tl) و ابعاد دو تای آنها 3×3 ، و یکی از آنها 5×5 است که به طور متقارن نسبت به نمونه قرار می‌گیرند. از بالای مجموعه گرافیت، تونلی منتهی به کاواک تعبیه شده است که بتوان چشمه را روی نمونه قرار داد. مطابق شکل ۱۲ خروجی هر آشکارساز، پس از تقویت، به یک ADC، و خروجی ADCها به MCA داده می‌شوند تا بتوان به طور همزمان طیفهای انرژی گامای هر آشکارساز را در MCA ثبت کرد. هر ADC زمان مرده هر آشکارساز را نیز نشان می‌دهد. ابتدا دستگاه آشکارسازی را با مراحل زیر آماده کردیم.

اختلاف بالاتر بودن کارایی نوری سلول $3''$ از سلول $5''$ است.

۴.۳. انطباق طیفها، و رفع مشکلات جمع آوری داده‌ها

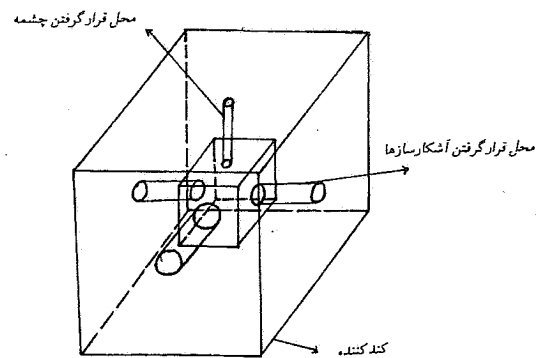
با تغییر بهره تقویت تقویت کننده‌ها سعی شد هر سه طیف انرژی آشکارسازها در MCA تا حد مطلوبی بر هم منطبق شوند. پس از آماده سازی دستگاه آشکارسازی و قبل از شروع آزمایش، دستگاه را به مدت ۲ ساعت روشن کردیم تا افت خیزهای قله‌های مربوط به طیفها در اثر تغییر دمای دستگاه الکترونیک به حداقل برسد. آزمایش را با یک کیلوگرم اوره (CH_4N_2O) که حاوی $\frac{28}{60}$ یا حدود ۴۶٪ یعنی ۴۶۰ گرم ازت است شروع کردیم. در ابتدا مشاهده شد که زمان مرده آشکارسازها بالاست: زمان مرده آشکارسازهای $5''$ و $3''$ به ترتیب حدود ۹۰٪ و ۵۰٪ بود. قدرت تفکیک آشکارسازها نیز نامطلوب بود، به طوری که سه قله تمام - انرژی، تک - فراری و دو - فراری مربوط به گامای $MeV \ 4/43$ کربن به صورت یک قله پهن ظاهر می‌شدند، و در ناحیه ازت یعنی از انرژی ۹ تا $11 \ MeV$ نیز هیچ قله‌ای مشاهده نمی‌شد (شکل ۱۴).

مشکل دیگر، فعال شدن آشکارسازها بود. ۱ ساعت پس از شروع آزمایش، زمان مرده آشکارسازها بالاتر رفت و در مورد آشکارسازهای $3''$ به ۸۰٪ رسید. علت این بود که با وجود حضور حفاظ اسیدبوریک، به علت شار بالای نوترون آشکارسازها فعال می‌شدند. لذا نتیجه گرفتیم که، اولاً، باید کاری کرد که اثر انباشت تپها کاهش یابد تا زمان مرده کم شود و ثانیاً مکان چشمه و آشکارسازها را باید به گونه‌ای تنظیم کرد که آشکارسازها فعال نشوند.

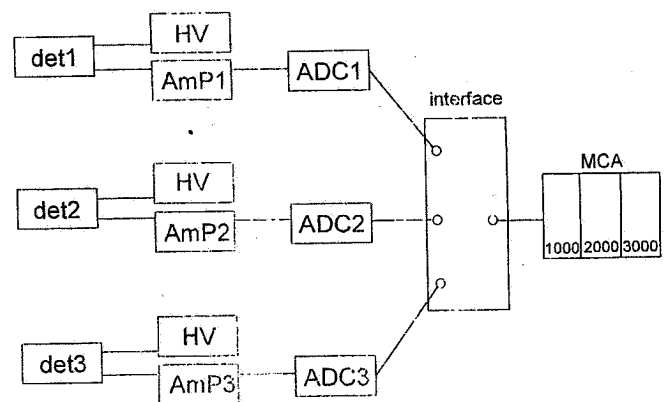
۵.۳. حذف گاما‌های مزاحم

۵.۳. الف. گاما‌های کندکننده

اولین اقدام برای کاهش اثر انباشت تپها، کاهش زمینه است. یکی از مسائلی که تحلیل طیف پرتوهای گامای آبی را با مشکل مواجه می‌سازد بالا بودن سطح زمینه حاصل از پراکندگی کامپتون است. این مسئله، که موجب بالا رفتن میزان شمارش می‌شود، هم قدرت تفکیک آشکارساز را کم می‌کند و بر شناسایی قله‌های فوتوالکتریک اثر می‌گذارد و هم زمان مرده آشکارساز را بالا می‌برد. بنابراین باید حفاظی برای آشکارساز گاما پیش بینی کرد که پرتوهای تداخل کننده با طیف اصلی را تا حد مطلوبی کاهش دهد. هدف اصلی استتار آشکارسازها، کم کردن تابش زمینه، بخصوص در نواحی طیف ازت است. زمینه



شکل ۱۲. طرحواره دستگاه آزمایش.



شکل ۱۳. مدار آزمایش.

لزم، از تپ ساز استفاده می‌کنیم، و با تنظیم عبور از صفر ADC، عرض از مبدا خط انرژی - کانال را تا حد امکان به صفر نزدیک می‌کنیم.

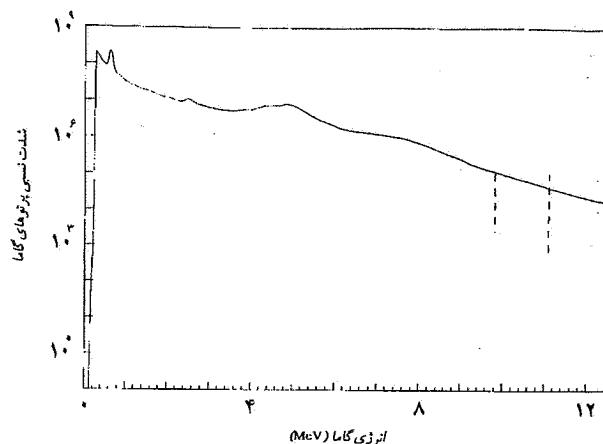
۳.۳. جلوگیری از اشباع تپها

یک مشکل عملی که در مدرج سازی دستگاه بروز می‌کند، جابه جایی ناحیه ازت به سمت انرژیهای کمتر، به اندازه $1 \ MeV$ است. این جابه جایی ناشی از اشباع شدن تپهای مربوط به گاما‌های پرانرژی است، و نتیجه آن برهم خوردن رابطه خطی بین شماره کانال و انرژی فوتون در انرژیهای بالای گاما است. این اثر معلول اشباع جریان در PMT است، و با کاهش اختلاف پتانسیل منبع تغذیه می‌توان از آن جلوگیری کرد. با این همه، این کار به افت قدرت تفکیک آشکارسازها می‌انجامد. لذا باید شرایط بهینه‌ای را یافت که "اشباع شدگی" حداقل، و قدرت تفکیک مطلوب باشد. برای آشکارسازهای $5''$ و $3''$ اختلاف پتانسیل مناسب به ترتیب $+750$ و $+700$ ولت است. علت این

۵ MeV هستند، یعنی بیشترین نوترونها، هسته کربن را در حالت برانگیخته رها می‌کنند و کربن برانگیخته با آزادسازی حدود ۶ تا ۵ MeV در قالب گسیل گاما، به حالت پایه می‌رسد. بنابراین، گاماهاى اصلی طیف Am-Be که تا چند MeV ادامه دارند از واپاشی $^{12}\text{C}^*$ حاصل می‌شوند و دارای انرژی بالا و فراوانی زیادی هستند. پرتوهای گامای گسیل شده از چشمه در صورت رسیدن به آشکارساز موجب بالا رفتن میزان شمارش و افزایش زمان مرده آشکارساز می‌شوند، لذا برای جلوگیری از این امر، چشمه Am-Be را با غلافی سربی به ضخامت ۳ cm پوشانیدیم. این امر باعث شد که آهنگ شمارش و اثر انباشت گاماها کم، و قدرت تفکیک آشکارسازها برای چشمه سزیم از ۸٪ به ۷٪ برسد. با این پیکربندی چشمه، و پوشش سربی آشکارسازها و سطح داخلی کاواک، زمان مرده دستگاه حدود ۲۰٪ کاهش یافت، اما باز هم به حد مطلوب نرسید. برای رسیدن به وضعیت بهینه، فاصله چشمه تا آشکارساز را زیاد کردیم، و با تغییر مکان آشکارساز و چشمه به این نتیجه رسیدیم که بهترین وضعیت حالتی است که چشمه مماس بر لبه بالایی کاواک و نمونه در مرکز کاواک قرار بگیرد، و آشکارسازها نیز ۳۰ سانتیمتر از لبه کاواک فاصله بگیرند، یعنی آشکارسازها خارج از بدنه گرافیت واقع شوند. با افزودن یک لایه ۱ سانتیمتری سرب به جداره داخلی تونلهای منتهی به حفره، سطح زیر منحنی ناحیه ازت ۱۲٪ افزایش یافت. در این وضعیت، طیفهای حاصل از آشکارسازهای "۳" خیلی بهبود یافتند و قلههای مربوط به گرافیت با قدرت تفکیک بسیار خوب ظاهر شدند و قلههای مربوط به ازت نیز در ناحیه ازت شکل گرفتند (شکل ۱۵). اما باز هم قدرت تفکیک آشکارساز "۵" مطلوب نبود، لذا به جای آن از آشکارساز "۳" استفاده کردیم.

۴. انجام آزمایش، داده برداری، و تحلیل دادهها

بلوکهای بزرگ گرافیت مورد نیاز برای کاندسازی نوترونهاى سریع از کارخانه تهیه زغالهای صنعتی در شهرستان قم خریداری و به قطعات کوچک برش داده شدند. برش قطعات به گونه‌ای بود که ضخامت کندکننده اطراف کاواک از همه طرف ۳۰ cm بشود. پس از آماده سازی دستگاه آزمایش و ایجاد همه شرایط بهینه، طیف انرژی هر سه آشکارساز برای مدت ۴۰ ساعت جمع آوری گردید. آزمایش، سه مرتبه در شرایط یکسان، به ازای ۱ کیلوگرم، ۲ کیلوگرم، و ۳ کیلوگرم اوره یا، به ترتیب، ۴۶۰، ۹۲۰، و ۱۳۸۰ گرم ازت انجام شد و هر بار طیف انرژی

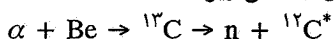


شکل ۱۴. طیف انرژی پرتوهای گاما برای ۳۰ cm گرافیت.

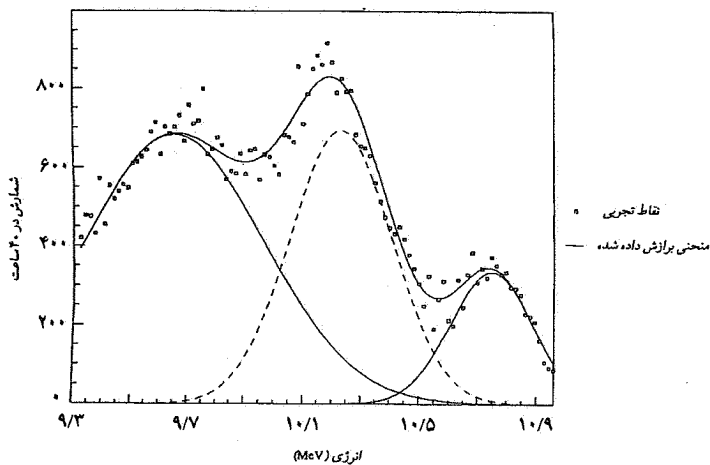
ناحیه ازت اغلب ناشی از انباشت انرژی دو یا چند گاما است که در بازه زمانی فرایش هر تپ به آشکارساز می‌رسند. به عنوان مثال، از انباشت دو گامای $4/43 \text{ MeV}$ کربن در آشکارساز، به طوری که برای آشکارساز، از نظر زمانی، قابل تفکیک نباشند، یک تپ در نزدیکی ناحیه ازت ثبت می‌شود. این حفاظ معمولاً از جنس عناصر سنگین نظیر سرب و بیسموت است. در این آزمایش، برای کاهش زمینه، سطح جانبی آشکارسازها را با ۱ سانتیمتر سرب، و جداره داخلی تونلها و سطح داخلی کاواک را با ۵/۰ سانتیمتر سرب پوشانیدیم، اما بین وجه جلو آشکارسازها و نمونه درون کاواک هیچ مانعی وجود نداشت.

۳.۵. ب. گاماهاى چشمه

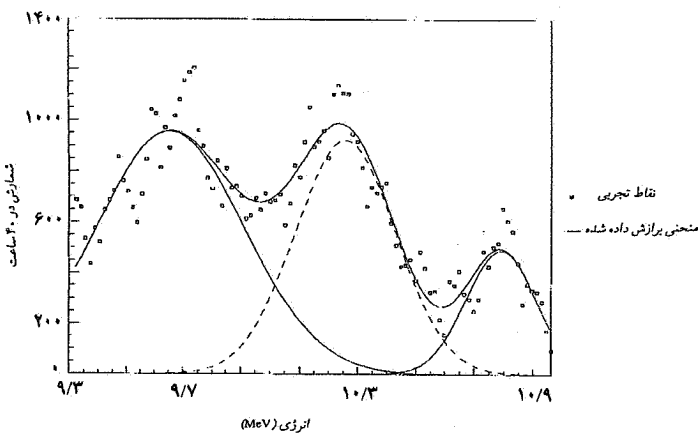
عامل دیگری که در افزایش پرتوهای زمینه و اثر انباشت بسیار مؤثر است، پرتوهای گامای چشمه Am-Be است. این پرتوها، ناشی از گیراندازی نوترون توسط بریلیم و سازه‌های چشمه، پرتوهای گسیل شده از آمرسیم، و پرتوهای حاصل از واکنش $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{13}\text{C}$ هستند. انرژی پرتوهای گامای ناشی از عنصر ^{241}Am پایین، اما شدت آنها بالاست و اثر انباشت پرتوها را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، براساس طیف انرژی نوترونهاى حاصل از چشمه Am-Be، شکل ۱۱، انرژی نوترونها از ۰ تا ۱۰ MeV توزیع شده‌اند. طبق واکنش زیر



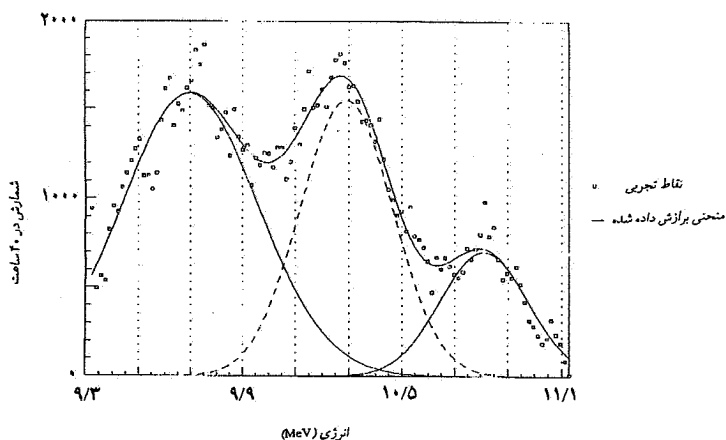
نوترونهاى با انرژی ۱۰ MeV و فراوانی کم، حاصل واکنشی هستند که در آن کربن در حالت پایه رها شده است و طبق طیف انرژی، بیشترین نوترونهاى خروجی از چشمه دارای انرژی ۴ تا



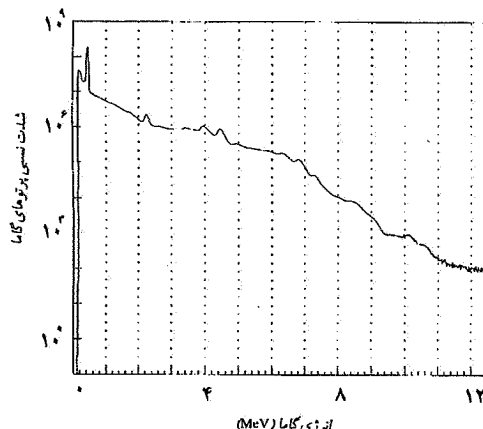
شکل ۱۶. طیف پرتوهای گاما در ناحیه ازت (مجموع برای ۴۶۰ گرم ازت).



شکل ۱۷. طیف پرتوهای گاما در ناحیه ازت (مجموع برای ۹۲۰ گرم ازت).



شکل ۱۸. طیف پرتوهای گاما در ناحیه ازت (مجموع برای ۱۳۵۰ گرم ازت).



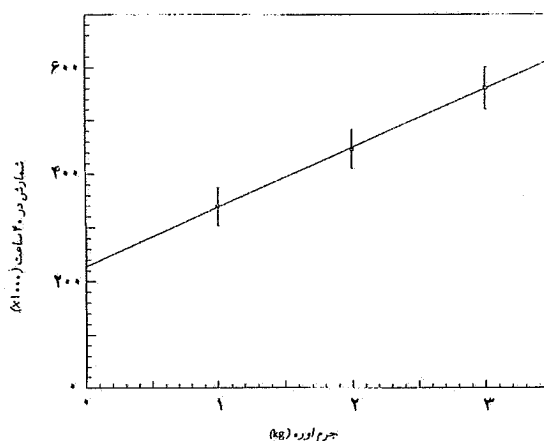
شکل ۱۵. طیف انرژی پرتوهای گاما برای ۳۰ cm گرافیت.

پرتوهای گامای مربوط به هر سه آشکارساز توسط سه ADC در حافظه MCA ضبط گردید. پس از آن به مدت ۴۰ ساعت طیف انرژی زمینه را، بدون حضور ازت در حفره، برای سه آشکارساز جمع‌آوری نمودیم. سپس طیف انرژی مربوط به زمینه دستگاه را که توسط هر یک از آشکارسازها جمع‌آوری شده بود، از طیف انرژی هر آشکارساز، به ازای هر یک از سه مقدار ازت کم کردیم. برای هر یک از مقدارهای فوق، ناحیه مربوط به ازت هر یک از آشکارسازها را با هم جمع کردیم و یک منحنی سه گاوسی بر هر یک از طیفهای انرژی این ناحیه برازش دادیم. شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸، به ترتیب، برای ۴۶۰، ۹۲۰ و ۱۳۸۰ گرم ازت رسم شده‌اند. با محاسبه سطح زیر منحنی هر یک از حالت‌های فوق برحسب مقدار ازت یا اوره، خطی به دست آوردیم. در شکل ۱۹ حاصل جمع شمارش ناحیه ازت هر سه آشکارساز برای مدت ۴۰ ساعت رسم شده است. با توجه به نمودار، مشاهده می‌کنیم که شمارش خالص ناحیه ازت برحسب مقدار اوره یا ازت، به طور خطی زیاد می‌شود، اما این خط دارای عرض از مبدا است یعنی با دو برابر شدن مقدار ازت، شمارش خالص ناحیه ازت دو برابر نمی‌شود. علت این امر آن است که برای کاهش اثر انباشت پرتوها، آشکارسازها بیرون بدنه گرافیت قرار دارند و آشکارسازها فقط بخشی از نمونه‌ها را، که در امتداد تونلها، درون کاواک واقع‌اند، می‌بینند. جداره داخلی کاواک به جز دهانه تونلها، دارای پوشش سربی است. با افزایش مقدار ازت، آشکارسازها کل نمونه را نمی‌بینند و گامای ازت در رسیدن به هر آشکارساز در زاویه فضایی کوچکتري قرار می‌گیرد. علاوه بر این، پرتوهای گاما باید ضخامت ۱ سانتیمتری سرب، و بیش از ۳۰ سانتیمتری گرافیت را نیز طی

۲" و ۳" مناسب بود. با ایجاد همه شرایط مانند گذشته این بار نیز طیف انرژی پرتوهای گامای هر سه آشکارساز را به مدت ۴۰ ساعت به ازای ۴۶۰، ۹۲۰، و ۱۳۸۰ گرم ازت جمع آوری کردیم. سپس برای هر یک از مقادیرهای فوق، ناحیه مربوط به ازت هر طیف را پس از کاستن زمینه، با هم جمع کردیم. سطح زیر منحنی هر یک از حالت‌های فوق به ازای قدرت ازت در جدول زیر درج شده است.

تعداد پرتوهای گامای ناحیه ازت	مقدار ازت (گرم)
۷۵۰۲۱	۴۶۰
۱۰۰۸۴۱	۹۲۰
۱۴۱۰۶۱	۱۳۸۰

همان گونه که مشاهده می‌شود، در این وضعیت نیز با دو برابر شدن ازت، شمارش ناحیه ازت دو برابر نمی‌شود اما ارتباط مقدار ازت و شمارش ناحیه ازت خطی است. با مقایسه مقادیر این جدول با مقادیر شکل ۱۹ به این نتیجه می‌رسیم که شمارش ناحیه ازت تغییر چندانی نمی‌کند و، از این نظر، استفاده از گرافیت یا پارافین به عنوان کندکننده تفاوتی ندارد. در وضعیت استفاده از کندکننده پارافین، نسبت به گرافیت، آشکارسازها حدود ۱۰ cm به نمونه نزدیکتراند و انتظار می‌رود با استفاده از پارافین شمارش ناحیه ازت بیشتر شود. اما تجربه تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. بنابراین به این نتیجه می‌رسیم که اگر بتوان اثر زمینه بر طیف انرژی پرتوهای گاما را کاهش داد و آشکارسازها را به نمونه نزدیکتر نمود، آنگاه کندکننده گرافیت از کندکننده پارافین مناسبتر خواهد شد.



شکل ۱۹. منحنی شمارش کل ناحیه ازت برحسب جرم اوره.

کنند تا به پنجره آشکارساز برسند، و تعدادی از گاماهای ازت در راه رسیدن به آشکارساز جذب می‌شوند. لذا نباید انتظار داشت که با دو برابر شدن ازت، شمارش ناحیه ازت نیز دو برابر شود. آزمایش، با کندکننده پارافین نیز تکرار شد. همانگونه که قبلاً بیان شد، ضخامت مطلوب در مورد پارافیت ۲۰ سانتیمتر است. جداره داخلی کاواک و تونلها سرب پوش، و دور آشکارسازها نیز علاوه بر اسید بوریک، از یک پوشش سری بر خوردار است. نمونه را وسط کاواک قرار دادیم و با تغییر محل آشکارسازها و چشمه، شرایط بهینه را به دست آوردیم. پیکربندی دستگاه، مشابه وضعیت با کندکننده گرافیت بود، یعنی آشکارسازها خارج از بدنه پارافین، و وجه جلو آشکارسازها، مماس بر لبه تونل و چشمه، مماس بر لبه کاواک قرار گرفت. در این وضعیت، قدرت تفکیک آشکارساز ۵" بد و قدرت تفکیک آشکارسازهای

مراجع

John Willy & Sons, Inc., (1989).
 4. JEF-PC Version 2.0 OECD Nuclear Energy Agency.
 5. E A Lorch, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes* 24, 585 (1973).

1. K W Habiger, J R Clifford, R B Miller, Explosives detection with energetic photons, *Nucl. Instr. Meth.* B56/57, (1991).
 2. J F Briesmeister, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A (1993).
 3. G F Knoll, Radiation detection and measurement,