

کالیبراسیون دزسنج پرتو گاما؛ ارائه روشی جدید مبتنی بر طیف‌سنجی در شرایط آزمایشگاهی

محمد نوری و فائزه رحمانی*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

پست الکترونیکی: Frahmani@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵)

چکیده:

امروزه دزسنجی پرتو گاما به صورت برخط، یکی از گزینه‌های پرکاربرد دزسنج‌ها محسوب می‌شود. یکی از کامل‌ترین روش‌های دزسنجی، تبدیل مستقیم طیف انرژی ثبت شده گاما به دز و، یا به عبارتی، تبدیل طیف‌سنج به دزسنج است. در میان روش‌های متعدد تبدیل طیف‌سنج به دزسنج، روش تابع عملکرد $G(E)$ به علت تعریف ضرایب مبتنی بر بازه‌بندی انرژی، یکی از روش‌های مناسب و با دقت به شمار می‌رود. در این پژوهش از کد شبیه‌سازی MCNP۶ و طیف‌سنج NaI(Tl) با ابعاد 2×2 اینچ برای محاسبه دز معادل بر اساس طیف ثبت شده استفاده شده است. بر اساس شرایط اندازه‌گیری دز معادل برای چشمه گسترده جهتی، نوآوری این کار، ارائه روشی عملی و کارآمد برای واسنجی دزسنج مبتنی بر چشمه نقطه‌ای در آزمایشگاه است تا نتایج دز معادل معتبر را بدون نیاز به قرارگیری دزسنج در میدان چشمه پرتویی واسنجی گسترده جهتی ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: دزسنج - طیف‌سنج - دز معادل محیطی - تابع عملکرد $G(E)$ - شبیه‌سازی با کد MCNP۶

۱. مقدمه

در آشکارساز است که منجر به اعلام دز بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی می‌شود. طی سالیان گذشته تلاش‌های زیادی شده تا دزسنجی با دقت بیشتری انجام شود. یکی از روش‌ها استفاده از طیف‌سنجی و در نظر گرفتن انرژی ثبت شده ذرات در آشکارساز برای محاسبه و اعلام دز است.

در سال ۱۹۶۶ موریچی طرحی را برای تبدیل آشکارساز به دزسنج با استفاده از تابع عملکرد $G(E)$ ارائه داد که نتایج، دقت بهتر محاسبات آهنگ دز با استفاده از آشکارساز NaI(Tl) نسبت به اتافک یونش را نشان داد [۵]. دومبروسکی در سال ۲۰۱۴ سه رویکرد تبدیل طیف به آهنگ دز (روش اول، ارزیابی فوتوپیک‌ها؛ روش دوم، تجزیه طیف کامل؛ و روش سوم، تبدیل طیف کامل بدون تجزیه) را مقایسه کرد که نتیجه آن، برتری روش سوم از نظر دقت بود [۷].

با توجه به توسعه کاربرد چشمه‌های پرتوزا، نیاز به حفاظت پرتویی و پایش محیطی ضروری است [۱ و ۲]. دو روش برای اندازه‌گیری دز وجود دارد: فعال و غیرفعال [۳ و ۴]. هر قدر فرایند اندازه‌گیری دز محیطی، منجر به اطلاعات دقیق‌تر و بدون تأخیر زمانی (برخط) باشد، برای تصمیم‌گیری‌های پیش‌رو کارآمدتر است [۲]؛ بنابراین، روش‌های فعال مبتنی بر ارائه دز (آهنگ دز) در لحظه، در حال توسعه هستند.

در روش‌های فعال، از آشکارسازهای پرتویی با قابلیت اندازه‌گیری برخط استفاده می‌شود و خروجی آشکارساز (شمارش یا طیف) به دز تبدیل می‌شود [۵ و ۶]. یکی از کاستی‌ها در دزیمتری مبتنی بر شمارش کل، در نظر نگرفتن انرژی ذرات

دزسنجی برای اندازه‌گیری دز معادل انتخاب شده است [۱۱]. علاوه بر این، روشی جدید به منظور کالیبراسیون دزسنج ارائه شده در هر مکانی بدون نیاز به مراجعه مجدد به چشمه گسترده جبهتی با استفاده از چشمه نقطه‌ای ارائه شده است.

۲. روش کار

آشکارساز:

برای تبدیل طیف‌سنج به دزسنج از NaI(Tl) با ابعاد ۲×۲ اینچ استفاده شده است. طرحواره‌ای از آشکارساز، به همراه پوشش آلومینیومی و لامپ تکثیرکننده در شکل ۱ نمایش داده شده است. با وجود ضخامت پایین آلومینیوم (۱ میلی‌متر)، انرژی‌های کمتر از ۱۰ کیلو الکترون‌ولت شمارش نمی‌شود. است. طیف موردنظر از ۱۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۳ مگا الکترون‌ولت ثبت شده است. همچنین محدوده آهنگ دز قابل اندازه‌گیری با این آشکارساز، صفر تا $200 \mu Sv/h$ است.

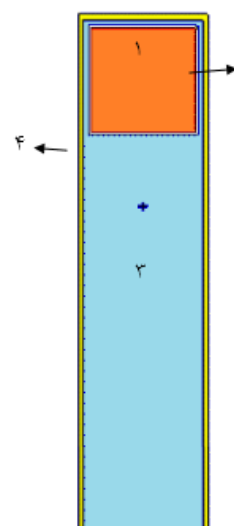
برای محاسبه دز محیطی ($H^*(10)$) طبق تعریف استاندارد، از اندازه‌گیری دز در عمق یک سانتی‌متری کره ICRU (کره به شعاع ۱۵ سانتی‌متر از جنس بافت و ترکیب همگن چهارعنصر هیدروژن ۱/۱۰٪، کربن ۱۱/۱٪، نیتروژن ۲/۶٪، اکسیژن ۷۶/۲٪ با چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، با قرارگیری در مقابل چشمه گسترده جبهتی) استفاده می‌شود (شکل ۲).

بر اساس هدف پژوهش، برای دزسنجی، آهنگ ارتفاع پالس طیف‌سنج در بازه‌های مختلف انرژی به آهنگ دز تبدیل می‌شود. همان‌طور که بیان شد، برای این تبدیل از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که از میان آن‌ها، روش تابع عملکرد $G(E)$ انتخاب شده است [۱۲].

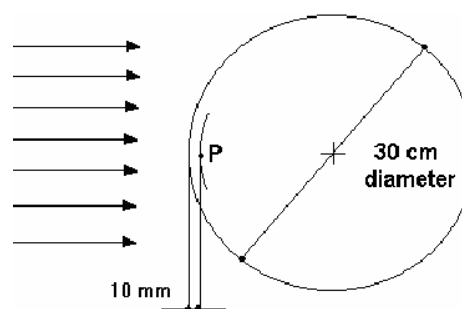
روش تابع عملکرد $G(E)$:

در این روش با اندازه‌گیری طیف انرژی بازبندی شده، به هر بازه انرژی، ضریب تبدیل انرژی به دز نسبت داده می‌شود تا هر انرژی متناسب با اثری که دارد، در محاسبه دز در نظر گرفته شود [۱۳ و ۷].

تابع عملکرد $G(E)$ مبتنی بر تعاریف زیر محاسبه می‌شود. پرتو گامایی با انرژی E_0 با NaI(Tl) اندرکنش انجام داده و انرژی



شکل ۱. طرحواره‌ای از آشکارساز (۱): آشکارساز دو اینچ سوسوزن، (۲): اپوکسی، (۳): PMT و آلومینیوم اطراف آشکارساز و (۴): پلکسی گلس و فوم روی آشکارساز).



شکل ۲. اندازه‌گیری دز در کره ICRU ($H^*(10)$)

در سال ۲۰۱۶، کاسانواس طرحی برای محاسبه ضرایب تبدیل طیف به $H^*(10)$ در پایشگرهای زمان‌واقعی با آشکارساز $LaBr(Ce)$ و مقایسه آن با آشکارساز گایگر مولر ارائه دادند که خطای بالای آشکارساز گایگر مولر را در انرژی‌های بالا نشان می‌داد [۸].

خروجی آشکارسازها بنا بر مد کاری آن‌ها متفاوت است؛ چنانچه آشکارسازهای گایگر مولر در مد شمارش و آشکارسازهای سوسوزن می‌توانند در دو مد شمارش و طیف‌سنجی کار کنند [۹]. دزسنجی با تبدیل شمارش به دز دارای خطای قابل توجهی خواهد بود [۸ و ۱۰]. بر اساس تنوع آشکارسازهای سوسوزن در دو دسته آلی و معدنی، سوسوزن معدنی NaI(Tl) دارای بازدهی نور بیشتر و رفتار خطی مناسبی نسبت به انرژی گاما در طیف وسیعی از انرژی است؛ لذا در این پژوهش، با استفاده از روش $G(E)$ به‌عنوان گزینه مناسب برای طیف‌سنجی و تبدیل آن به

E را بر جای می‌گذارد [۵]:

$$\bar{I}_d(E_0) = \int_0^{E_0} n(E, E_0) dE \quad (1)$$

که $\bar{I}_d(E_0)$ انرژی انباشت شده و $n(E, E_0)$ احتمال انباشت انرژی در آشکارساز است. انرژی به‌جا مانده در هوا (به‌جای ماده‌آشکارساز) مانند رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$\bar{I}_a(E_0) = k\mu(E_0)E_0dE \quad (2)$$

که $\bar{I}_a(E_0)$ انرژی به‌جا مانده در هوا، k و μ به‌ترتیب ضریب ثابت و ضریب جذب انرژی پرتو گاما در هوا هستند. از آن‌جا که ماده‌های مختلف پاسخ‌های انرژی متفاوتی دارند و پاسخ، بسته به انرژی پرتو گاما تغییر می‌کند، در نتیجه نسبت رابطه (۱) به رابطه (۲) ثابت نیست؛ بنابراین، یک ضریب به رابطه (۲) اضافه می‌شود تا نسبت ثابت باقی بماند. طبیعی است که ضریب تابعی از انرژی است و به آن $G(E)$ گفته می‌شود. به این منظور، مطابق زیر به محاسبه رابطه آن پرداخته می‌شود.

$$k_1 = \frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_a} \quad (3)$$

آهنگ دز جذبی در هوا با D_{air} رابطه ساده‌ای مطابق زیر دارد:

$$D(E_0) = k_2 \bar{I}_a(E_0) \quad (4)$$

جایی که k_2 ثابت است، می‌توان نوشت:

$$D(E_0) = \frac{k_2}{k_1} \int_0^{E_0} G(E) n(E, E_0) dE \quad (5)$$

حل رابطه (۵) منجر به محاسبه $G(E)$ به‌صورت یک رابطه گسسته در قالب یک عبارت چندجمله‌ای مطابق رابطه (۶) می‌شود:

$$G(E) = \sum_{k=1}^{k_{max}} A(k) (\log E)^{k-M-1} \quad (6)$$

که $A(k)$ یک پارامتر، M و k_{max} به ترتیب ثابت و تعداد جمله‌ها هستند. لذا $G(E)$ و $A(k)$ بر اساس روش حداقل مربعات از اندازه‌گیری D_{air} و طیف‌های استاندارد محاسبه می‌شود [۱۰]. مطابق آنچه گفته شد، $G(E)$ ضریبی برای تبدیل طیف به آهنگ دز است و چون طیف در بازه‌های مختلف انرژی ثبت می‌شود، $G(E)$ یک ماتریس با درایه‌های متناسب با طیف انرژی است. بنابراین، برای محاسبه دز می‌توان از رابطه (۷) استفاده کرد که در آن S ماتریس طیف، G بردار تابع عملکرد طیف و D بردار آهنگ دز معادل است که با جمع درایه‌های آن (جمع در کل انرژی‌ها)، آهنگ دز معادل را نتیجه می‌دهد [۱۱-۱۲]:

$$D_{m \times 1} = S_{m \times n} \times G_{n \times 1} \quad (7)$$

که m تعداد انرژی‌های مختلف و n تعداد بازه‌های انرژی است [۱۳-۱۱].

۳. نتایج

برای محاسبه تابع عملکرد $G(E)$ ابتدا طیف انرژی و آهنگ دز برای چشمه‌های معین گاما (انرژی مشخص - اکتیویته مشخص) محاسبه می‌شود. مشخصات دز برای کالیبراسیون دزسنج مبتنی بر طیف‌سنج گاما از اطلاعات ثبت دز چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ (چشمه گسترده جهتی) به‌دست آمده است (جدول ۱). از آن‌جا که داده‌های دز تنها به ازای همین دو انرژی موجود است، برای محاسبه طیف انرژی، آشکارساز توصیف‌شده در شکل ۱ در مقابل چشمه‌های گامای گسترده جهتی با انرژی‌های مختلف قرار داده شد و طیف انرژی برای ۳۰ انرژی منتخب از ۱۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۳ مگا الکترون‌ولت و با بازه‌بندی ۱۰ کیلو الکترون‌ولت (در ۳۰۰ بازه)، با شبیه‌سازی با کد شبیه‌سازی MCNP۶ محاسبه شده است؛ بنابراین، ماتریس طیف خروجی ۳۰ انرژی با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ به دست آمده است. در شکل ۳، یک نمونه از طیف شبیه‌سازی‌شده برای چشمه گسترده جهتی سزیم-۱۳۷ نمایش داده شده است.

همچنین برای محاسبه آهنگ دز محیطی $H^*(10)$ از شبیه‌سازی کره ICRU با محاسبه تالی F۶ (تبدیل مگا الکترون‌ولت بر گرم با در نظر گرفتن اکتیویته چشمه، به پیکو سیورت بر ساعت) استفاده شده است و بردار آهنگ دز با ابعاد ۳۰×۱ محاسبه شده است. در شکل ۴ نمودار آهنگ دز محیطی بر حسب انرژی را برای چشمه گسترده جهتی نمایش می‌دهد. بر اساس محاسبه ماتریس پاسخ طیف و بردار آهنگ دز محیطی برای چشمه گسترده جهتی (طبق رابطه ۷)، تابع عملکرد $G(E)$ برای ۳۰۰ انرژی (آستانه ۱۰ کیلو الکترون‌ولت) قابل محاسبه است. برای آزمودن درستی تابع عملکرد محاسبه شده $G(E)$ ، این ماتریس برای محاسبه آهنگ دز طیف‌های تجربی جمع‌آوری شده با همین طیف‌سنج، و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی استفاده شده است. بر اساس نتایج جدول ۲، خطا در انرژی‌های پایین (آمرسیوم-۲۴۱ با انرژی گامای ۵۹/۵ کیلو الکترون‌ولت) حدود ۱۵ درصد و در انرژی‌های بالا

جدول ۱. اطلاعات کالیبراسیون مرکز استاندارد اندازه‌گیری دزسنجی (SSDL) کرج.

آهنگ دز (pSv/h)	۰/۱۴	۱/۷۰	۵/۴۶	۱۰/۲۱	۱۸/۱۷	۴۰/۰۳	۶۵/۷۷	۱۲۲/۹۶	۲۱۸/۶۲	۴۹۵/۷۱
آهنگ شمارش سزیم-۱۳۷ (#)	۳۰۳	۳۰۰۲	۸۹۳۹	۱۵۳۷۴	۲۶۰۷۸	۵۴۰۳۶	۱۰۰۷۸۱	۱۵۶۴۸۷	۲۱۷۶۷۴	۲۵۶۵۸۰
آهنگ شمارش کبالت-۶۰ (#)	۱۳۸	۱۳۶۵	۴۰۶۳	۶۹۸۸	۱۱۸۵۳	۲۴۵۶۲	۴۵۸۱۰	۷۱۱۳۰	۹۸۹۴۳	۱۱۶۶۲۷

از ۵ درصد است. خطای آهنگ دز به دست آمده در این روش نسبت به روش شمارش کل که وابستگی به انرژی را در نظر نمی‌گیرد، بسیار کمتر است (جدول ۲).

با وجود محاسبه تابع عملکرد $G(E)$ برای چشمه‌های گسترده جهتی، نکته قابل توجه این است که چشمه‌های گسترده جهتی نظیر شرایط کالیبراسیون در کرج، در شرایط واقعی و آزمایشگاهی در دسترس نیستند.

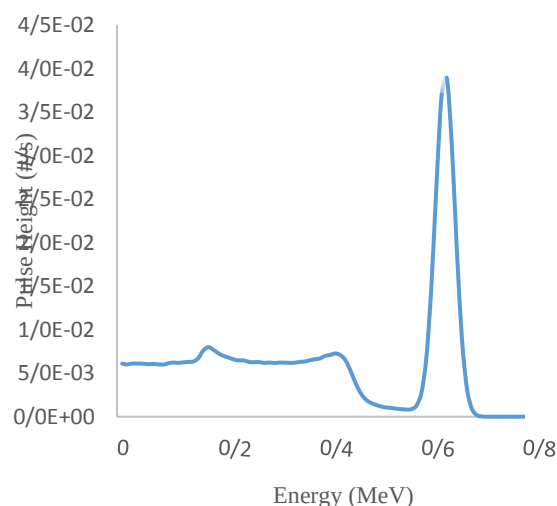
آورد، در آن صورت می‌توان به‌طور پیوسته صحت واسنجی دزسنج دلخواه را بررسی کرد.

برای یافتن این رابطه، لازم است تا تابع عملکرد $G(E)$ را برای چشمه‌های نقطه‌ای محاسبه کرد، زیرا ثبت طیف و البته $H^*(10)$ علاوه بر انرژی، به فاصله چشمه و آشکارساز و زاویه فضایی گسیل بستگی دارد.

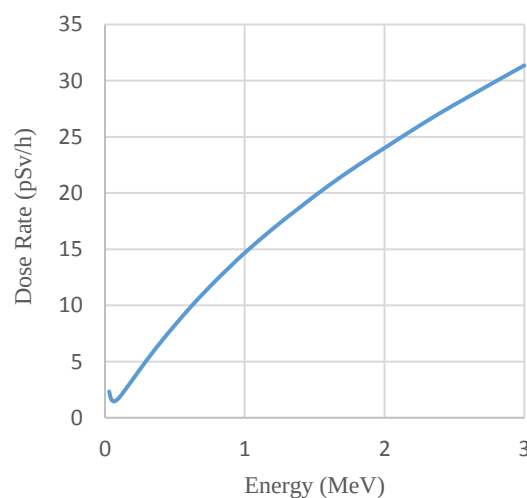
همان‌طور که بیان شد، چون در استفاده از چشمه گسترده جهتی نتایج طیف و آهنگ دز آن با چشمه نقطه‌ای متفاوت است، ماتریس به دست آمده از واسنجی در شرایط ایده‌آل، برای کاربرد و محاسبه آهنگ دز در شرایط آزمایشگاهی، نتایج نادرست و غیردقیقی به همراه خواهد داشت.

به عبارتی، نمی‌توان از تابع عملکردی که در شرایط واسنجی و استاندارد به دست آمده است، برای چشمه نقطه‌ای مقابل آشکارساز استفاده کرد.

برای این منظور، طیف انرژی و $H^*(10)$ (کره ICRU در میدان چشمه نقطه‌ای) در ۳۰۰ بازه انرژی از ۱۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۳ مگا الکترون‌ولت برای ۳۰ انرژی مختلف در فواصل مختلف چشمه تا آشکارساز از حالت چسبیده به آشکارساز تا فاصله یک متری از آن (فاصله‌های ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد.



شکل ۳. طیف چشمه گسترده جهتی سزیم-۱۳۷



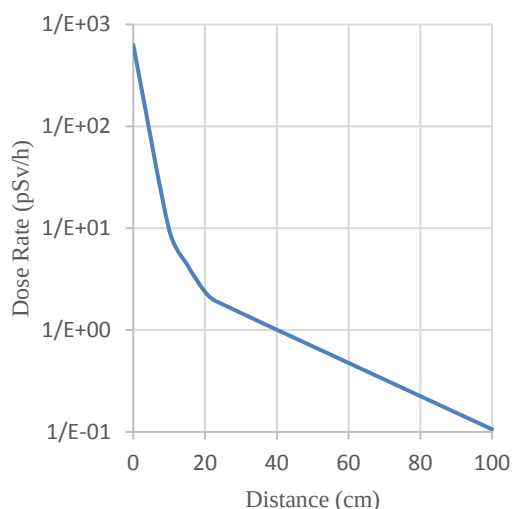
شکل ۴. نمودار آهنگ دز محیطی بر حسب انرژی در چشمه گسترده جهتی.

آنچه معمولاً در آزمایشگاه‌ها و مراکز پژوهشی در دسترس است، چشمه‌های نقطه‌ای هستند.

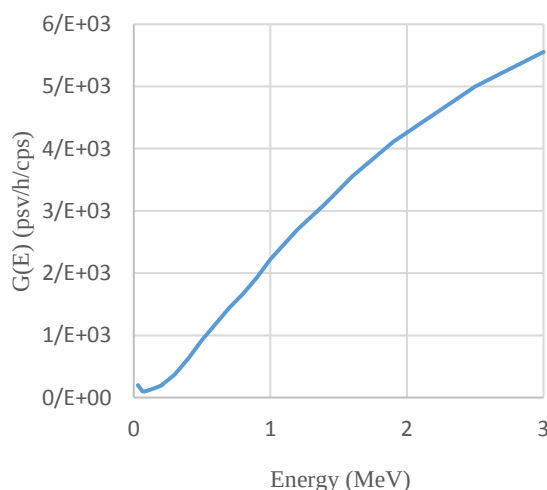
اگر بتوان رابطه‌ای برای ارتباط $H^*(10)$ بین شرایط ایده‌آل (کالیبراسیون کرج) و آزمایشگاه با چشمه نقطه‌ای به دست کبالت-۶۰ با دو انرژی ۱/۱۷ و ۱/۳۳ مگا الکترون‌ولت) کمتر

جدول ۲. مقایسه آهنگ دز و درصد خطا در روش شمارش کل

آهنگ دز به دست آمده در روش pSv/h) G(E) (h و خطای آن (%)		آهنگ دز به دست آمده در روش شمارش کل (pSv/h) و خطای آن (%)		مقدار واقعی آهنگ دز (pSv/h)	نام ایزوتوپ
۱	۳/۱۷	۴۰	۱/۹۱	۳/۱۹	کبالت-۶۰
۳	۰/۳۳	۵۳	۰/۵۲	۰/۳۴	امرسیوم-۲۴۱

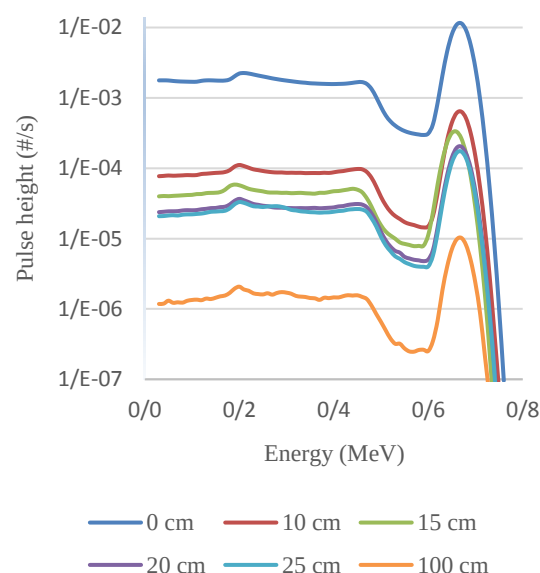


شکل ۶. آهنگ دز چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ برای فاصله‌های مختلف از آشکارساز NaI(Tl).



شکل ۷. نمودار تابع عملکرد G(E) در چشمه گسترده جهتی برحسب انرژی.

برای رسیدن به هدف، یعنی برقراری ارتباط بین تابع عملکرد در حالت ایده‌آل با تابع عملکرد برای چشمه نقطه‌ای، داده‌های مورد نظر در فاصله‌ای که آهنگ دز حاصل از ضرب ماتریس طیف (در آن فاصله) در تابع عملکرد چشمه گسترده جهتی، با آهنگ دز چشمه گسترده جهتی منطبق می‌شود، مقایسه شدند و فاصله‌ای که $H^*(10)$ در دو حالت با هم برابر می‌شود، فاصله‌ای است که می‌توان ادعا کرد دز مبتنی بر تابع عملکرد با قراردادن چشمه نقطه‌ای در آن فاصله، عملکردی معادل واسنجی چشمه گسترده جهتی را با ابزاری ساده و بدون دسترسی به میدان پرتویی واسنجی دارد.



شکل ۸. طیف چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ برای فاصله‌های مختلف از آشکارساز NaI(Tl).

در شکل ۵ نمودار شبیه‌سازی طیف چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ برای فاصله‌های منتخب، نشان داده شده است. شکل ۶ نمودار آهنگ دز را در فواصل مختلف برای چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷ نشان می‌دهد.

پس از محاسبه طیف و آهنگ دز، تابع عملکرد G(E) برای چشمه‌های مختلف (گسترده جهتی و نقطه‌ای) محاسبه شد که نتایج آن در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، تابع عملکرد G(E) برای چشمه‌های نقطه‌ای علاوه بر تغییر با انرژی، با تغییر فاصله نیز تغییر می‌کند.

با تغییر فاصله بین آشکارساز و چشمه نقطه‌ای، این فاصله حدود ۲۲ cm به دست می‌آید.

تطبیق آهنگ دز حاصل از ضرب ماتریس طیف (در فاصله ۲۲ cm در تابع عملکرد چشمه گسترده جهتی با آهنگ دز چشمه نقطه‌ای در شکل ۹ نمایش داده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر، با استفاده از طیف به دست آمده از داده‌های تجربی چشمه گسترده جهتی سزیم-۱۳۷ آهنگ دز با استفاده از تابع عملکرد به دست آمد که خطا در تمامی این مقایسه‌ها کمتر از ۱۵ درصد بود.

همچنین، جهت بررسی و راستی‌آزمایی هرچه بیشتر این روش، آهنگ دز برای چشمه‌های امرسیوم-۲۴۱ و کبالت-۶۰ در فاصله ۲۲ cm یک‌بار با شبیه‌سازی و بار دیگر با روش تابع عملکرد محاسبه شد (جدول ۳).

بدیهی است خطای بیشتر در انرژی پایین‌تر (امرسیوم-۲۴۱ در مقایسه با کبالت-۶۰) به دلیل غالب بودن طیف ذرات در انرژی کمتر و اثرپذیری بیشتر از جهت ورود ذرات از چشمه نقطه‌ای (تفاوت با جهت ورود در چشمه میدان پرتویی استاندارد که هم‌سو و گسترده است) به آشکارساز و عبور از لایه آلومینیومی روی آشکارساز است.

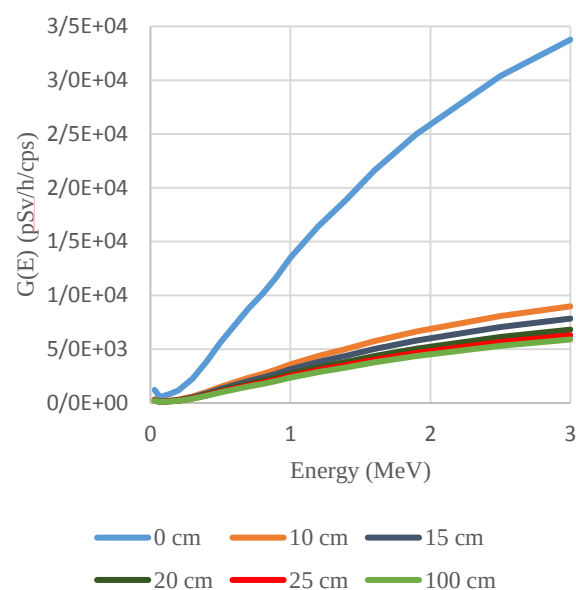
۴. نتیجه‌گیری و بحث

در این پژوهش، از طیف‌سنج NaI(Tl) با ابعاد ۲×۲ اینچ جهت دزسنجی با تابع عملکرد G(E) برای چشمه گسترده جهتی و ارائه روشی جدید برای تعیین فاصله معادل (۲۲ سانتی‌متر) با استفاده از چشمه نقطه‌ای برای کالیبراسیون آسان و کارآمد در آزمایشگاه، بدون نیاز به میدان پرتویی گسترده جهتی، استفاده شده است. لذا، وجه تمایز این پژوهش، انجام دزسنجی برای چشمه‌های نقطه‌ای است که سبب استقلال از به شرایط آزمایشگاهی می‌شود.

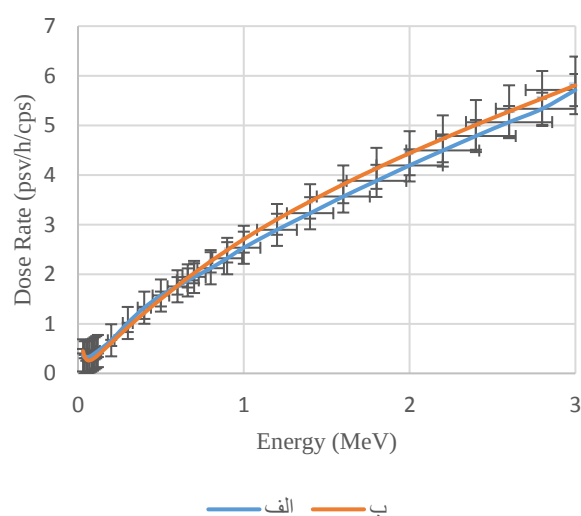
همان‌طور که اشاره شد، جهت بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از طیف‌های اندازه‌گیری شده در SSDL کرج، در تابع عملکرد چشمه گسترده جهتی ضرب شدند و مقدار آهنگ دزهای به دست آمده از آن با مقادیر تجربی آهنگ دز آن چشمه‌ها مقایسه شد. همچنین، طیف‌های تجربی با

جدول ۳. مقایسه آهنگ دز حاصل از شبیه‌سازی و روش تابع عملکرد را برای چشمه‌های امرسیوم-۲۴۱ و کبالت-۶۰ در فاصله ۲۲ cm.

چشمه	آهنگ دز حاصل از روش تابع عملکرد G(E) (pSv/h)	آهنگ دز حاصل از شبیه‌سازی (pSv/h)	خطای نسبی (%)
امرسیوم-۲۴۱	۰/۳۱	۰/۳۸	۱۸/۴
کبالت-۶۰	۳/۱۱	۳/۱۵	۱/۲



شکل ۸. نمودار توابع عملکرد G(E) در چشمه نقطه‌ای برای فاصله‌های منتخب و بر حسب انرژی.



شکل ۹. تطبیق آهنگ دز (الف) حاصل از ماتریس طیف (چشمه نقطه‌ای در فاصله ۲۲ cm) در تابع عملکرد چشمه گسترده جهتی (ب) آهنگ دز چشمه گسترده جهتی).

استفاده از تابع عملکرد محاسبه‌شده به آهنگ دز تبدیل شدند که نتایج، دقت قابل قبولی را نشان دادند.

مراجع

1. R F Mould, Med. Phys. 21(12) (1994) 1997.
2. G Knoll, "Radiation detection and measurement", John Wiley nSons, Ltd, New York (2011).
3. J A Meli, "The Physics of Radiation Dosimetry", AIP Publishing Books (2020).
4. F H Attix, "Topics in Radiation Dosimetry", Elsevier (2013).
5. S Moriuchi, I Miyanaga, Health phys. 12(4) (1966) 541.
6. M Sommer, A Jahn, J Henniger, Radiat. Meas. 46(12) (2011) 1818.
7. H Dombrowski, Radiat. Protec. Dos., 160(4) (2014) 269.
8. R Casanovas, E Prieto, M Salvadó, Appl. Radiat. and Isotop. 118 (2016) 154.
9. F H Attix, "Introduction to radiological physics and radiation dosimetry", John Wiley & Sons (2008).
10. W Yudong, L Xiaobing, Z Chi, Z Rong, Y Chaowen, J. Instrum. 13(6) (2018) 6004.
11. Y Y Ji, K H Chung, W Lee, D W Park, M , Kang, Radiat. Phys. and Chem. 97 (2014) 172
12. C Y Yi, J S Jun, H S Chai, J J Oh, J Y Yun, Radiat. Protec. Dos. 74(4) (1997) 273.
13. J S Jun, C Y Yi, H S Chai, H Cho, J. Kor, Phys. Soc. 28(6) (1995) 716