

طراحی مفهومی سیستم اندازه‌گیری غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید

محسن شریف‌زاده*

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کدپستی: ۱۴۳۹۵۱۱۱۳، تهران-ایران

*Email: mssharifzadeh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۸ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۷

چکیده

یکی از مراحل مهم در چرخه سوخت هسته‌ای غنی‌سازی اورانیم است. ضروری است در مسیر رسیدن به اورانیم با غنای موردنظر تأسیسات، فرایندهای کنترلی با استفاده از اندازه‌گیری مستمر صورت پذیرد. از طرفی به سبب قرارگیری در محیط با پرتوهای خارجی بالا و نیز مستعد برای پرتوگیری داخلی اپراتور به ویژه هنگام کار با پودر اورانیم ضروری است از ابزار دقیق با توانایی مانیتورینگ آنلاین و مداوم استفاده گردد که ابزار دقیق هسته‌ای جایگاه ویژه‌ای در این بین ایفا می‌کند. در این کار تحقیقاتی بر آن شدیم تا بر روی طراحی مفهومی سیستم اندازه‌گیری درصد غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید درون مخازن بارگیری و جابه‌جایی موجود در صنعت هسته‌ای کار کنیم. بدین‌منظور و با هدف کاستن از هزینه‌ها و در عین حال حذف حداکثری خطای شمارش تمرکز بر روی خوانش صرفاً پرتوهای گامای گسیلی از پودر و یا همراه با چشمه رادیواکتیو جانبی موردنظر قرار گرفت. اساس طراحی بر بهینه‌سازی مکان هندسی آشکارساز / آشکارسازهای سوسوزن اطراف مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید به‌منظور داشتن بیشینه دقت در اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار مونت کارلو نشان می‌دهد به‌ازای درصدهای مختلف غنا و نیز ارتفاع‌های مختلف پودر اورانیم درون مخزن استوانه‌ای قادریم در زوایای خاص بیشینه دقت را در اندازه‌گیری دو پارامتر درصد غنا و وزن پودر داشته باشیم.

کلیدواژه‌ها: اورانیم، اورانیم تترافلوراید، توزین، غنا، طراحی مفهومی، اندازه‌گیری

Conceptual design of uranium tetrafluoride powder richness and weight measurement system

M. Sharifzadeh*

Radiations Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 1439951113, Tehran – Iran

Research Article

Received: 18.6.2023, Revised: 18.9.2023, Accepted: 18.9.2023

Abstract

One of the key steps in the nuclear fuel cycle is uranium enrichment. It is essential to control processes using continuous measurement on the way to uranium with the desired enrichment of the facility. On the other hand, due to being in an environment with high external radiation and also suitable for internal exposure of the operator, especially when working with uranium powder, it is necessary to use accurate instruments with the ability to monitor online and continuously, which is a special place in nuclear instrumentation. In this work, we worked on a conceptual design of the enrichment and weight measurement system for uranium tetrafluoride powder in loading and handling tanks. This is in the nuclear industry. To reduce costs while eliminating maximum counting errors, only gamma rays emitted from powder or with radioactive lateral sources were considered. The design was based on geometric location optimization of scintillating detector/detectors around the tank containing uranium tetrafluoride powder to have maximum measurement accuracy. The simulation results in Monte Carlo software show that for different enrichment percentages and different heights of uranium powder inside the cylindrical tank, we can have the greatest accuracy in measuring two parameters, enrichment percentage and powder weight at specific angles.

Keywords: Uranium, Uranium tetra fluoride, Weighing, Richness, Conceptual design, Measurement



۱. مقدمه

غنی‌سازی اورانیم به‌عنوان یکی از بخش‌های حساس در فناوری تولید سوخت هسته‌ای خودنمایی می‌کند. در این بین و به‌منظور حصول اطمینان از نتایج مطلوب و در عین حال رعایت مسئله پادمانی ضروری است در مسیر رسیدن به اورانیم با غنای موردنظر تأسیسات، فرایندهای کنترلی با استفاده از اندازه‌گیری مستمر صورت پذیرد. در عمل و به‌سبب پرتوایی خارجی بالا و نیز شرایط مساعد در افزایش پرتوگیری داخلی پرسنل در این تأسیسات ضروری است در حد امکان از سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ از راه دور استفاده کرد. ابزار دقیق هسته‌ای با توانایی مانیتورینگ آنالین و مداوم جایگاه ویژه‌ای در این بین ایفا می‌کند. در پژوهشی توسط مورل و همکاران (۱۹۹۸) پردازش بر روی ناحیه انرژی شامل طیف‌های مشخصه ایزوتوپ‌های اورانیم-۲۳۵ و اورانیم-۲۳۸ و نیز تابش فلورسانس اشعه ایکس القایی ناشی از پرتوهای بالاتر از ۱۰۰ کیلوکلوکرون-ولت مورد توجه قرار گرفت و فرایندی به نام "URADOS" براساس این اصل توسعه یافت که در آن از شش استاندارد اکسید اورانیم با غنای مختلف و ضخامت‌های بی‌نهایت برای انجام آزمایش استفاده شد [۱]. در یک کار تحقیقاتی دیگر یوسل و همکاران (۲۰۰۹) از روش آنالیز پرتو گاما چند گروهی بر روی مواد هسته‌ای شامل اورانیم تهی‌شده، طبیعی و غنی‌شده در محدوده ۰.۳۲٪ تا ۴.۵۱٪ استفاده کردند. نتایج نشان دادند که تجمع تابش‌های ناشی از محصولات واپاشی کاملاً چشمگیر بوده و با استفاده از الگوریتم‌های مناسب بایستی این اثرات جهت محاسبه دقیق درصد غنا موردنظر قرار گیرند [۲]. روتر و همکاران (۲۰۰۱) بر روی توسعه روش اندازه‌گیری غنای اورانیم با استفاده از به‌کارگیری آشکارسازهای ژرمانیم با خلوص بالا کار کردند که نیازی به کالیبراسیون نخواهد داشت [۳]. اسپرینکل و همکاران (۱۹۹۷) روند توسعه نرم‌افزاری را بر روی داده‌های سخت‌افزار کوچک‌تر و سبک شامل تحلیل‌گر چندکاناله و آشکارسازهای حفاظ‌گذاری‌شده مورد توجه قرار دادند و با موفقیت تجاری‌سازی کردند. این نرم‌افزار با استفاده از افزایش تعداد آزمایشات توسعه داده شد به‌گونه‌ای که با روش‌های تحلیل پیچیده قادر به اندازه‌گیری غنای با وضوح متوسط و عملکرد پاسخ مناسب باشد [۴]. در پژوهشی که توسط همل و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفت، بر روی تشخیص نوترون‌ها و پرتوهای گامای ناشی از شکافت القایی در اورانیم با غنای بالا تمرکز شد. با توجه به نرخ تابشی پایین نوترون و نیز تضعیف سریع پرتوهای گامای گسیلی از ذرات اورانیم غنی‌شده به‌دلیل

انرژی پایین، بر روی توسعه ابزار تصویرگر دوزهای^۱ همراه با یک ژنراتور نوترونی دوتریم-تریتم قابل حمل جهت آشکارسازی ذرات نوترون و گامای ناشی از شکافت القایی در اورانیم با غنای بالا کار شد [۵]. کوروب و همکاران (۲۰۰۶) روشی ساده برای تعیین غنای اورانیم با استفاده از طیف‌سنجی گاما با وضوح بالا را ارائه دادند. این روش تنها بر احتمالات گسیل پرتو گاما در دو ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ و پروتکتینیوم-۲۳۴ برانگیخته و به‌کارگیری یک روش تکراری برای برازش حداقل مربعات یک چندجمله‌ای بر روی مجموعه‌ای از داده‌های تجربی استوار بود [۶]. چوی و همکاران (۲۰۱۸) بر روی نوعی مشخصه‌یابی ساده از نمونه‌های اورانیم با استفاده از طیف‌نگاری پرتوهای ایکس و گاما کار کردند. این نمونه‌های مورد مطالعه شامل ۸ نوع اورانیم-۲۳۵ با غنای واقع در محدوده ۱٪ تا ۹۷٪ درصد بودند که در مدت زمان ۲۴ ساعت با استفاده از آشکارساز ژرمانیم مسطح با خلوص و رزولوشن بالا مورد شمارش قرار گرفتند. با استفاده از آنالیز قله انرژی طیف گسیلی کالیبره و در ادامه درصد غنا محاسبه گردید [۷].

در کار تحقیقاتی صورت گرفته توسط مک‌فران و همکاران (۲۰۲۰) تأثیرات پارامترهایی نظیر زمان بین پرشدن و اندازه‌گیری، تاریخچه قبلی محتوای مخزن، توزیع ترکیب اورانیم هگزافلوراید درون مخزن، و موقعیت زاویه‌ای آشکارساز بر سطح زیر پیک ۱۸۵ کیلو الکترون‌ولت مورد بررسی قرار گرفت [۸]. در پژوهشی دیگر کیم و همکاران با تمرکز بر شمارش با رزولوشن بالای سطح زیر پیک ۱۸۵ کیلو الکترون‌ولت و نیز شمارش تمام عناصر اورانیم با کمک تکنیک فلورسانس میکروایکس تک‌انرژی^۲ توانستند در مدت زمان کوتاه نمونه حاوی ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ را آنالیز کنند [۹]. در یک کار تحقیقاتی که توسط خالد و همکاران (۲۰۱۹) صورت پذیرفت بر روی دو نمونه تری‌اورانیم اکتوکسید و اورانیم دی‌اکسید مطالعه شد. گاما‌های ساطع‌شده از این نمونه‌ها با استفاده از آشکارساز با خلوص بالا و تخت ژرمانیم شمارش و به‌منظور اندازه‌گیری غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ به‌کار گرفته شد [۱۰]. در شمارش سطح زیرقلم‌های انرژی گامای مشخصه گسیلی از ایزوتوپ‌های اورانیم و دختران آن‌ها برخی از پارامترها تأثیرگذارند که از جمله می‌توان به بازه زمانی بین پر و خالی‌شدن‌های متوالی مخزن، تاریخچه مربوط به پرشدگی‌های قبلی آن، توزیع هندسی پودر درون مخزن، و نیز محل اندازه‌گیری و شمارش در طول مخزن و



مطابق با جدول ۱ عمق مؤثر در شمارش برای یک کره متقارن حاوی پودر اورانیم محاسبه شده است.

۱.۲ شبیه‌سازی مونت کارلو

هندسه مورد استفاده در این مقاله شامل یک مخزن استوانه‌ای از جنس استیل با ارتفاع ۱ متر و شعاع بیرونی ۲۳ سانتی‌متر و ضخامت دیواره ۵ میلی‌متر برای ذخیره‌سازی پودر اورانیم تترافلوراید مورد استفاده قرار گرفت. پودر مذکور در غناهای مختلف ۰.۷٪ (اورانیم طبیعی)، ۳.۵٪، ۵٪، ۲۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ از ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ و به‌ازای ارتفاع‌های مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ورودی کد محاسباتی MCNP داده شد. پرتوهای گامای ساطع‌شده از دو ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ و اورانیم-۲۳۴ شامل انرژی‌های ۱۳، ۶۶، ۱۴۳ و ۱۸۳ کیلوالکترون‌ولت با استفاده از داده‌های جدول ۲ به‌ازای مقادیر مختلف درصد غنای اورانیم-۲۳۵ در کارت داده شبیه‌سازی مونت کارلو لحاظ گردید [۱۲].

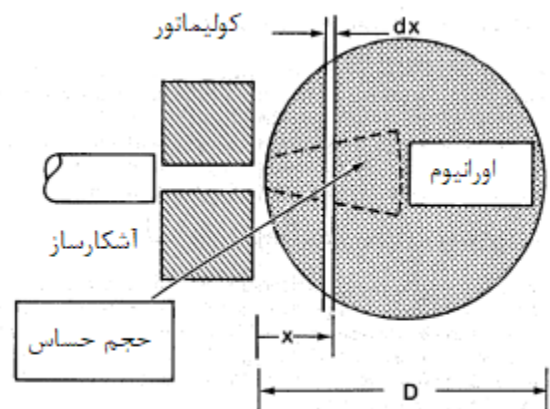
در این شبیه‌سازی‌ها و با هدف بررسی تغییرات شمارش حول استوانه در زوایای مختلف، تعداد ۱۰ عدد آشکارساز سوسوزن در زوایای ۰ تا ۹۰ درجه و با گام زاویه‌ای ۱۰ درجه اطراف مخزن تعریف گردید. شماتیکی از چینش آشکارسازهای سوسوزن حول مخزن در شکل ۲ نشان داده شده است.

سهم بالایی از اعداد تصادفی تولیدی به ذرات اورانیم درون مخزن و در عمق‌های بیشتر از مقدار پویش آزاد میانگین تابش گسیلی اختصاص می‌یابد که عملاً به‌واسطه خودجذبی پودر و نیز جذب در ضخامت استیل مخزن نمی‌تواند وارد آشکارساز گردد. در خوانش پرتوها صرفاً تابش‌های گسیلی درون استوانه فرضی هم‌مرکز با مخزن استوانه‌ای نگهداری پودر و با اختلاف شعاعی برابر با بیشینه عمق قابل خروج پرتوها توانایی ورود به آشکارساز را خواهند داشت. در خوانش پرتوها صرفاً تابش‌های گسیلی درون استوانه فرضی هم‌مرکز با مخزن استوانه‌ای نگهداری پودر و با اختلاف شعاعی برابر با بیشینه عمق قابل خروج پرتوها توانایی ورود به آشکارساز را خواهند داشت. لذا، با هدف کاستن از واریانس از چنبره‌های با مقطع دایروی مطابق با شکل ۳ به‌جای آشکارسازهای کوچک واقع در زاویه قطبی متناظر استفاده گردید.

یا زاویه قرارگیری پیرامون آن اشاره کرد. تلفیق پارامترهای فوق سبب می‌شود تا با یک عدم قطعیت بالا در طیف گامای گسیلی روبه‌رو باشیم. در این کار تحقیقاتی با فرض این‌که مخزن پیش از این خالی بوده و پودر در توزیعی همگن ارتفاع مشخصی از مخزن را پر کرده باشد مطالعه بر روی بررسی امکان اندازه‌گیری غنا و وزن پودر حاوی ذرات اورانیم درون مخزن انجام گرفت. هدف طراحی مفهومی سیستم اندازه‌گیری درصد غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید درون مخازن بارگیری و جابه‌جایی موجود در صنعت هسته‌ای است. به‌منظور ارائه سیستمی با حداقل هزینه ساخت و در عین حال با دقت مناسب و با توجه به آنچه از مطالعه کارهای صورت‌گرفته توسط دیگران دستگیرمان شد بر آن شدیم تا بر روی خوانش صرفاً پرتوهای گامای گسیلی از پودر موردنظر تمرکز کنیم. اساس این طراحی بر بهینه‌سازی مکان هندسی آشکارساز / آشکارسازهای سوسوزن اطراف مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید به‌منظور داشتن بیشینه دقت در اندازه‌گیری استوار است. نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار مونت کارلو نشان می‌دهد به‌ازای درصدهای مختلف غنا و نیز ارتفاع‌های مختلف پودر اورانیم درون مخزن استوانه‌ای قادریم در زوایای خاص بیشینه دقت را در اندازه‌گیری دو پارامتر درصد غنا و وزن پودر داشته باشیم.

۲. روش کار

اساساً به‌دلیل این‌که انرژی پرتوهای گامای گسیلی از پودر اورانیم تترافلوراید پایین است، تنها بخشی از پرتوهای گامای گسیلی توان فرار از خودجذبی در پودر و در ادامه جذب توسط دیواره مخزن نگهداری را خواهند داشت (شکل ۱).



شکل ۱. چینش کلی در یک سیستم اندازه‌گیری غنا و وزن مخزن حاوی نمونه اورانیم. با وجود بزرگ‌نمایی در این تصویر، عمق قابل مشاهده اورانیم بسیار کوچک‌تر از ابعاد مخزن می‌باشد [۱۱].



جدول ۱. پوشش آزاد میانگین و عمق مؤثر در شمارش گامای ۱۸۶ کیلو الکترون‌ولت به‌زای ترکیبات مختلف اورانیم [۱۱]

ترکیب حاوی اورانیم	چگالی (گرم بر سانتی مترمکعب)	پوشش آزاد میانگین (سانتی‌متر) ^۱	ضخامت نامتناهی (سانتی‌متر) ^۲
فلز	۱۸٫۷	۰٫۰۴	۰٫۲۶
اورانیم هگزافلوراید (جامد)	۴٫۷	۰٫۲۰	۱٫۴۳
اورانیم دی‌اکسید (متخلخل)	۱۰٫۹	۰٫۰۷	۰٫۴۹
اورانیم دی‌اکسید (پودر)	۲٫۰	۰٫۳۹	۲٫۷۵
تری‌اورانیم اکتوآکسید (پودر) ^۳	۷٫۳	۰٫۱۱	۰٫۷۴
اورانیم نیترات	۲٫۸	۰٫۴۳	۳٫۰۴

۱: معادل با عکس ضریب تضعیف جرمی است.
 ۲: برابر با ۷ پوشش آزاد میانگین
 ۳: پودر با بسته‌بندی فوق چگال

جدول ۲. فراوانی درصدی انرژی‌های گامای گسیلی از پودرهای اورانیم با غناهای مختلف

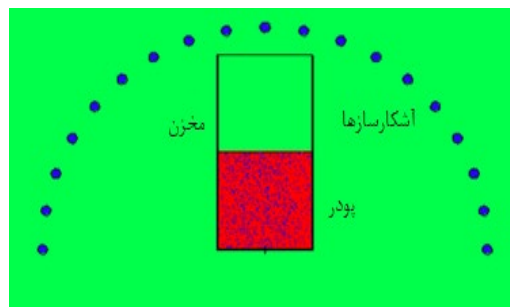
فراوانی درصدی انرژی‌های مختلف گامای گسیلی از پودر اورانیم تترافلوراید

غنا اورانیم-۲۳۵	۱۳ کیلو الکترون‌ولت	۶۶ کیلو الکترون‌ولت	۱۴۳ کیلو الکترون‌ولت	۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت
۰٫۷	۹۸٫۴۵	۱٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۴
۳٫۵	۹۶٫۵۸	۱٫۰۵	۰٫۳۹	۱٫۹۸
۵	۹۵٫۵۹	۱٫۰۳	۰٫۵۵	۲٫۸۳
۲۰	۸۵٫۶۱	۰٫۸۷	۲٫۲	۱۱٫۳۲
۶۰	۵۹	۰٫۴۴	۶٫۶	۳۳٫۹۶
۹۰	۳۹٫۰۵	۰٫۱۱	۹٫۹	۵۰٫۹۴

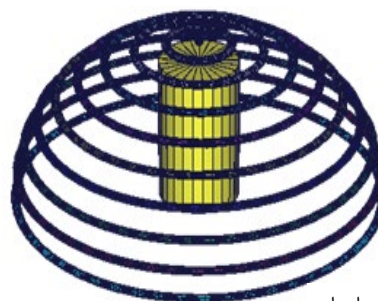
با توجه به تقارن زاویه سمتی مسئله در راستای کاهش واریانس مربوط به داده‌های خوانشی آشکارسازها این کار صورت گرفت که به‌واسطه میانگین‌گیری اعمال شده در ۱۸۰ درجه تا حدود زیادی در رسیدن به دقت‌های مطلوب راهگشا بود. تعداد ذرات تولیدی (nps) برای انجام شبیه‌سازی با دقت زیر ۱٪ برابر با ۱۰۰ میلیون و تالی مورد استفاده f8 و پیک شمارشی موردنظر انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت مربوط به ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ بود.

۲.۲ محاسبات تحلیلی

در ارتباط با صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با نتایج داده‌گیری تجربی، به‌دلیل عدم وجود هرگونه سیستم غناسنجی و توزین پودر اورانیم تترافلوراید انتقالی در داخل کشور و نیز کار در شرایط خطرناک از نظر امکان استنشاق پودر و بالتبع دزگیری داخلی در حال حاضر این امکان فراهم نیست. با توجه به تمرکز این مطالعه بر روی امکان‌سنجی ساخت چنین سیستمی برای رفع نیاز صنعت هسته‌ای کشور و این‌که مخازن به کار گرفته شده استوانه‌های آهنی با ابعاد خاص بودند که در هیچ‌کدام از مقالات مرجع یافت نشدند امکان بهره‌گیری از نتایج مقالات منتشره دیگران برای صحت‌سنجی نتایج نیز وجود



شکل ۲. چینش آشکارسازهای سوسوزن حول مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید جهت بررسی زاویه بهینه جهت اندازه‌گیری دقیق غنا و وزن پودر با استفاده از خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر.



شکل ۳. چینش چنبره‌های معادل آشکارسازهای سوسوزن حول مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید جهت بررسی زاویه بهینه جهت اندازه‌گیری دقیق غنا و وزن پودر با استفاده از خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر.



شار گسیلی پرتوهای گاما با انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت، n_{183} که قابلیت شمارش توسط آشکارساز را دارند بدون ملاحظات مربوط به تضعیف درون پودر از رابطه ۱ به دست خواهد آمد:

$$dN' = n \times f_{enrichment}^{183keV} \times \frac{d\Omega}{4\pi} \times \epsilon_{int} \times dv \quad (1)$$

که در آن n شار گسیلی به‌زای کل انرژی‌های موجود در جدول ۲، $f_{enrichment}^{183keV}$ کسری از این پرتوهای گاما است که در غنای مشخص و با انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت گسیل شده‌اند.

ϵ_{int} بازده ذاتی آشکارساز است و متغیرهای $\frac{d\Omega}{4\pi}$ به‌عنوان کسری از پرتوهای گسیلی که قابلیت گسیل به سمت آشکارساز را دارند و dV به‌عنوان حجم دیفرانسیلی در مختصات قطبی استوانه‌ای مطابق با روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه هستند:

$$\frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{A_{detector} \times \cos\theta}{4\pi r^2} \quad (2)$$

$$dV = \rho \times d\rho \times d\varphi \times dz \quad (3)$$

در این روابط $A_{detector}$ مساحت قاعده آشکارساز، r و θ به‌ترتیب فاصله و زاویه قرارگیری آشکارساز نسبت به این دیفرانسیل حجمی، ρ فاصله این حجم تا محور z ، $d\varphi$ و dz نیز ابعاد این حجم در دو جهت زاویه سمتی و محور استوانه است. در ادامه و با استفاده از معادله ۴ خواهیم داشت:

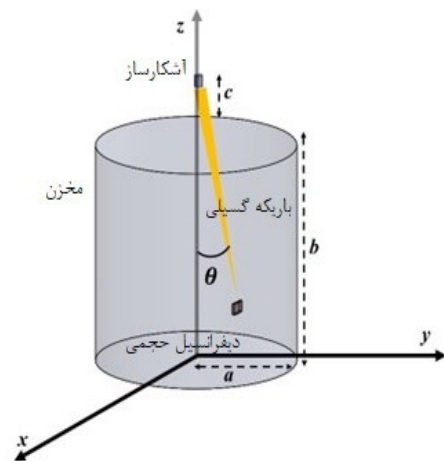
$$\frac{\cos\theta}{r^2} = \frac{b+c-z}{\{\rho^2 + (b+c-z)^2\}^{3/2}} \quad (4)$$

فاکتور تضعیف پرتوهای گاما درون بخشی از پودر که در مسیر حرکت آن‌ها به سمت آشکارساز قرار دارد به‌صورت معادله ۵ قابل محاسبه است:

$$\xi_{attenuation} = e^{-\mu_{powder} \times l_{attenuation}} \quad (5)$$

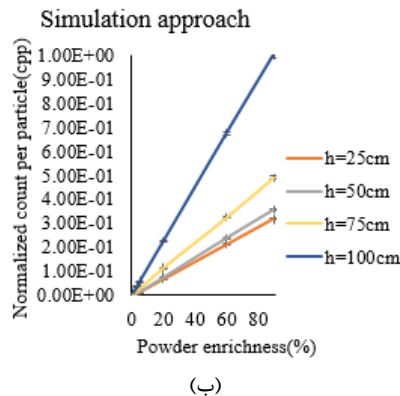
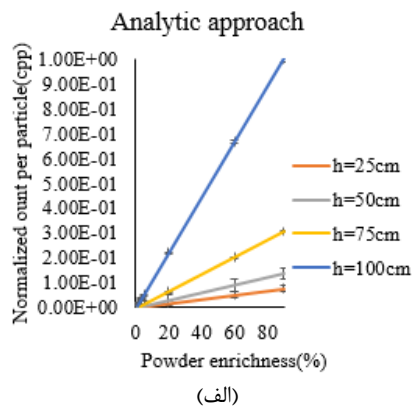
متغیر $l_{attenuation}$ برابر با طول پاره‌خط واصل دیفرانسیل حجمی به محل برخورد با سطح پودر درون مخزن به ارتفاع h و در امتداد خط واصل این حجم به محل قرارگیری آشکارساز در

نداشت. گزینه منطقی مورد استفاده جهت صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی می‌تواند محاسبات تحلیلی باشد که پس از برخی ساده‌سازی‌ها قابل کاربرد خواهد بود. خاطرنشان می‌سازد به‌سبب پیچیدگی زیاد در نوع برهم‌کنش‌ها و نیز سهم خوانش آشکارساز از فوتون‌های متأثر از عبور بدون برهم‌کنش و یا برهم‌کنش‌های متوالی پراکندگی، علی‌الاصول این فرض که محاسبات تحلیلی در تمام این شرایط قابل ارائه باشد نه تنها غیرممکن است بلکه انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو را بدون توجه می‌کند. بنابراین در یک وضعیت خاص تلاش شد تا فرمولاسیون قابل‌قبول و منطقی برای مسئله خوانش گامای زیر فوتوپیک ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت ارائه و نتایج با داده‌های شبیه‌سازی مقایسه گردد. بدین‌منظور در زاویه ۹۰ درجه در امتداد محور مخزن استوانه‌ای، به‌زای ارتفاع پودرهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر روند تغییرات شمارش به‌زای درصد غنای مختلف پودر محاسبه و با نتایج مشابه شبیه‌سازی مقایسه گردید. هم‌خوانی روند کلی تغییرات شمارش به‌زای پارامترهای مختلف ارتفاع و غنای پودر بین تحلیل و شبیه‌سازی به‌عنوان معیاری برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی و در ادامه استناد به نتایج شبیه‌سازی در سایر زوایا با هدف دست‌یابی به موقعیت بهینه آشکارساز در زوایای مختلف موردنظر قرار گرفت. مدل مورد استفاده در این بخش آن‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است یک استوانه به شعاع داخلی a و ارتفاع b به‌عنوان مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید است که درون آن بخشی از تابش‌های گسیلی از یک حجم دیفرانسیلی dV که توان رسیدن به آشکارساز واقع در ارتفاع c بالای مخزن و بر روی محور Z را دارد نشان داده شده است.



شکل ۴. مدل ریاضی مورد استفاده در محاسبات تحلیلی جهت برآورد نرخ خوانش آشکارساز واقع در ارتفاع c بالای مخزن حاصل از گسیل و تضعیف پرتوهای گاما از تمام حجم پودر درون مخزن به شعاع a و ارتفاع h .





شکل ۵. تغییرات شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت در زاویه ۹۰ درجه حول مخزن حاوی مقادیر مختلف درصد غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ و ارتفاع پودر اورانیم تترافلوراید، الف) حاصل از محاسبات تحلیلی، ب) حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

آن‌گونه که از نمودار شکل ۵ پیداست با وجود تقریب‌های مربوط به عدم ملاحظات مربوط به تابش‌های پراکنده و نیز اجتناب از حل معادلات انتگرالی پیچیده‌تر مربوط به زوایای کوچک‌تر از ۹۰ درجه در محاسبات تحلیلی، این محاسبات در دو بخش اساسی از هم‌خوانی مطلوب با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو برخوردارند. بخش نخست مربوط به ترتیب مقادیر نرخ شمارش در یک غنای مشخص به‌ازای ارتفاع‌های مختلف است که در هر دو شکل ۵-الف و ۵-ب رفتاری یکسان را دارد. در مورد بخش دوم نیز شاهد رفتار خطی مشابه در مورد تابع تغییرات نرخ شمارش به‌ازای درصد غنا در یک ارتفاع مشخص در هر دو شکل ۵-الف و ۵-ب هستیم. با توجه به هم‌خوانی بین نتایج محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی می‌توان به سایر نتایج خروجی کد محاسباتی MCNP مورد استفاده در این پژوهش در زوایای دیگر با هدف دستیابی به چینش زاویه‌ای بهینه آشکارساز حول مخزن اعتماد کرد.

زاویه ۹۰ درجه بر روی محور Z است که پس از یک سری محاسبات ریاضی به‌صورت معادله ۶ نشان داده می‌شود:

$$l_{attenuation} = \sqrt{\rho^z \left(1 - \frac{h-b-c}{z-b-c}\right)^z + (z-h)^z} \quad (6)$$

پارامتر μ_{powder} ضریب تضعیف خطی پودر در انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت است که پس از درون‌یابی از مقادیر ضریب تضعیف جرمی استخراج‌شده از مقاله مرجع هابر و سلزر [۱۳] و ضرب کردن آن در چگالی پودر اورانیم تترافلوراید برابر با ۸٫۹۹۶ بر سانتی‌متر محاسبه گردید. در نهایت و با انتگرال‌گیری معین مطابق با معادله ۷ امکان محاسبه نرخ شمارش گامای با انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت به‌ازای هر ذره و در غنا و ارتفاع مشخص فراهم گردید:

$$Count\ per\ particle\ (cpp) = \frac{(n.f.^{183\ keV}_{enrichment} \cdot \epsilon_{int} \cdot A_{detector})}{4\pi} \times \int_0^{2\pi} d\phi \int_{z_c=(b+c)}^a \int_0^{\rho} \frac{\rho \cdot e^{-\mu_{powder} \cdot \left(\frac{b+c-z-z_c}{b+c-z}\right) \cdot \sqrt{\rho^z + (b+c-z)^z}}}{\{\rho^z + (b+c-z)^z\}^{z/2}} d\rho \times (b+c-z) dz \quad (7)$$

از آن‌جا که مقایسه تغییرات نرخ شمارش بین داده‌های

تحلیلی و شبیه‌سازی موردنظر است لذا مقدار ϵ_{int} برابر با ۱ و $A_{detector}$ نیز ۵٫۰۶ لحاظ گردید. با توجه به این‌که داده‌های شبیه‌سازی برحسب نرخ شمارش بر ذره گزارش می‌شود پارامتر n را برابر با ۱ در نظر گرفتیم.

۳. نتایج

۳.۱ نتایج صحت‌سنجی

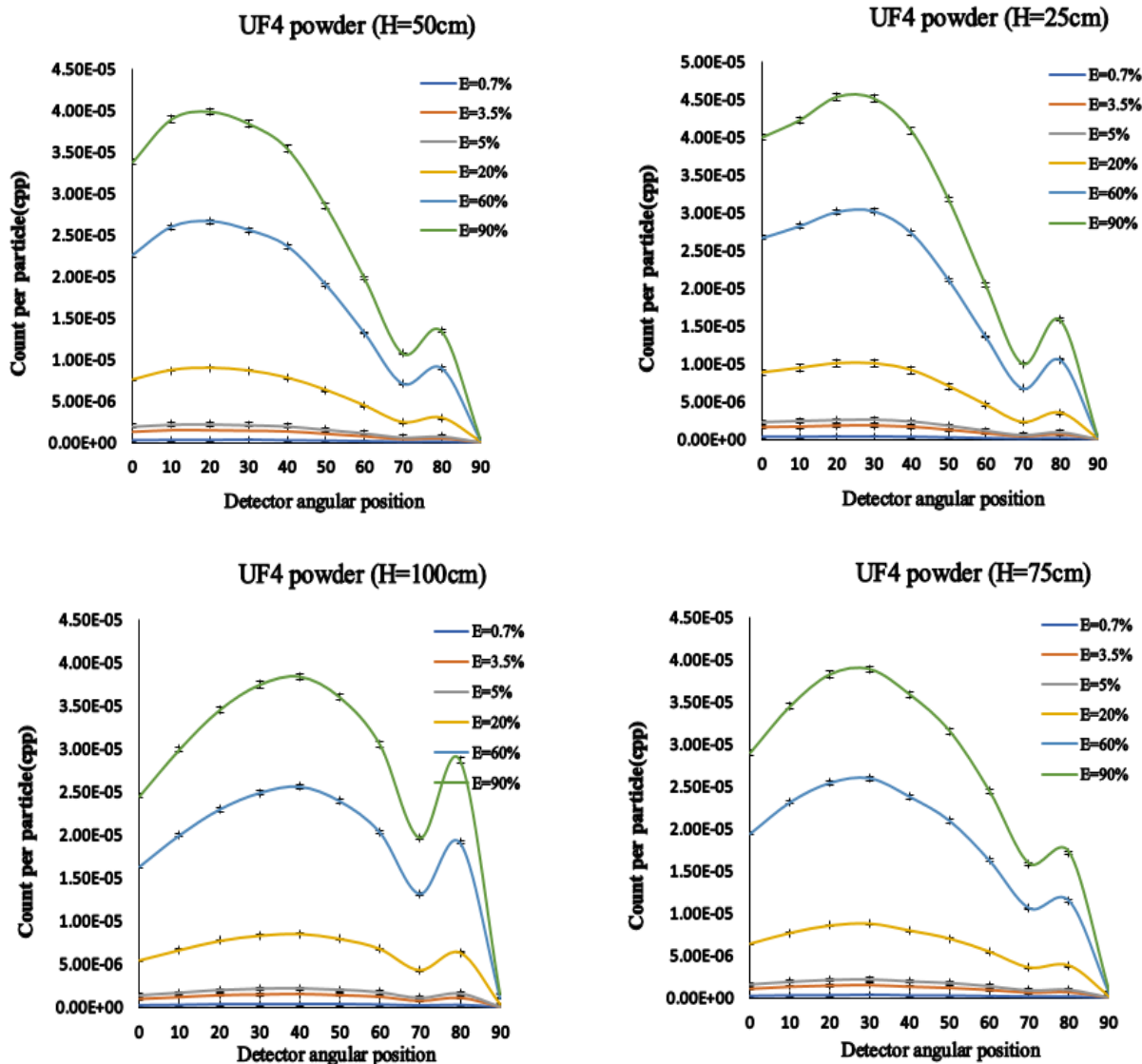
نتایج مربوط به تغییرات نرخ شمارش به‌ازای هر فوتون گاما حاصل از واپاشی، ثبت‌شده توسط آشکارساز سوسوزن واقع در امتداد محور مخزن استوانه‌ای حاوی پودر اورانیم تترافلوراید در غنا و ارتفاع‌های مختلف پودر در قیاس با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو با کد MCNP در شرایط مشابه در شکل ۵ نشان داده شده است.



هستیم که به معنای ارتقای توان تفکیک سیستم شمارشی پیشنهادی است اما در ادامه و با افزایش ارتفاع پودر با کاهش نرخ شمارش در این موقعیت و بالتبع کاهش توان تفکیک به سبب افزایش خودجذبی روبه‌رو می‌شویم. البته همان‌گونه که پیدا است در ادامه و با افزایش ارتفاع پودر، آشکارسازهای واقع در موقعیت‌های با زاویه بزرگ‌تر با افزایش نرخ شمارش به سبب غلبه بیشتر بر خودجذبی به‌واسطه حضور مقادیر بیشتری از پودر اکتیو در مسیر چشمه و آشکارساز مواجه خواهند شد که منجر به بالا آمدن هرچه بیشتر بخشی از نمودار که بین دو زاویه ۳۰ و ۸۰ درجه واقع است می‌گردد.

۲.۳ نتایج شبیه‌سازی واحد غناسنج

پس از صحت‌سنجی کد MCNP نتایج شبیه‌سازی جهت مقایسه و بررسی حساسیت چینش آشکارسازها حول مخزن حاوی پودر اورانیوم تترافلوراید به درصد غنای ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ و نیز ارتفاع‌های مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متری پودر ترسیم و در شکل ۶ نشان داده شد. همان‌گونه که از شکل مشهود است به‌ازای ارتفاع‌های مختلف پودر، با افزایش زاویه قطبی محل قرارگیری آشکارساز سوسوزن با دو بیشینه نسبی نرخ شمارش حول موقعیت‌های زاویه‌ای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۸۰ درجه حول مخزن مواجه هستیم. با افزایش ارتفاع پودر درون مخزن در ابتدا با یک افزایش نرخ شمارش و نیز اختلاف در نرخ شمارش‌های مربوط به مقادیر درصدی غنای متوالی مواجه

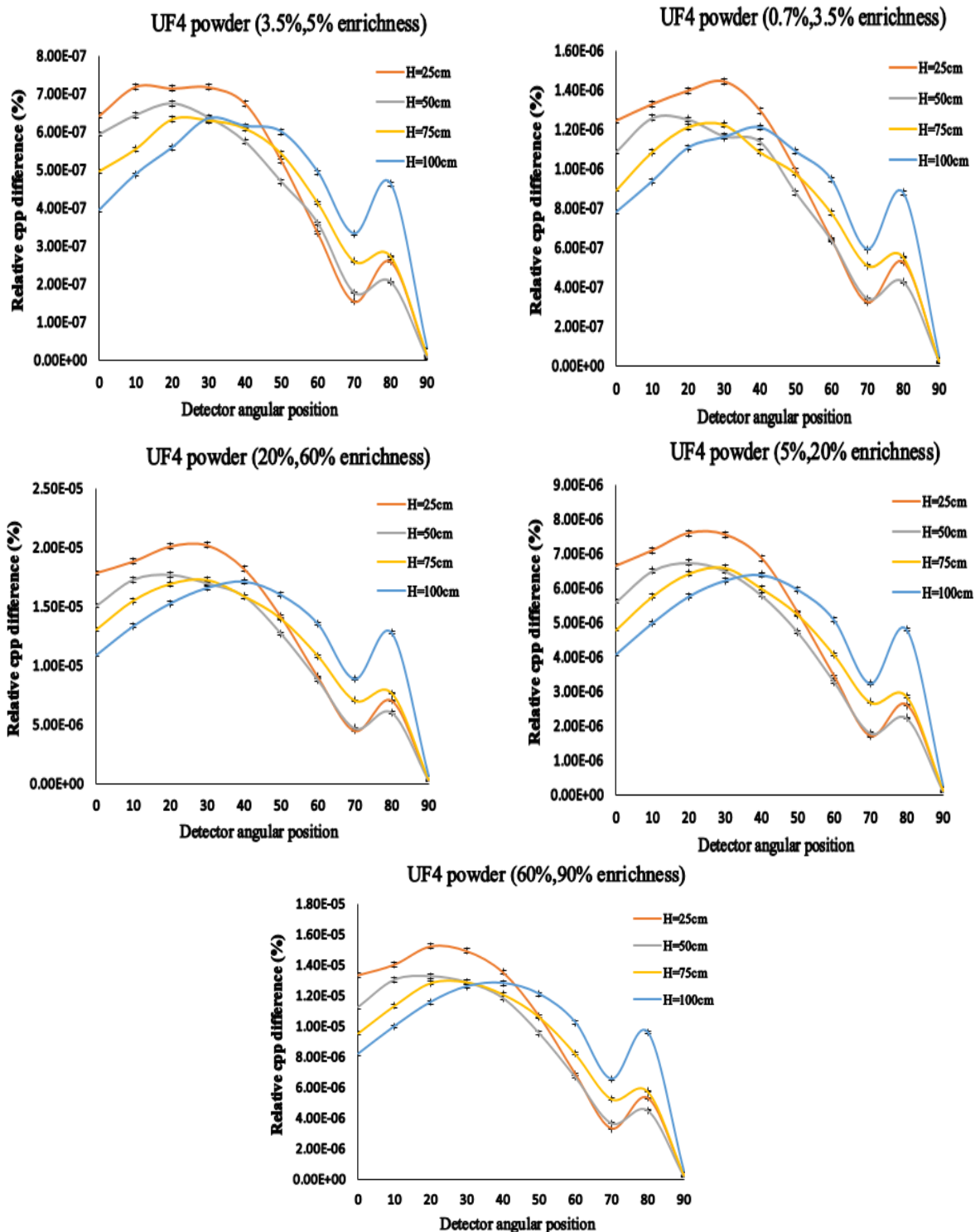


شکل ۶. تغییرات شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت نسبت به زوایای قطبی مختلف حول مخزن حاوی مقادیر مختلف درصدغنیای ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ و ارتفاع پودر اورانیوم تترافلوراید.



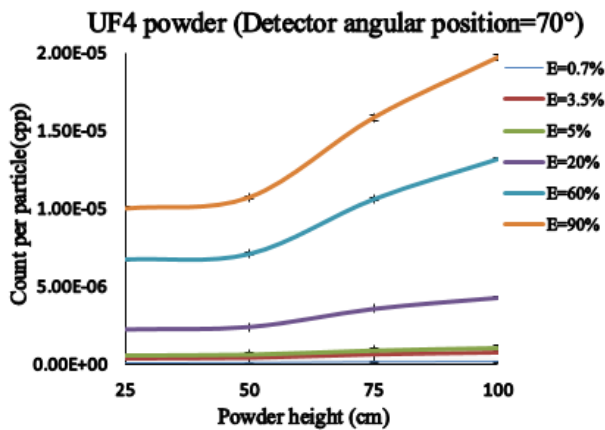
اختلاف شمارش به‌ازای درصدهای غنای متوالی و ارتفاع‌های مختلف در شکل ۷ قابل مشاهده است.

مقادیر نرخ شمارش در ازای ارتفاع کمینه ۲۵ سانتی‌متری پودر درون مخزن بیشترین مقدار ممکن را به خود اختصاص می‌دهد و بالتبع مقادیر اختلاف شمارش متناظر با درصدهای غنای متوالی در این وضعیت بیشینه است. نمودارهای تغییرات

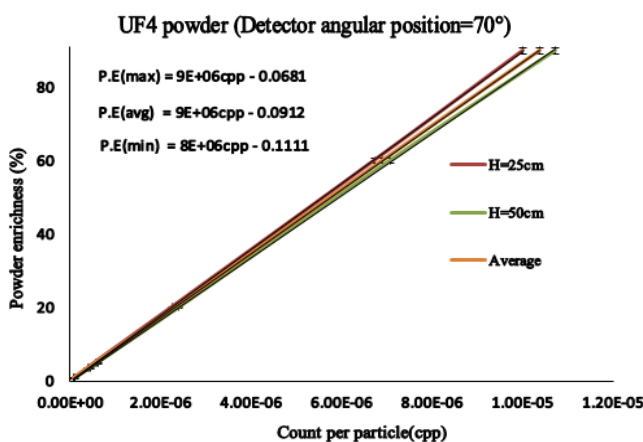


شکل ۷. تغییرات اختلاف نرخ شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت به ازای درصدهای غنای متوالی ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ در زوایای قطبی حول مخزن حاوی ارتفاع‌های متفاوت پودر اورانیم تترافلوراید.





شکل ۸. تغییرات شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون ولت نسبت به زاویه قطبی ۷۰ درجه حول مخزن حاوی مقادیر مختلف درصد غنای ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ و ارتفاع پودر اورانیوم تترافلوراید.



شکل ۹. تغییرات درصد غنای ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ برحسب شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون ولت به ازای ارتفاعهای مختلف پودر اورانیوم تترافلوراید در زاویه قطبی ۷۰ درجه حول مخزن.

۳.۳ واحد توزین (ارتفاع سنج)

همان گونه که از نمودار شکل ۸ مشخص گردید در یک درصد غنای مشخص با تغییر در ارتفاع پودر درون مخزن تغییرات ملموسی در نرخ شمارش آشکارساز واقع در موقعیت زاویه‌ای ۴۰ درجه مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، به ازای یک مقدار مشخص از نرخ شمارش بیش از یک مقدار واحد برای ارتفاع قابل اندازه‌گیری است. بنابراین امکان برازش یک تابع روی نمودار تغییرات ارتفاع برحسب شمارش برای موقعیت فعلی آشکارساز فراهم نیست. راهکار قابل ارائه در این بخش انتخاب موقعیت زاویه‌ای دومی به عنوان موقعیت بهینه برای عملکرد دقیق در واحد توزین سیستم می‌باشد. بدین منظور نتایج شبیه‌سازی جهت مقایسه و بررسی حساسیت چینه‌ش آشکارسازها حول مخزن حاوی پودر به ارتفاع و درصد غنا در شکل ۱۰ رسم

آنچه از نمودارهای شکل ۷ مشهود است آن است که به ازای آشکارساز واقع در زاویه ۷۰ درجه به ازای کلیه ارتفاعهای پودر درون مخزن مقادیر اختلاف شمارش از یک مرتبه بزرگی برخوردارند. در این زاویه عملاً با عدم وابستگی بین اختلاف شمارش ۲ درصد غنای متوالی به ارتفاع پودر روبه‌رو هستیم و این موقعیت می‌تواند به عنوان زاویه بهینه در واحد غناسنجی لحاظ گردد.

همان گونه که از نمودار شکل ۸ پیدا است تغییر اندک نرخ شمارش به ارتفاع پرشدگی مخزن به خصوص در ارتفاعهای میانی سبب می‌شود تا بتوانیم تابع وابستگی نرخ شمارش برای آشکارساز واقع در این موقعیت زاویه‌ای بهینه را نسبت به درصد غنای پودر با کمک نمودار فوق استخراج کنیم.

۱.۲.۳ کالیبراسیون بخش غناسنج

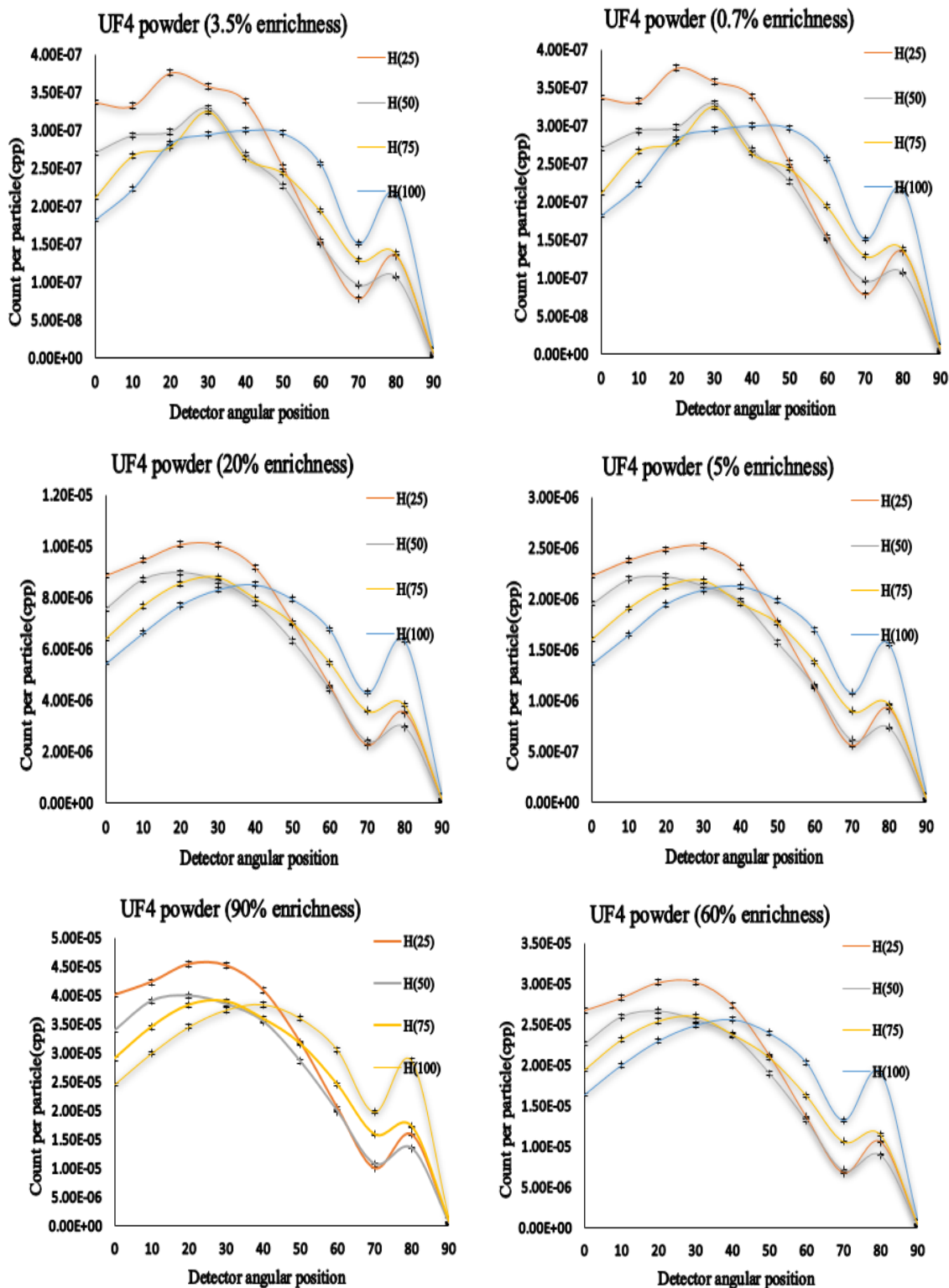
در ادامه و به منظور محاسبه دقیق نمودار کالیبراسیون بخش غناسنجی نمودار تغییرات نرخ شمارش برای آشکارساز واقع در موقعیت زاویه‌ای بهینه ۷۰ درجه برحسب درصد غنا و به ازای ارتفاع‌های میانی ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متر رسم و در نهایت تابع تغییرات نرخ شمارش برحسب درصد غنا همراه با بیشینه خطای ممکن در محاسبات استخراج گردید (شکل ۹).

تغییرات خطی درصد غنای پودر برحسب نرخ شمارش به عنوان یکی از نتایج مطلوب در نمودار شکل ۹ خودنمایی می‌کند. به منظور پرهیز از دشواری و متعاقباً خطای سیستماتیک در تنظیم دقیق ارتفاع پودر چه در مرحله کالیبراسیون و چه در فرایند آنلاین اندازه‌گیری غنا یک معادله کالیبراسیونی واحد همراه با بیشینه خطای ممکن برای محاسبات درصد غنا ارائه شد. بدین منظور نمودار خطی برازش شده بر روی میانگین نرخ شمارش‌های متناظر با مقادیر درصد غنای مشخص به ازای مقادیر مختلف ارتفاع پودر محاسبه شد. در شرایط عملیاتی و به ازای ثابت نرخ خوانش آشکارساز واقع در این موقعیت بهینه، با بهره‌گیری از این معادله مقدار میانگین غنای پودر محاسبه می‌شود. مقدار خطای بالا و پایین در این محاسبه نیز به ترتیب برابر با مقادیر غنای محاسباتی توسط خطوط برازش شده بر داده‌های متناظر با ارتفاع ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری خواهد بود که بر روی نمودار شکل ۹ مشخص شده است.



هستیم. با افزایش مقادیر درصد غنای پودر در ارتفاعی مشخص همواره با افزایش نرخ شمارش و نیز اختلاف در نرخ شمارش‌های مربوط به مقادیر درصدی غنای متوالی مواجه هستیم.

گردید. همان‌گونه که از این شکل مشهود است به‌ازای مقادیر درصد غنای مختلف، با افزایش زاویه قطبی محل قرارگیری آشکارساز سوسوزن با دو بیشینه نسبی نرخ شمارش حول موقعیت‌های زاویه‌ای ۳۰ درجه و ۸۰ درجه حول مخزن مواجه

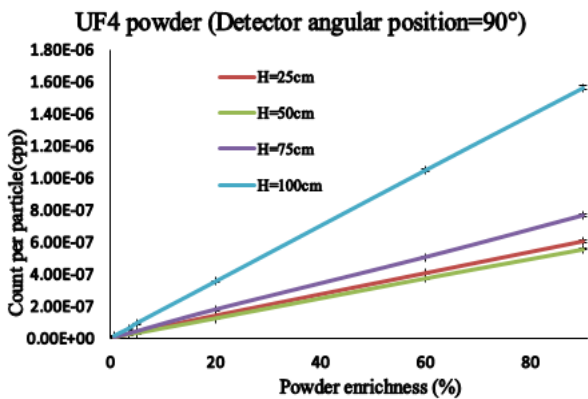


شکل ۱۰. تغییرات شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت نسبت به زوایای قطبی مختلف حول مخزن حاوی مقادیر مختلف ارتفاع پودر اورانیم تترافلوراید و درصد غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵.

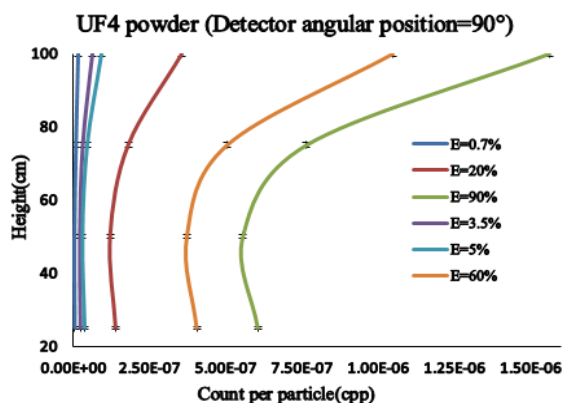


آنچه از نمودارهای شکل ۱۱ مشهود می‌باشد آن است که به‌ازای آشکارساز واقع در موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه به‌ازای کلیه درصد‌های غنای پودر درون مخزن مقادیر اختلاف شمارش از یک مرتبه بزرگی برخوردارند. در این زاویه عملاً با عدم وابستگی بین اختلاف شمارش دو ارتفاع متوالی پودر به درصد غنا روبه‌رو هستیم و این موقعیت می‌تواند به‌عنوان زاویه بهینه در واحد توزین لحاظ گردد.

همان‌گونه که از نمودار شکل ۱۲ پیدا است تغییرات نرخ شمارش آشکارساز واقع در موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه نسبت به درصد غنا به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع پودر درون مخزن از نمودارهایی خطی پیروی می‌کند. در نمودار فوق هیچ محدوده‌ای از درصد غنا را نمی‌توان یافت که تغییرات نرخ شمارش تقریباً ثابت باشد. با استفاده از داده محاسباتی مربوط به بخش غناسنج امکان استخراج داده‌های نرخ شمارش متناظر با ارتفاع‌های مختلف فراهم می‌گردد. به‌عنوان نمونه تغییرات ارتفاع پودر برحسب نرخ شمارش در مقادیر درصد غنای مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

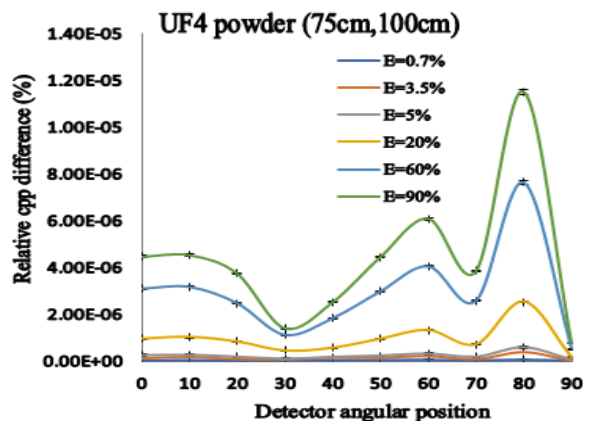
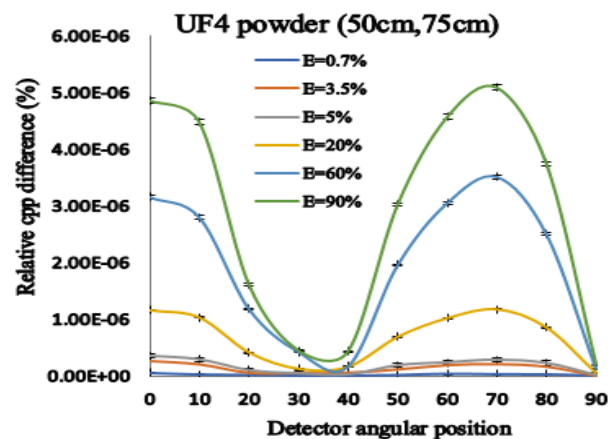
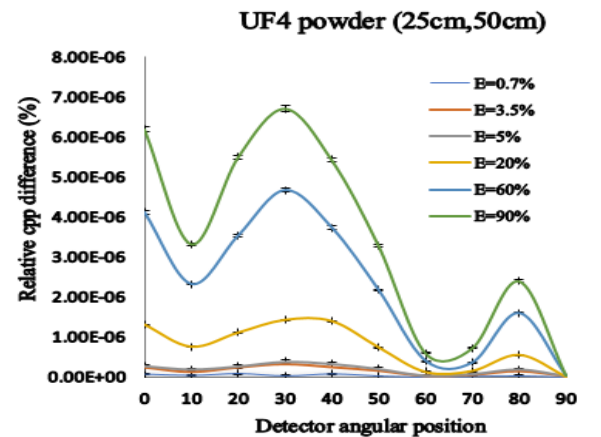


شکل ۱۲. تغییرات شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلوکترن ولت نسبت به زاویه قطبی ۹۰ درجه حول مخزن حاوی مقادیر مختلف ارتفاع پودر اورانیم تترافلوراید و درصد غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵.



شکل ۱۳. تغییرات ارتفاع پودر برحسب شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلوکترن ولت به‌ازای درصد‌های غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ در زاویه قطبی ۹۰ درجه حول مخزن.

مقادیر نرخ شمارش درازای درصد غنای ۹۰ پودر درون مخزن بیشترین مقدار ممکن را به خود اختصاص می‌دهد و بالتبع مقادیر اختلاف شمارش متناظر با ارتفاع‌های متوالی در این وضعیت بیشینه است. نمودارهای تغییرات اختلاف شمارش به‌ازای ارتفاع‌های متوالی و درصد‌های غنای مختلف در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱. تغییرات اختلاف نرخ شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلوکترن ولت به‌ازای ارتفاع‌های متوالی پودر اورانیم تترافلوراید در زوایای قطبی حول مخزن حاوی درصد‌های غنای متفاوت ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵.



۱.۳.۳ کالیبراسیون بخش توزین

با رسم نمودار تغییرات ارتفاع پودر برحسب نرخ شمارش به‌ازای مقادیر مختلف درصد غنا همان‌گونه که از شکل ۱۳ پیداست امکان برازش یک تابع مناسب بر روی این داده‌ها وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر پس از مشخص شدن غنای پودر، به‌ازای یک نرخ شمارش ثابت دو مقدار بالا و پایین برای ارتفاع پودر محاسبه می‌گردد. آن‌گونه که مشهود است به‌ازای مقادیر درصد غنای بالای پودر اختلاف ارتفاع‌های محاسباتی کمتر می‌گردد که به معنای افزایش خطا در تفکیک دو وضعیت بالا و یا پایین‌تر بودن از ارتفاع میانی است. از طرف دیگر در این مقادیر درصد غنای بالا با تغییرات بزرگ در نرخ شمارش به‌ازای اندک تغییر در ارتفاع پودر روبه‌رو هستیم که سبب می‌شود تا حساسیت سیستم توزین (ارتفاع‌سنج) پودر به تغییرات ارتفاع بیشتر باشد. در توضیح این بخش از نتایج بایستی به این نکته مهم اشاره کرد که عملاً سیستم ارائه‌شده بر مبنای شمارش صرفاً تابش گسیلی از پودر اکتیو نمی‌تواند برای مقاصد توزین (ارتفاع‌سنجی) به‌کار رود و ضروری است از یک سیستم کمکی ثانویه برای اندازه‌گیری هم‌زمان ارتفاع و درصد غنای پودر استفاده شود. سیستم موردنظر در این کار تحقیقاتی به‌کارگیری یک سنش‌گر ارتفاع بر مبنای شمارش گامای عبوری حاصل از یک چشمه نقطه‌ای گاما در یک سمت مخزن و آشکارساز سوسوزن در سمت دیگر خواهد بود. علی‌الاصول، با داشتن ارتفاع پودر درون مخزن و مقدار مساحت قاعده مخزن درنهایت حجم پودر و جرم آن با استفاده از حاصل ضرب مقدار محاسباتی حجم در چگالی پودر قابل محاسبه خواهد بود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی ارائه یک سیستم با توانایی اندازه‌گیری هم‌زمان غنا و وزن پودر درون مخزن موردنظر بود. با وجود این‌که در محاسبات تحلیلی سهم مربوط به تابش‌های پراکنده در معادله نهایی لحاظ نگردید و انتگرال معین صرفاً برای موقعیت زاویه‌ای ۹۰ درجه آشکارساز حل شد اما این محاسبات در دو بخش اساسی از هم‌خوانی مطلوب با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو برخوردار بودند. ترتیب مقادیر نرخ شمارش در یک غنای مشخص به‌ازای ارتفاع‌های مختلف و همچنین رفتار خطی تغییرات این نرخ شمارش برای هر دو حالت تحلیلی و شبیه‌سازی رفتاری یکسان را نشان می‌دهند که دلالت بر صحت شبیه‌سازی دارد. با توجه به صحت‌سنجی به‌عمل آمده می‌توان به سایر نتایج خروجی کد محاسباتی MCNP مورد استفاده در این پژوهش در زوایای دیگر با هدف دستیابی به چینش زاویه‌ای بهینه آشکارساز حول مخزن اعتماد کرد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو گویای این مطلب است که امکان ارائه واحد غناسنجی با تکیه بر خوانش آشکارساز واقع در موقعیت بهینه زاویه‌ای ۷۰ درجه حول مخزن استوانه‌ای پودر فراهم است. واحد مذکور بر پایه خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر اکتیو استوار است. بدین‌منظور سطح زیر قله انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون‌ولت مربوط به ایزوتوپ اورانیوم-۲۳۵ خوانده و در محاسبات کالیبراسیون و بالتبع محاسبه درصد غنای آنالین پودر درون مخزن لحاظ گردید.

آنچه از نمودار تغییرات درصد غنا برحسب نرخ شمارش به‌ازای مقادیر مختلف ارتفاع پودر می‌توان برداشت کرد گویای این مهم است که امکان حصول یک تابع خطی تغییرات به شرط انجام کالیبراسیون برای مخزن با پرشدگی میانی از پودر فراهم است.

در ادامه و با انتخاب موقعیت زاویه‌ای مناسب ۹۰ درجه متوجه شدیم که امکان ترسیم یک تابع برای بیان تغییرات ارتفاع پودر برحسب نرخ شمارش به‌ازای مقادیر مختلف درصد غنا فراهم نیست. لذا، برای تکمیل سیستم ادعایی جهت اندازه‌گیری هم‌زمان غنا و ارتفاع پودر ضرورت دارد از خوانش گامای عبوری از مخزن و پودر داخل آن که با نصب یک چشمه گامای پرنرژی نظیر سزیم-۱۳۷ و یا کبالت-۶۰ در یک سمت و شمارش توسط آشکارساز سوسوزن در سمت دیگر صورت می‌پذیرد استفاده کرد.

به‌طور کلی، سیستم ارتفاع‌سنجی گامای عبوری می‌تواند در دو ساختار متفاوت ارائه گردد. در ساختار نخست، از یک باریکه قلمی و یک آشکارساز نقطه‌ای سوسوزن استفاده می‌شود. این سیستم وظیفه تأیید/عدم تأیید عبور پودر درون مخزن از ارتفاع میانی را برعهده دارد و صرفاً جهت ارسال سیگنال موردنظر به کامپیوتر دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با تأیید ارتفاع بزرگتر/کوچکتر پودر نسبت به ارتفاع میانی درون مخزن، عملاً نه تنها امکان انجام کالیبراسیون مربوط به واحد غناسنجی فراهم می‌شود، بلکه امکان گزارش ارتفاع صحیح محاسبه‌شده توسط واحد توزین بر مبنای خوانش گامای تابشی از پودر از بین دو مقدار محاسباتی توسط نمودار شکل ۱۳ نیز میسر خواهد شد.

در ساختار دوم از یک باریکه پهن و یک آشکارساز میله‌ای سوسوزن استفاده می‌گردد که عملاً پس از ترسیم نمودار کالیبراسیونی ارتفاع برحسب نرخ شمارش و مستقل از واحد غناسنجی می‌تواند ارتفاع پودر درون مخزن و درادامه وزن آن را به‌صورت لحظه‌ای محاسبه و گزارش کند. ایراد مهم وارد بر این ساختار آن است که به‌دلیل به‌کارگیری آشکارساز پلاستیکی و اینکه در این حالت با طیف انرژی فاقد فوتوپیک مواجه هستیم شمارش تمام طیف مورد نظر است که به‌دلیل حضور در محیطی با پرتوایی ناشی از پودر عملاً امکان تفکیک شمارش‌های ناشی از پودر و چشمه جانبی ممکن نیست و بنابراین ساختار نخست راهکار نهایی مورد نظر ماست.



مراجع

- Morel Jean, Michel Etcheverry, Gilles Riazuelo. Uranium enrichment measurement by X-and γ -ray spectrometry with the "URADOS" process. *Applied Radiation and Isotopes*. 1998;49.9-11:1251-1257.
- Yücel H.A.L.U.K, Dikmen H. Uranium enrichment measurements using the intensity ratios of self-fluorescence X-rays to 92^* keV gamma ray in UXK α spectral region. *Talanta*. 2009;78.2:410-417.
- Ruhter W.D, Wang T.F, Hayden C. Uranium enrichment measurements without calibration using gamma rays above 100 keV. No. UCRL-JC-142832. Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States). 2001.
- Sprinkle Jr. J.K, Christiansen A, Cole R, Collins M.L, Hsue S.-T, Knepper P.L, McKown T.O, Siebelist R. Low-resolution gamma-ray measurements of uranium enrichment. *Applied Radiation and Isotopes*. 1997;48.10-12:1525-1528.
- Hamel M.C, Polack J.K, Ruch M.L, Marcath M.J, Clarke S.D, Pozzi S.A. Active neutron and gamma-ray imaging of highly enriched uranium for treaty verification. *Scientific Reports*. 2017;7.1:7997.
- Korob R.O, Blasiyh Nuño G.A. A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution γ spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*. 2006;64.5:525-531.
- Choi H.D, Kim J. Basic characterization of uranium by high-resolution gamma spectroscopy. *Nuclear Engineering and Technology*. 2018;50.6:929-936.
- McFerran N, Canion B, McDonald B, Kulisek J, Dreyer J, Labov S, Enqvist A. Gamma-ray spectrum variations for surface measurements of uranium hexafluoride cylinders. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2020;961:163675.
- Kim S.H, Song J.Y, Jeon J.Y, Choi J.Y, Seo H. Feasibility study on evaluating uranium enrichment with the High Resolution Gamma-Ray Spectrometry and X-ray fluorescence. *Applied Radiation and Isotopes*. 2019;148:132-137.
- Abd El Gawad K, Zhang Z, Song Y, Zahraddeen A, Hazzaa M.H. Study on the performance of some non-destructive methods to estimate the uranium enrichment in nuclear materials. *Results in Physics*. 2019;13:102345.
- Smith Jr H.A. The measurement of uranium enrichment. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*. 1991;7:195-220.
- <https://www.wise-uranium.org/nucv.html>.
- Hubbell J.H, Seltzer S.M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z= 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. No. PB-95-220539/XAB; NISTIR-5632. National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). *Ionizing Radiation Div*. 1995.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

شریفزاده، محسن. (۱۴۰۳)، طراحی مفهومی سیستم اندازه‌گیری غنا و وزن پودر اورانیوم تترافلوراید. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۰۹(۳)، ۱۴۳-۱۵۵.

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1601.html .DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1601>

