

تعیین غلظت ^7Be موجود در هوای تهران توسط نمونه بردار هوای حجم بالا و اندازه گیری با آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص

مهدی تورنگ^{۱*}، اصغر حدادی^۱، میترا اطهری علاف^۲ و داریوش سرداری^۱

^۱گروه مهندسی پرتوپزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

^۲گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

*تهران، انتهای بزرگراه شهید ستاری، میدان دانشگاه، بلوار شهدای حصارک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵ و ۷۷۵/۱۴۵۱۵

پست الکترونیکی: tourang_mahdi23@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق نمونه‌های هوا توسط نمونه بردار اسنوایت با آهنگ شار هوای بین ۳۰۰ مترمکعب بر ساعت تا ۹۰۰ مترمکعب بر ساعت به مدت حدود ۲۴ ساعت برای هر نمونه جمع‌آوری شد. این نمونه‌ها در بازه زمانی ۲/۵ ماهه (آبان ماه ۱۳۹۸ تا دی ماه ۱۳۹۸) گرفته شد و پس از واپاشی رادیونوکلئیدهای کوتاه‌عمر و آماده‌سازی به شکل دیسک، با طیف‌نگاری گاما با استفاده از دو آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص با بازدهی نسبی حدود ۴۰ و ۷۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه استاندارد فیلتر هوای حجیم با روشی جدید و ابتکاری ساخته شد که رادیونوکلئیدها در آن به صورت متقارن پخش شده و منحنی کالیبراسیون بازدهی برای دو آشکارساز به دست آمد. در روش معرفی شده برای ساخت نمونه استاندارد، مشکل عدم تقارن و همگنی پخش رادیونوکلئیدها در نمونه استاندارد فیلتر هوای حجیم برطرف شده است. در نمونه‌های جمع‌آوری شده، رادیونوکلئید ^7Be مورد ارزیابی قرار گرفت. میانگین غلظت ^7Be مقدار $0/46 \pm 3/80$ میلی‌بکرل بر مترمکعب بوده است.

کلیدواژگان: کالیبراسیون بازدهی، آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص، فیلتر هوای حجم بالا، نمونه بردار اسنوایت، ^7Be .

۱. مقدمه

تعیین درست و دقیق اکتیویته برخی رادیونوکلئیدهای موجود در محیط برای بررسی خطر پرتوی خیلی مهم است [۱ و ۲]. هوای اطراف ما شامل توزیعی از رادیونوکلئیدهای مختلف است. رادیونوکلئیدهای تولید شده در اتمسفر از طریق اندرکنش‌های کیهانی و یا تولید شده در سطح زمین به صورت طبیعی و یا فعالیت‌های مصنوعی ساخت بشر به وجود می‌آید. وقتی رادیونوکلئیدها به اتمسفر می‌رسند، به ذرات آيروسول^۱ می‌چسبند و گاهی از منطقه‌ای دیگر جابه‌جا می‌شوند [۲]. ذرات آيروسول موجود در اتمسفر به شکل ذرات جامد یا مایع هستند. محدوده اندازه‌ی ذرات از کسری از میکرون تا چندصد میکرون است. آيروسول‌های اتمسفری مخلوطی از گازها و ذرات هستند [۳].

^۱ Aerosol

برای اطمینان از صحت عملکرد آزمایشگاه‌ها در حوادث رآکتور، معمولاً یک نهاد بالادستی هر ساله آزمون‌های مهارت برگزار می‌کند. برای ارزیابی برخی آزمایشگاه‌ها، در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ میلادی نمونه‌های مصنوعی ساخته شد و در سال ۲۰۱۱ میلادی نمونه واقعی بعد از حادثه فوکوشیما تهیه شده و در اختیار آزمایشگاه‌ها قرار داده شد [۷].

ناکاشیما و همکاران [۷] آزمون برای سنجش مهارت ۱۶ ایستگاه اندازه‌گیری رادیونوکلئیدهای موجود در نمونه‌های هوا، طراحی کردند. هدف از این آزمون سنجش توان آزمایشگاه‌های مختلف در شناسایی درست نوع رادیونوکلئیدهای موجود در نمونه هوا و اندازه‌گیری دقیق اکتیویته هر رادیونوکلئید بوده است. معمولاً در این ایستگاه‌ها، نمونه‌بردار هوا با آهنگ شمارش ۵۰۰ مترمکعب بر ساعت برای حدود ۲۴ ساعت نمونه‌برداری انجام می‌دهد. پس از آن نمونه فشرده شده و به هندسه‌ی مناسب برای شمارش توسط آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص درمی‌آید. برای اندازه‌گیری دقیق این رادیونوکلئیدها نمونه استاندارد در همان پیکربندی مورد نیاز است. پس از ساخت نمونه استاندارد و تست ناهمگنی آن متوجه شدند که رادیونوکلئیدهای موجود روی نمونه استاندارد به صورت متقارن توزیع نشده است [۷].

به‌طور کلی رادیونوکلئیدهای ^3H ، ^7Be ، ^{10}Be ، ^{14}C ، ^{22}Na ، ^{26}Al ، ^{32}Si ، ^{32}P ، ^{33}P ، ^{35}S ، ^{36}Cl ، ^{37}Ar ، ^{39}Ar و ^{81}Kr در اتمسفر تولید می‌شوند. رادیونوکلئیدهای ^3H ، ^{10}Be ، ^{14}C ، ^{32}Si ، ^{32}P ، ^{33}P ، ^{35}S و ^{39}Ar بتازای خالص هستند و توسط آشکارساز HPGe قابل شمارش و طیف‌نگاری نیستند. رادیونوکلئیدهای ^7Be ، ^{22}Na و ^{26}Al پرتوهای گامای قابل توجهی دارند و توسط آشکارساز HPGe قابل آشکارسازی هستند. رادیونوکلئید ^7Be به‌راحتی در همه نمونه‌های هوا مشاهده می‌شود؛ البته مقدار اکتیویته این رادیونوکلئید در صبح و عصر و مقادیر مختلف دما و رطوبت هوا و زمان‌های مختلف

از جمله رادیونوکلئیدهای ^{210}Pb و ^{22}Na ، ^7Be ، ^{40}K طبیعی موجود در هوا هستند [۴]. در برخی مقالات اشاره شده که رادیونوکلئیدهای طبیعی ^7Be و ^{212}Pb در نمونه‌های هوا وجود دارند. در اتمسفر رادیونوکلئیدهای متنوعی وجود دارند. برخی رادیونوکلئیدها مانند ^7Be منشأ کیهانی دارد و بر اثر متلاشی شدن هسته‌های نیتروژن و اکسیژن با برخورد پرتوهای کیهانی تولید می‌شود و برخی رادیونوکلئیدها مانند ^{40}K منشأ زمینی دارند [۲].

تشخیص رادیونوکلئیدهای طبیعی و مصنوعی از نظر بررسی حوادث هسته‌ای خیلی اهمیت دارد. در حوادث رآکتوری، پاره‌های شکافت در هوا پخش شده و تا کیلومترها دورتر قابل شناسایی هستند. در این نوع حوادث معمولاً رادیویزوتوپ‌های ^{131}I ، ^{137}Cs و ^{134}Cs از نظر تخمین اثرات زیست‌محیطی بیشتر مورد علاقه هستند.

پس از حادثه فوکوشیما، رادیونوکلئیدهای موجود در هوا در نقاط مختلف جهان آشکارسازی شد. به‌عنوان مثال بعد از حادثه رآکتور فوکوشیما رادیونوکلئیدهای ^{137}Cs و ^{134}Cs در عربستان آشکارسازی شد. از نسبت این دو رادیونوکلئید می‌توان عمر سوخت رآکتور حادثه‌دیده را تخمین زد [۵]. پس از حادثه فوکوشیما ذرات رادیواکتیو معلق در هوا، در فنلاند آشکارسازی شد. اولین رادیونوکلئیدی که آشکارسازی شد، ^{131}I بود که حدود ۸ تا ۹ روز پس از حادثه مشاهده شد. ۲ تا ۳ روز پس از مشاهده ^{131}I ، رادیونوکلئیدهای ^{137}Cs و ^{134}Cs مشاهده شدند. نسبت ^{134}Cs به ^{137}Cs مقدار ۰/۹۹ به‌دست آمد که بیانگر مقدار برن آپ ۳۰ مگاوات در روز به‌ازای یک تن سوخت در رآکتور فوکوشیما بوده است [۶]. برای تخمین درست و دقیق رادیونوکلئیدهای موجود در هوا که در حوادث ممکن است خطر پرتوی ایجاد کنند، باید فرآیند (متدولوژی) اندازه‌گیری تأیید شود تا بتوان به نتایج اندازه‌گیری‌ها اطمینان داشت [۱].

سال تفاوت می‌کند. مقدار تولید ^{22}Na و ^{26}Al در اتمسفر بسیار کم است و علی‌رغم این‌که پرتوی گامای خوبی برای آشکارسازی دارد، به دلیل اکتیویته بسیار کم آن خیلی به‌سختی و با تکنیک‌های پیشرفته هم‌فرودی باید آشکارسازی شود.

رادیونوکلئیدهای ^{36}Cl ، ^{37}Ar و ^{81}Kr پرتوهای گامای مناسبی برای آشکارسازی گاما ندارند و این نکته را نیز باید در نظر داشت که از فیلتر کاغذی برای گیراندازی و آشکارسازی ذرات آبروسل موجود در هوا می‌توان استفاده کرد. برای گیراندازی گازهای معلق در هوا مانند ^{37}Ar و ^{81}Kr باید از ذغال فعال استفاده کرد که مورد بحث در این پژوهش نیست.

فیلتر درون یک کاست^۲ از جنس آلومینیوم قرار گرفته و پس از آن داخل دستگاه نمونه‌بردار هوا قرار داده شد. جهت استفاده از فیلتر و کاست آن ابتدا کاست توسط الکل اتانول تمیز شد تا تداخل آلودگی بین نمونه‌ها صورت نگیرد. بعد از اتمام نمونه‌برداری، فیلترها با استفاده از تکنیک چندضلعی تا شده و سپس با استفاده از دستگاه پرس در سایز مورد نظر قالب زده شد. پس از تا کردن نمونه از دستگاه پرس جهت فشرده‌سازی نمونه‌ها استفاده شد. نمونه‌های نهایی که قرار است روبروی آشکارساز قرار بگیرد، به شکل استوانه‌ای به قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶ میلی‌متر آماده‌سازی شد.

در این تحقیق نمونه استاندارد فیلتر هوای حجیم با روشی جدید و ابتکاری ساخته شد که رادیونوکلئیدها در آن به‌صورت متقارن پخش شده‌اند. نمونه‌های فیلتر هوای حجیم در بازه زمانی ۲/۵ ماهه با نمونه‌برداری اسنوایت^۱ گرفته شد و این نمونه‌ها با طیف‌نگاری گاما مورد ارزیابی قرار گرفت. در نمونه‌های گرفته شده، رادیونوکلئید ^7Be مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲.۲. چیدمان آشکارسازی

وقتی فیلترها در دستگاه پرس قرار داده شد، به شکل دیسکی در می‌آید تا بتوان آن را روبروی آشکارساز قرار داده و مورد طیف‌نگاری و آنالیز قرار گیرد (شکل ۱).



شکل (۱): فیلتر نمونه‌برداری شده قبل از قراردادن روبروی آشکارساز.

برای طیف‌نگاری از فیلترها، از دو آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص با بازدهی نسبی ۷۰ درصد با چیدمان الکترونیک دیجیتال (آشکارساز شماره ۱) و بازدهی نسبی ۴۰ درصد با چیدمان الکترونیک آنالوگ (آشکارساز شماره ۲) استفاده شد.

۲. چیدمان آزمایش و روش کار

۱.۲. نمونه‌برداری و نمونه‌سازی هوا

نمونه‌برداری اسنوایت مدل JL-900 دستگاهی است که به‌منظور پایش غیر برخط مواد رادیواکتیو موجود در هوا توسط کشور فنلاند توسعه داده شده است. این سیستم قابل استفاده در هوای آزاد، به‌صورت متوالی و طولانی‌مدت و در شرایط سخت است. یکی از قابلیت‌های این سیستم، مقدار زیادی نیروی ذخیره برای ثابت نگه‌داشتن آهنگ شار هوا است حتی برای وقتی که فیلتر پر شده باشد. این نمونه‌برداری قابلیت نمونه‌برداری هوا با آهنگ شار ۳۰۰ تا ۹۰۰ مترمکعب بر

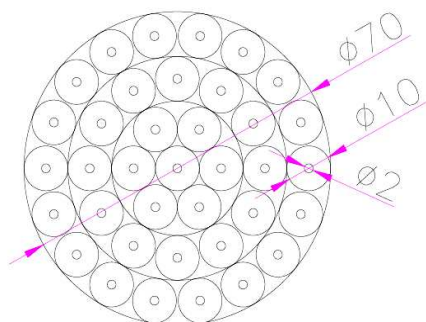
^۲ cassette

^۱ Snow white

۳.۲. ساخت نمونه استاندارد

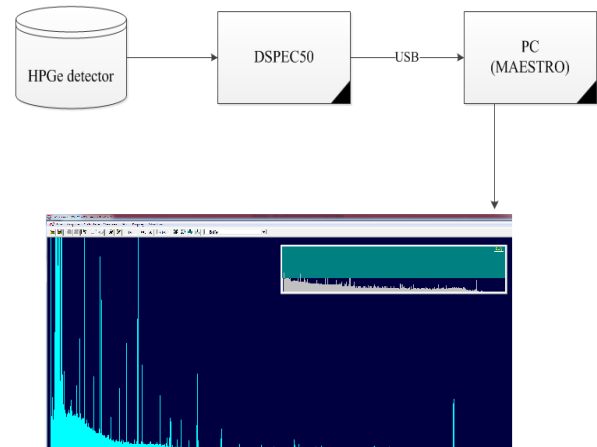
برای تعیین رادیواکتیویته رادیونوکلئیدها در هر نمونه‌ای، بایستی اطلاعات بازدهی مطلق هر قله‌ی انرژی به‌درستی برآورد شود. برای این کار معمولاً از چشمه‌های مخلوط رادیونوکلئیدهای گاما استفاده می‌شود و نمونه استاندارد در همان پیکربندی^۲ و هندسه^۳ نمونه آزمون ساخته می‌شود. پس از اندازه‌گیری نمونه آزمون، تابع ریاضی مناسبی برای برازش داده‌های اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شد تا مقدار بازدهی در انرژی رادیونوکلئیدهای مورد نظر در نمونه آزمون مشخص شود [۸].

برای ساخت نمونه استاندارد، مقدار مشخصی از محلول رادیواکتیو مخلوط رادیونوکلئیدهای گاما با اکتیویته مشخص با میکروپیپت بر صفحه فیلتر علامت‌گذاری شده تزریق و زیر نور مادون قرمز خشک شد. برای یکنواختی توزیع رادیونوکلئیدها روی فیلتر، یک نقطه به‌عنوان نقطه مرکزی در وسط فیلتر انتخاب شد و نقاط دیگر به‌صورت متقارن دور نقطه وسط در سطح فیلتر در نظر گرفته شد (شکل ۴). پس از ساخت نمونه استاندارد فیلتر، با طیف‌نگاری از چشمه استاندارد ساخته شده، میزان بازدهی آشکارساز برای انرژی‌های موجود در طیف نمونه آزمون برآورد گردید.



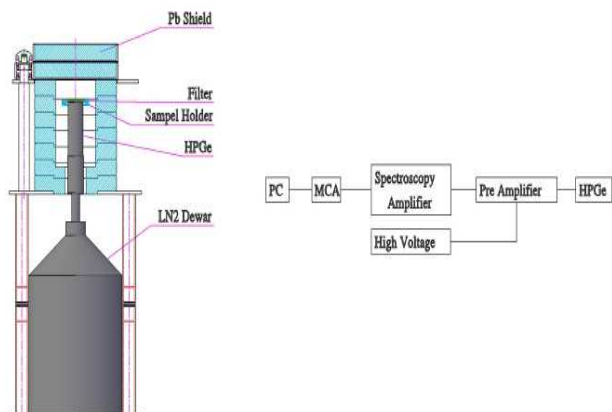
شکل (۴): طرح در نظر گرفته شده برای تزریق قطرات محلول رادیواکتیو روی فیلتر.

برای آنالیز طیف‌های این آشکارساز از نرم‌افزار امیگم^۱ استفاده گردیده است. در شکل ۲ بلوک دیاگرام سیستم آشکارسازی شماره ۱ برای اندازه‌گیری فیلتر هوا شده است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم آشکارسازی شماره ۱ برای اندازه‌گیری فیلتر هوا.

آشکارساز شماره ۲ آشکارساز دیگری است که در این تحقیق استفاده شد و یک آشکارساز ژرمانیوم فوق خالص با بازدهی نسبی ۴۰ درصد است. در شکل ۳ بلوک دیاگرام سیستم آشکارسازی شماره ۲ برای اندازه‌گیری فیلتر هوا نشان داده شده است.



شکل (۳): شماتیک و بلوک دیاگرام سیستم آشکارسازی شماره ۲ برای اندازه‌گیری فیلتر هوا.

² Matrices

³ Geometry

¹ OMNIGAM

که در آن NetArea سطح خالص زیر قله در انرژی مورد نظر، t زمان طیف‌نگاری برحسب ثانیه، Activity مقدار اکتیویته به‌روز شده نمونه در زمان طیف‌نگاری برحسب بکرل و P نسبت انشعابی گسیل پرتو گاما برای انرژی مورد نظر است. پس از به‌دست آوردن مقادیر بازدهی، برای به‌دست آوردن اکتیویته در نمونه‌های گرفته شده، از رابطه ۱ استفاده می‌شود که در این رابطه جای اکتیویته و بازدهی عوض شده است.

جدول (۱): مقادیر بازدهی در آشکارساز شماره ۱ برای انرژی‌های موجود در چشمه استاندارد مخلوط گامای فیلتر حجمیم.

رادایونوکلئید	انرژی (کیلوالکترون‌ولت)	بازدهی (%)	خطا (%)
^{241}Am	۵۹/۵۴	۲۱/۵۰	۰/۱۳
^{109}Cd	۸۸/۰۳	۲۳/۷۹	۰/۶۵
^{57}Co	۱۲۲/۰۶	۲۳/۲۱	۲/۰۵
^{57}Co	۱۳۳/۴۷	۲۱/۴۹	-۱/۶۰
^{113}Sn	۳۹۱/۶۹	۱۱/۰۱	-۰/۹۷
^{137}Cs	۶۱۱/۶۶	۷/۲۲	۰/۶۰
^{54}Mn	۸۳۴/۸۵	۶/۰۷	۴/۴۰
^{60}Co	۱۱۷۳/۲۴	۳/۹۳	-۴/۹۴
^{60}Co	۱۳۳۲/۵	۳/۵۶	-۰/۳۷

برای به‌دست آوردن مقدار بازدهی در همه‌ی انرژی‌های موجود در نمونه آزمون، باید تابع مناسبی روی داده‌ها برازش داده شود. برای این کار از نرم‌افزار تبیل کرو^۱ استفاده شد. روش کار در این نرم‌افزار بدین نحو است که داده‌های مربوط به بازدهی آشکارساز در انرژی‌های مختلف به نرم‌افزار داده شده و پس از برازش یک تابع مناسب بر روی داده‌های ورودی، تابع بازدهی را به‌همراه ضرایب معادله بازدهی و خطای مربوطه ارائه می‌دهد. در شکل ۶ منحنی بازدهی و داده‌های مربوط به آن برای آشکارساز ژرمانیومی فوق خالص شماره ۱ نشان داده شده است.

برای قراردادن فیلتر روبروی آشکارساز نگهدارنده‌ای از جنس پلکسی گلاس روی آشکارساز قرار داده شد و نمونه‌ها روی آن قرار گرفت تا هندسه آزمایش در کل فرآیند استانداردسازی و اندازه‌گیری، کاملاً ثابت بماند (شکل ۵).



شکل (۵): نمونه آماده شده درون طلق و نگهدارنده تفلونی قبل از قرارگرفتن جلوی آشکارساز.

۴.۲. کالیبراسیون انرژی و کالیبراسیون بازدهی

برای تشخیص نوع رادیونوکلئیدها باید آشکارسازهای ژرمانیوم فوق خالص برای انرژی‌های مختلف کالیبره انرژی شود. جهت انجام کالیبراسیون انرژی در آشکارساز شماره ۱، از دو چشمه نقطه‌ای ^{241}Am و ^{232}Th استفاده شد. این آشکارساز در بازه‌ی انرژی ۲۶/۳۴ تا ۳۰۰۰ کیلوالکترون‌ولت با برون‌یابی کالیبره شد. برای به‌دست آوردن اکتیویته رادیونوکلئیدهای موجود در هر فیلتر، باید منحنی بازدهی آشکارساز به‌دست آید. پس از تکمیل فرآیند ساخت چشمه استاندارد فیلتر، منحنی کالیبراسیون بازدهی برای این پیکربندی به‌دست آمد. برای منحنی کالیبراسیون بازدهی در ابتدا چشمه استاندارد فیلتر با استفاده از نگهدارنده روبروی آشکارساز قرار داده شد و طیف گامای آن گرفته شد.

پس از پردازش طیف، سطح خالص زیر قله مربوط به هر یک از انرژی‌های مورد نظر به‌دست آمد. با استفاده از رابطه ۱، مقدار بازدهی برای هر انرژی محاسبه گردید (جدول ۱) [۹]:

$$\epsilon (\%) = \frac{\text{NetArea}}{t \times \text{Activity}(\text{Bq})} \times P \quad (1)$$

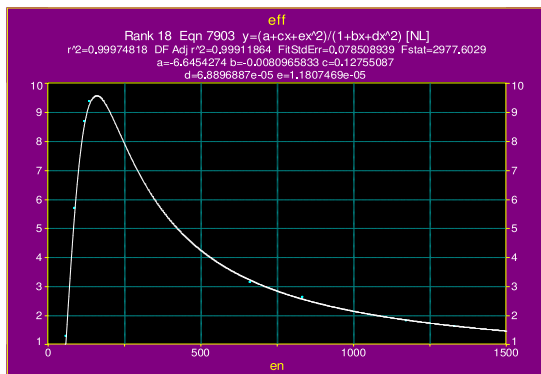
¹ Table Curve

شده و طیف‌نگاری شد. پس از پردازش طیف، سطح خالص مربوط به هر یک از انرژی‌های مورد نظر به دست آمد. با استفاده از رابطه ۱، مقدار بازدهی برای هر انرژی محاسبه گردید (جدول ۳).

جدول (۳): مقادیر بازدهی در آشکارساز شماره ۲ برای انرژی‌های موجود در چشمه استاندارد مخلوط گامای فیلتر حجیم.

رادیونوکلید	انرژی (کیلو الکترون‌ولت)	بازدهی (%)	خطا (%)
²⁴¹ Am	۵۹/۵۴	۱/۲۹	-۰/۵۲
¹⁰⁹ Cd	۸۸/۰۳	۵/۷۲	۰/۴۴
⁵⁷ Co	۱۲۲/۰۶	۸/۶۹	-۰/۸۱
⁵⁷ Co	۱۳۶/۴۷	۹/۳۸	۰/۵۹
¹¹³ Sn	۳۹۱/۶۹	۳/۱۶	۱/۲۵
¹³⁷ Cs	۶۶۱/۶۶	۲/۶۳	-۱/۷۸
⁵⁴ Mn	۸۳۴/۸۵	۱/۸۲	۲/۸۹
⁶⁰ Co	۱۱۷۳/۲۴	۱/۶۴	-۱/۵۴
⁶⁰ Co	۱۳۳۲/۵	۱/۲۹	۰/۳۱

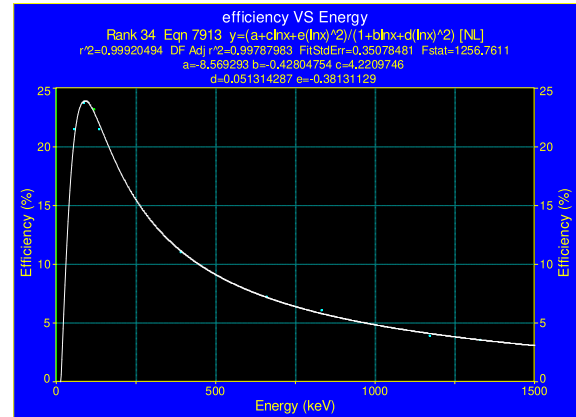
با استفاده از نرم‌افزار تیبل کرو تابع بازدهی برآورد شد. در شکل ۷ منحنی بازدهی و داده‌های مربوط به آن برای آشکارساز ژرمانیومی فوق خالص شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل (۷): منحنی کالیبراسیون بازدهی برای آشکارساز ژرمانیومی شماره ۲ در هندسه فیلتر حجیم.

معادله بازدهی آشکارساز ژرمانیومی شماره ۲ برای چشمه استاندارد فیلتر کاغذی از طریق رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\epsilon (\%) = \frac{(a+cE+eE^2)}{(1+bE+dE^2)} \quad (3)$$



شکل (۶): منحنی کالیبراسیون بازدهی برای آشکارساز ژرمانیومی شماره ۱ در هندسه فیلتر حجیم.

معادله بازدهی آشکارساز ژرمانیومی شماره ۱ برای چشمه استاندارد فیلتر کاغذی از طریق رابطه ۲ به دست آمده است.

$$\epsilon (\%) = \frac{(a+c \times \ln E + e \times (\ln E)^2)}{(1+b \times \ln E + d \times (\ln E)^2)} \quad (2)$$

که در آن، ϵ بازدهی مطلق آشکارساز برحسب درصد و E معرف انرژی واقعی وجود دارد، کمتر از ۵ درصد است. مقادیر اختلاف^۱ این منحنی در نقطه‌ای که بیشترین فاصله منحنی با داده‌های واقعی وجود دارد، کمتر از ۵ درصد است. مقادیر مربوط به ضرایب رابطه ۲ در جدول ۲ لیست گردیده است.

جدول (۲): مقادیر ضرایب تابع برازش بازدهی آشکارساز ژرمانیومی شماره ۱ برای چشمه استاندارد فیلتر کاغذی حجیم.

پارامتر	a	b	c	d	e
مقدار	-۸/۵۷	۰/۴۳	۴/۲۲	۰/۰۵	-۰/۳۸

در آشکارساز ژرمانیومی شماره ۲ برای کالیبراسیون انرژی از چشمه نقطه‌ای ²⁴¹Am و قله ⁴⁰K که در طیف زمینه وجود دارد، استفاده شد. این آشکارساز در بازه انرژی ۵۹/۵ تا ۲۰۰۰ کیلو الکترون‌ولت با برون‌یابی کالیبره شده و منحنی کالیبراسیون بازدهی برای این پیکربندی به دست آمد. برای منحنی کالیبراسیون بازدهی در ابتدا چشمه استاندارد فیلتر کاغذی استفاده از نگهدارنده روبروی آشکارساز ژرمانیومی قرار داده

¹ Residual

جدول (۵): مشخصات نمونه‌های فیلتر هوا.

کد نمونه	زمان نمونه‌برداری (دقیقه:ساعت)	حجم هوا (مترمکعب)	زمان بین نمونه‌برداری و طیف‌نگاری (دقیقه:ساعت)	زمان طیف‌نگاری (دقیقه:ساعت)
QW_2	۲۰:۵۰	۹۷۰۰	۱۴۷:۳۶	۲۴:۰۰
QW_3	۲۴:۰۰	۱۱۳۰۲	۴۹:۵۷	۲۴:۰۰
NW_1	۲۴:۰۰	۱۱۱۴۲	۴۹:۴۵	۲۴:۰۰
NW_2	۲۴:۰۰	۱۱۷۵۲	۶۵:۰۰	۲۶:۲۲
NW_3	۲۴:۰۰	۱۵۸۲۹	۵۰:۰۰	۲۴:۲۹
NW_3	۲۴:۰۰	۱۵۸۲۹	۱۲۱:۴۷	۲۴:۳۰
QW_5	۲۴:۰۰	۱۵۸۲۹	۱۲۲	۲۴:۳۰
NW_4	۲۴:۰۰	۱۹۵۷۱	۷۰:۴۰	۲۴:۰۴
QW_6	۲۴:۰۰	۱۶۵۵۲	۹۵:۰۰	۲۳:۰۰
NW_5	۲۴:۰۰	۱۵۴۵۹	۱۹۷:۵۲	۲۴:۱۰
NW_6	۱۵:۲۰	۷۲۴۶	۱۴۵:۴۶	۲۱:۲۲
NW_6	۱۵:۲۰	۷۲۴۶	۲۴:۰۰	۲۴:۴۶
NW_7	۲۸:۲۴	۱۳۵۱۸	۲۱:۱۵	۱۹:۵۴
NW_8	۲۴:۴۷	۱۶۰۸۶	۹۱:۴۰	۲۴:۰۰
NW_9	۲۴:۰۷	۱۵۴۱۷	۲۵:۴۰	۲۱:۵۴
NW_10	۲۴:۲۲	۲۰۱۰۰	۹۰:۰۰	۲۶:۳۳
NW_11	۲۳:۰۰	۱۰۸۵۲	۱۶۴:۴۵	۲۴:۰۸
NW_12	۲۰:۵۵	۱۳۳۷۸	۹۷:۰۰	۲۴:۳۶
NW_12	۲۰:۵۵	۱۳۳۷۸	۱۴۹:۰۰	۲۴:۱۰
NW_13	۲۷:۵۲	۱۲۹۵۴	۱۵:۳۵	۲۹:۱۳
NW_14	۲۶:۳۷	۱۲۶۴۱	۱۴:۳۰	۲۴:۰۰
NW_18	۲۴:۰۹	۱۱۵۹۸	۷۳:۳۰	۲۷:۰۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اکتیویته ^7Be از $۷/۱۳$ تا $۸۱/۳۹$ بکرل بر فیلتر متغیر است. پس از محاسبه اکتیویته کل هر فیلتر، با توجه به حجم هوای نمونه‌برداری شده در هر فیلتر، غلظت رادیونوکلئید طبیعی ^7Be نیز محاسبه شد. غلظت این رادیونوکلئید برحسب واحد میلی‌بکرل بر مترمکعب^۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده اکتیویته در واحد حجم در هر فیلتر است. غلظت ^7Be (با نیمه‌عمر $۵۳/۲۹$ روز) از $۰/۶۱$ تا $۷/۳۱$ میلی‌بکرل بر مترمکعب متغیر است که در محدوده مقادیر گزارش شده توسط تیم‌های دیگر تحقیقاتی در دیگر مناطق دنیا است [۲، ۱۰، ۱۱ و ۱۲].

که در آن، E بازدهی مطلق آشکارساز برحسب درصد و E معرف انرژی برحسب کیلوالکترون‌ولت است. مقدار درصد اختلاف این منحنی در نقطه‌ای که بیشترین فاصله منحنی با داده‌های واقعی وجود دارد، کمتر از ۳ درصد است. مقادیر مربوط به ضرایب رابطه ۳ در جدول ۴ لیست گردیده است.

جدول (۴): مقادیر ضرایب تابع برازش بازدهی آشکارساز ژرمانیومی

شماره (۲) برای چشمه استاندارد فیلتر کاغذی حجیم

پارامتر	a	b	c	d	e
مقدار	-۶/۶۵	-۰/۰۰۸	۰/۱۳	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۱۲

۳. نتایج

۳.۱. ثبت اطلاعات نمونه‌برداری

برای این‌که اطلاعات نمونه‌برداری و طیف‌نگاری هر نمونه به‌صورت کامل ثبت شود، مشخصات هر نمونه در کاربرگی وارد شد تا در تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد. زمان نمونه‌برداری، حجم هوا، کد نمونه و فاصله زمانی بین نمونه‌برداری و طیف‌نگاری در این فرم ثبت شد (جدول ۵).

۳.۲. اندازه‌گیری اکتیویته و غلظت برای رادیونوکلئید

^7Be

پس از نمونه‌برداری و واپاشی رادیونوکلئیدهای کوتاه‌عمر و آماده‌سازی نمونه‌ها، طیف‌نگاری و آنالیز نمونه‌ها انجام شد. اکتیویته کل رادیونوکلئید طبیعی ^7Be با انرژی $۴۷۷/۶$ کیلوالکترون‌ولت اندازه‌گیری شد. در ابتدا اکتیویته برحسب واحد بکرل بر فیلتر^۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده اکتیویته‌ی کل نشست روی هر فیلتر فارغ از حجم هوای برداشته شده است (جدول ۶).

^۲ mBq/m³

^۱ Bq/filter

جدول (۶): اندازه گیری اکتیویته کل رادیونوکلئید طبیعی ⁷Be.

شماره آشکارساز استفاده شده	اکتیویته ⁷ Be (Bq/filter)	غلظت ⁷ Be (mBq/m ³)	تاریخ نمونه برداری	کد نمونه
۱	۵۳/۳۷ ± ۵/۴۶	۵/۵۰ ± ۰/۵۷	۹۹/۰۸/۱۱	QW_2
۱	۳۶/۱۶ ± ۳/۷۱	۳/۲۰ ± ۰/۳۳	۹۹/۰۸/۱۴	QW_3
۱	۸۱/۳۹ ± ۸/۳۴	۷/۳۱ ± ۰/۷۵	۹۹/۰۸/۱۸	NW_1
۲	۷/۱۳ ± ۲/۸۸	۰/۶۱ ± ۰/۲۴	۹۹/۰۸/۲۵	NW_2
۱	۲۳/۹۶ ± ۲/۴۶	۱/۵۱ ± ۰/۱۶	۹۹/۰۸/۲۶	NW_3
۲	۱۹/۰۶ ± ۷/۶۷	۱/۲۰ ± ۰/۲۴	۹۹/۰۸/۲۶	NW_3
۲	۲۲/۴۲ ± ۹/۰۱	۱/۴۰ ± ۰/۵۶	۹۹/۰۸/۲۶	QW_5
۱	۶۳/۴۶ ± ۶/۵۰	۳/۲۴ ± ۰/۳۳	۹۹/۰۹/۰۵	NW_4
۱	۶۲/۱۷ ± ۶/۳۷	۳/۷۶ ± ۰/۳۹	۹۹/۰۹/۰۵	QW_6
۱	۶۰/۶۵ ± ۶/۲۱	۳/۹۲ ± ۰/۴۰	۹۹/۰۹/۰۹	NW_5
۱	۴۰/۲۰ ± ۴/۱۳	۵/۵۵ ± ۰/۵۷	۹۹/۰۹/۱۱	NW_6
۲	۳۹/۴۲ ± ۱۵/۸۴	۵/۴۴ ± ۰/۵۶	۹۹/۰۹/۱۱	NW_6
۱	۷۶/۳۱ ± ۷/۸۲	۵/۶۵ ± ۰/۵۸	۹۹/۰۹/۱۶	NW_7
۱	۴۲/۳۵ ± ۴/۳۴	۲/۶۳ ± ۰/۲۷	۹۹/۰۹/۱۹	NW_8
۱	۵۶/۴۵ ± ۵/۷۹	۳/۶۶ ± ۰/۳۸	۹۹/۰۹/۲۳	NW_9
۲	۴۲/۵۵ ± ۱۷/۱۱	۲/۱۲ ± ۰/۸۵	۹۹/۰۹/۲۶	NW_10
۱	۵۰/۲۱ ± ۵/۱۴	۴/۶۳ ± ۰/۴۸	۹۹/۰۹/۳۰	NW_11
۱	۷۵/۱۸ ± ۷/۷۰	۵/۶۲ ± ۰/۵۸	۹۹/۱۰/۰۳	NW_12
۲	۷۸/۲۰ ± ۳۱/۴۲	۵/۸۵ ± ۰/۸۵	۹۹/۱۰/۰۳	NW_12
۱	۶۰/۸۹ ± ۶/۲۴	۴/۷۰ ± ۰/۴۸	۹۹/۱۰/۰۷	NW_13
۱	۵۷/۰۵ ± ۵/۸۵	۴/۵۱ ± ۰/۴۶	۹۹/۱۰/۱۰	NW_14
۱	۱۷/۹۸ ± ۱/۸۵	۱/۵۵ ± ۰/۱۶	۹۹/۱۰/۲۴	NW_18
-	۴۷/۴۸ ± ۷/۸۱	۳/۸۰ ± ۰/۴۶	میانگین	

در جدول ۷ مقایسه ای از محدوده غلظت ⁷Be در این

تحقیق با مقالات دیگر در این زمینه ارائه شده است.

جدول (۷): مقایسه محدوده غلظت ⁷Be به دست آمده با دیگر مقالات.

ارجاع	محدوده غلظت ⁷ Be (mBq/m ³)
این تحقیق	۷/۳۱ تا ۰/۶۱
تریستان و همکاران [۲]	۱۱/۲ تا ۰/۰۱
لپانن و همکاران [۱۰]	۸/۶ تا ۰/۲
الخماشی و همکاران [۱۱]	۲۹/۵ تا ۵
لیسیکا و همکاران [۱۲]	۵ تا ۱

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق یک نمونه استاندارد فیلتر حجیم به روش جدید و ابتکاری ساخته شد و دو آشکارساز ژرمانیومی برای این پیکربندی کالیبره شد. در روش ابتکاری ساخت چشمه تلاش شد تا نمونه استاندارد به صورت همگن در سطح چشمه توزیع شود و منحنی بازدهی دقیقی برای دو آشکارساز به دست آید.

مقدار خطا برای منحنی بازدهی در دو آشکارساز استفاده شده در نقطه ای که بیشترین فاصله منحنی با داده های واقعی را داشت، کمتر از ۳ درصد و ۵ درصد بوده است. نمونه های فیلتر هوا با حجم بالا در بازه ۲/۵ ماهه آبان ماه ۱۳۹۸ تا دی ماه ۱۳۹۸ جمع آوری شد و پس از واپاشی کردن رادیونوکلئیدهای کوتاه عمر، نمونه ها پرس شده و به شکل دیسک درآمد تا برای طیف نگاری آماده شود.

برخی نمونه ها مانند نمونه های با کد NW_3 و کد QW_5 در تاریخ ۹۸/۸/۲۶ و نمونه های با کد NW_4 و کد QW_6 در تاریخ ۹۸/۹/۵ به صورت هم زمان نمونه برداری شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که علی رغم این که غلظت ⁷Be با دو آشکارساز متفاوت و منحنی بازدهی متفاوت به دست آمد، توافق خوبی بین این نمونه ها وجود داشت.

غلظت ⁷Be از ۰/۶۱ ± ۰/۲۴ تا ۷/۳۱ ± ۰/۷۵ میلی بکرل بر مترمکعب متغیر بوده است که توافق خوبی با داده های بین المللی دارد. میانگین غلظت ⁷Be مقدار ۳/۸۰ ± ۰/۴۶ میلی بکرل بر مترمکعب بوده است.

۵. مراجع

- [1] S. Visetpotjanakit, S. Kaewpaluek and S. Udomsomporn. Participation in IAEA-TEL-201304/28 ALMERA Proficiency Test Exercise on Determination of Anthropogenic Radionuclides in Water and Flour Samples, *Applied Radiation and Isotopes*, 109(2016) 78–81.
- [2] P. T. F. Cruz, A. C. Bonga, C. L. D. Sada, J. U. Olivares, F. M. D. Cruz, L. J. H. Palad, A. J. Jesuitas, E. C. Cabatbat, V. J. Omandam, T. Y. Garcia and C. P. Feliciano. Assessment of temporal variations of natural radionuclides Beryllium-7 and Lead-212 in surface air in Tanay, Philippines, *Journal of Environmental Radioactivity*, 105989(2019) 208–209.
- [3] M. F. L'Annunziata. *Handbook of Radioactivity Analysis*, Third edition 2012; ISBN 978-0-12-384873-4.
- [4] P. Rulík, H. Mala', V. Bec'kova', Z. Ho'lgýe, E. Schlesingerova', I. Sve'tlík and J. Š'rkál. Low level air radioactivity measurements in Prague, Czech Republic, *Applied Radiation and Isotopes*, 67(2009) 969–973.
- [5] N. Alkhomashi and F. I. Almasoud. Indication of the radioactive fallout in Riyadh, Saudi Arabia following the Fukushima nuclear accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 152(2016) 70–74.
- [6] A. P. Leppänen, A. Mattila, M. Kettunen and R. Kontro. Artificial radionuclides in surface air in Finland following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 126(2013) 273–283.
- [7] N. Nakashima and E. B. Duran. Proficiency Test Exercises For Particulate Systems at CTBT Radionuclide Laboratories, *Applied Radiation and Isotopes*, 134 (2018) 35–39.
- [8] M.J. Daza, B. Quintana, M. Garcia-Talavera and F. Fernandez. Efficiency calibration of a HPGe detector in the [46.54–2000] keV energy range for the measurement of environmental samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 470(2001) 520–532.
- [9] G. R. Gilmore. *Practical Gamma-ray Spectrometry*; 2nd Edition; 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7.
- [10] A. P. Leppänen, I.G. Usoskin, G.A. Kovaltsov and J. Paatero. Cosmogenic ^7Be and ^{22}Na in Finland: Production, observed periodicities and the connection to climatic phenomena, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 74(2012) 164–180.
- [11] N. Alkhomashi, I. F. Al-Hamarneh, M. Alkhorayef, A. Sulieman, R. Almsulm, A. Alyousif, A. S. Alsalamah, Y. A. Alssalim and W. Alotibi. Measurements of surface air ^7Be concentrations in Saudi Arabia, *Applied Radiation and Isotopes*, 165(2020) 109305. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109305>.
- [12] M. D. Lisiecka and H. Bern. Seasonal fluctuation of activity size distribution of ^7Be , ^{210}Pb , and ^{210}Po radionuclides in urban aerosols, *Journal of Aerosol Science* 144(2020) 105544. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105544>.