مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 109, 2024

# طراحي مفهومي سيستم اندازه گيري غنا و وزن پودر اورانيم تترافلورايد

**محسن شریفزاده<sup>\*</sup>** پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳، تهران- ایران

\*Email: mssharifzadeh@aeoi.org.ir

مقالەي پژوھشى

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

#### چکیدہ

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 اندازه گیری مستمر صورت پذیرد. از طرفی به سبب قرار گیری در محیط با پرتوزایی 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 ابزاردقیق هستهای جایگاه ویژهای در این بین ایفا می کند. در این کار تحقیقاتی بر آن شدیم تا بر روی طراحی مفهومی سیستم اندازه گیری درصد غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید درون مخازن بارگیری و جابه جایی موجود در صنعت هستهای کار کنیم. بدین منظور 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 بهینه سازی مکان هندسی آشکارساز / آشکارسازهای سوسوزن اطراف مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید به منظور داشتن بیشینه دقت در اندازه گیری قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در محیط نرمافزار مونت کارلو نشان می دهد بهرد اورانیم تعرافلوراید درمان معای شمارش تمرکز بر روی خوانش صرفاً پرتوهای گامای گسیلی از پودر و یا همراه با چشمه رادیواکتیو جانبی موردنظر قرار گرفت. اساس طراحی بر بهینه سازی مکان هندسی آشکارساز / آشکارسازهای سوسوزن اطراف مخزن حاوی پودر اورانیم تترافلوراید به منظور داشتن بیشینه دقت در اندازه گیری قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در محیط نرمافزار مونت کارلو نشان می دهد بهازای درصدهای مختلف غنا و نیز ارتفاعهای مختلف پودر اورانیم درون مخزن استوانهای قادریم در زوایای خاص بیشینه دقت را اندازه گیری دو پارامتر درصد غنا و وزن پودر داشته باشیم.

كليدواژهها: اورانيم، اورانيم تترافلورايد، توزين، غنا، طراحي مفهومي، اندازه گيري

# Conceptual design of uranium tetrafluoride powder richness and weight measurement system

M. Sharifzadeh\*

Radiations Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, 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

Journal	of Nuclear	Science,	Engine	ering a	and Tec	hnolog
Vol. 45	(3), Serial	Number	109, 202	24, P 1	43-155	

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای <u>ع</u>y دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۴۳–۱۵۵

## 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 اندازه گیری مستمر صورت پذیرد. در عمل و بهسبب پرتوزایی 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 آنلاین و مداوم جایگاه ویژهای در این بین ايفا می کند. 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 کیلوالکترون-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 تهی شده، طبیعی و غنی شده در محدوده ۰۲٫۳۲٪ 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 دقيق درصد غنا موردنظر قرار گيرند [7]. روتر و همکاران (۲۰۰۱) بر روی توسعه روش اندازه گیری غنای اورانیم با استفاده از به کار گیری 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 كوچكتر و سبك شامل تحليل گر چندكاناله و آشکارسازهای حفاظ گذاری شده مورد توجه قرار دادند و با موفقیت تجاریسازی کردند. این نرمافزار با استفاده از افزایش تعداد آزمایشات توسعه داده شد به گونهای که با روشهای تحلیل پیچیده قادر به اندازه گیری 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 یرتوهای 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 غنی شده بهدلیل

2. Monochromatic Micro X-Ray Fluorescence

1. Dual Particle Imager

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای



در کار تحقیقاتی صورت گرفته توسط مکفران و همکاران (۲۰۲۰) تأثیرات پارامترهایی نظیر زمان بین پرشدن و اندازه گیری، 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 اورانيم با كمك تكنيك فلوئورسانس ميكروايكس تکانرژی<sup>۲</sup> توانستند در مدت زمان کوتاه نمونه حاوی ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ را آنایز کنند [۹]. در یک کار تحقیقاتی که توسط خالد و همکاران (۲۰۱۹) صورت پذیرفت بر روی دو نمونه تریاورانیم اکتوکسید و اورانیم دی کسید 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 به کار گرفته شد [۱۰]. در شمارش سطح زیرقلههای انرژی گامای مشخصه گسیلی از ایزوتوپهای اورانیم و دختران آنها برخی از پارامترها تأثیرگذارند که از جمله می توان به بازه زمانی بین پر و خالی شدن های متوالی مخزن، تاریخچه مربوط به پرشدگیهای قبلی آن، توزیع هندسی پودر درون مخزن، و نیز محل اندازه گیری و شمارش در طول مخزن و



یا زاویه قرارگیری پیرامون آن اشاره کرد. تلفیق پارامترهای فوق سبب می شود تا با یک عدم قطعیت بالا در طیف گامای گسیلی روبهرو باشیم. در این کار تحقیقاتی با فرض این که مخزن پیش از این خالی بوده و پودر در توزیعی همگن ارتفاع مشخصی از مخزن را پر کرده باشد مطالعه بر روی بررسی امکان اندازه گیری غنا و وزن پودر حاوی ذرات اورانیم درون مخزن انجام گرفت. هدف طراحی مفهومی سیستم اندازه گیری درصد غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید درون مخازن بارگیری و جابهجایی موجود در صنعت هستهای است. بهمنظور ارائه سیستمی با حداقل هزينه ساخت و در عين حال با دقت مناسب و با توجه به آنچه از مطالعه کارهای صورت گرفته 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 اندازه گیری استوار است. نتایج شبیه سازی 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 اندازه گیری دو پارامتر درصد غنا و وزن يودر داشته باشيم.

# ۲. روش کار

اساساً بهدلیل این که 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).



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 با ضخامت دیواره ۵ میلیمتر برای ذخیرهسازی پودر اورانیم تترافلوراید مورد استفاده قرار گرفت. پودر مذکور در غناهای مختلف ۲۸۰٪ (اورانیم طبیعی)، ۲۸۵٪، ۵۵٪، ۶۰٪، ۶۰٪ و ۹۰٪ از ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ و بهازای ارتفاعهای مختلف ۲۵، ۵۰، ۵۵ 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 مختلف درصد غنای اورانیم-۲۳۵ در کارت داده شبیهسازی

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 نگود 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.

> **شکل ۱.** چینش کلی در یک سیستم اندازه گیری غنا و وزن مخزن حاوی نمونه اورانیم. با وجود بزر گنمایی در این تصویر، عمق قابل مشاهده اورانیم بسیار کوچکتر از ابعاد مخزن می باشد [۱۱].



ضخامت نامتناهی (سانتیمتر) <sup>۲</sup>	پویش آزاد میانگین (سانتیمتر) <sup>۱</sup>	چگالی (گرم بر سانتیمترمکعب)	تركيب حاوى اورانيم		
۰,۲۶	•,• ۴	۱۸,۷	فلز		
١,۴٣	• /٢ •	۴,٧	اورانیم هگزافلوراید (جامد)		
٠,۴٩	• / • Y	۱۰,۹	اورانیم دیاکسید (متخلخل)		
۲,۲۵	۰٫٣٩	۲,۰	اورانيم دىاكسيد (پودر)		
٠,٧۴	•,11	۷٫۳	ترىاورانيم اكتوكسيد (پودر) <sup>٣</sup>		
٣,• ۴	۳۴,	$\Upsilon_{/}A$	اورانيم نيترات		
۱: معادل با عکس ضریب تضعیف جرمی است.					
			۲: برابر با ۷ پویش آزاد میانگین		
			۳: پودر با بستەبندى فوق چگال		

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

فراوانی درصدی انرژیهای مختلف گامای گسیلی از پودر اورانیم تترافلوراید									
١٨٣ كيلو الكترونولت	١۴٣ كيلو الكترونولت	۶۶ كيلو الكترونولت	١٣ كيلو الكترونولت	غنای اورانیم-۲۳۵					
• / <b>۴</b>	• , • <b>Y</b>	١,• ٨	۹۸,۴۵	$\bullet_{/} \bullet$					
١,٩٨	۶۳۹,	۱,• ۵	٩۶٬۵۸	$r_{/\Delta}$					
۲٫۸۳	<i>۵</i> ۵, •	١,• ٣	۹۵٬۵۹	۵					
11,77	$\mathbf{r}_{\mathbf{r}}$	• , <b>X</b> Y	۸۵,۶۱	۲.					
۳۳,۹۶	8,8	•,**	۵۹	۶.					
۵۰,۹۴	٩,,٩	•,11	٣٩,٠۵	٩٠					

اورانيم-۲۳۵ بود.

۲.۲ محاسبات تحلیلی

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



شکل ۲. چینش آشکارسازهای سوسوزن حول مخزن حاوی پودر اورانیم تترافورايد جهت بررسى زاويه بهينه جهت اندازه گيرى دقيق غنا و وزن پودر با استفاده از خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر.



شکل ۳. چینش چنبرههای معادل آشکارسازهای سوسوزن حول مخزن حاوى پودر اورانيم تترافورايد جهت بررسى زاويه بهينه جهت اندازه گيرى دقیق غنا و وزن پودر با استفاده از خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر.

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۴۳–۱۵۵

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

با توجه به تقارن زاویه سمتی مسئله در راستای کاهش واریانس مربوط به دادههای خوانشی آشکارسازها این کار صورت گرفت که بهواسطه میانگین گیری 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 f۸ و پیک شمارشی موردنظر انرژی ۱۸۳ کیلو الکترونولت مربوط به ایزوتوپ

در ارتباط با صحتسنجی نتایج حاصل از شبیهسازی مونت کارلو با نتایج داده گیری تجربی، به دلیل عدم وجود هر گونه سیستم غناسنجی و توزین پودر اورانیم تترافلوراید انتقالی در داخل کشور و نیز کار در شرایط خطرناک از نظر امکان استنشاق پودر و بالتبع دز گیری داخلی در حال حاضر این امکان فراهم نیست. با توجه به تمركز این مطالعه بر روی امكانسنجی ساخت چنین سیستمی برای رفع نیاز صنعت هستهای کشور و این که مخازن

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 برهم کنشها و نیز سهم خوانش آشکارساز از فوتونهای متأثر از عبور بدون برهمکنش و یا برهم کنشهای متوالی پراکندگی، علی الاصول این فرض که محاسبات تحلیلی در تمام این شرایط قابل ارائه باشد نه تنها غیرممکن است بلکه انجام شبیهسازی مونتکارلو را بدون توجیه می کند. بنابراین در یک وضعیت خاص تلاش شد تا فرمولاسیون قابل قبول 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، بهازای ارتفاع پودرهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتیمتر روند تغییرات شمارش بهازای درصد غنای مختلف یودر محاسبه و با نتایج مشابه شبیهسازی مقایسه گردید. همخوانى روند كلى تغييرات شمارش بهازاى پارامترهاى 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 آن گونه 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 .h پرتوهای گاما از تمام حجم پودر درون مخزن به شعاع a و ارتفاع

دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۴۳–۱۵۵

شار گسیلی پرتوهای گاما با انرژی ۱۸۳ کیلو الكترونولت، n<sub>۱۸۳</sub> كه قابليت شمارش توسط آشكارساز را دارند بدون ملاحظات مربوط به تضعیف درون یودر از رابطه ۱ بهدست خواهد آمد:

$$d\dot{N} = n \times f_{enrichness}^{\rm VAT keV} \times \frac{d\Omega}{\mathfrak{f}\pi} \times \epsilon_{int} \times dv \tag{1}$$

که در آن n شار گسیلی بهازای کل انرژیهای موجود در جدول ۲،  $f_{enrichness}^{\scriptscriptstyle \rm IAT keV}$  کسری از این پرتوهای گاما است که در غنای مشخص و با انرژی ۱۸۳ کیلو الکترونولت گسیل شدهاند. بەعنوان  $rac{d \, \Omega}{{}^{m{k}} \pi}$  بازده ذاتی آشکارساز است و متغیرهای  ${}^{m{k}} {}^{m{k}} {}^{m{k}}$ کسری از پرتوهای گسیلی که قابلیت گسیل به سمت آشکارساز را دارند و dV به عنوان حجم دیفرانسیلی در مختصات قطبی استوانه ای مطابق با روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه هستند:

$$\frac{d\Omega}{\epsilon\pi} = \frac{A_{detector} \times \cos\theta}{\epsilon\pi r\tau} \tag{(7)}$$

$$dV = \rho \times d\rho \times d\varphi \times dz \tag{(7)}$$

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

$$\frac{\cos\theta}{r^{\mathsf{r}}} = \frac{b+c-z}{\left\{\rho^{\mathsf{r}} + (b+c-z)^{\mathsf{r}}\right\}^{\mathsf{r}/\mathsf{r}}} \tag{(f)}$$

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

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

متغير  $l_{attenuation}$  برابر با طول پارهخط واصل ديفرانسيل حجمي به محل برخورد با سطح پودر درون مخزن به ارتفاع h و در امتداد خط واصل این حجم به محل قرار گیری آشکارساز در

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 109, 2024, P 143-155

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

$$l_{attenuation} = \sqrt{\rho^{\mathsf{Y}} (1 - \frac{h - b - c}{z - b - c})^{\mathsf{Y}} + (z - h)^{\mathsf{Y}}}$$
(9)

پارامتر  $\mu_{powder}$  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:

$$Count \ perparticle(cpp) = \frac{(\mathbf{n}.\mathbf{f}_{enrichness}^{1\times rkeV} \cdot \in_{int} \cdot \mathbf{A}_{detector})}{\mathfrak{F}\pi} \times \int_{\circ}^{r_{\pi}} d\varphi \int_{z_{\circ}=(b+c)}^{a} \int_{\circ}^{a} \frac{\rho \cdot e^{-\mu_{powder} \cdot (\frac{b+c-z-z_{\circ}}{b+c-z}) \cdot \sqrt{\rho^{\tau} + (b+c-z)^{\tau}}}}{\left\{\rho^{\tau} + (b+c-z)^{\tau}\right\}^{r,\tau}} d\rho \times (b+c-z) dz$$
(Y)

از آنجا که مقایسه تغییرات نرخ شمارش بین دادههای تحلیلی و شبیهسازی موردنظر است لذا مقدار intبرابر با ۱ و  $A_{detector}$  نیز ۵٬۰۶ لحاظ گردید. با توجه به این که دادههای شبیهسازی برحسب نرخ شمارش بر ذره گزارش می شود پارامتر n را برابر با ۱ درنظر گرفتیم.

# ۳. نتايج

۱.۳ 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.



**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 مونت کارلو 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 شكل ۵- الف و ۵- ب هستيم. با توجه به همخواني بین نتایج محاسبات تحلیلی و شبیهسازی و صحتسنجی نتایج شبیهسازی می توان 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 کړ د.



هستیم که به معنای ارتقای توان تفکیک سیستم شمارشی پیشنهادی است اما در ادامه و با افزایش ارتفاع یودر با کاهش نرخ شمارش در این موقعیت و بالتبع کاهش توان تفکیک به سبب افزایش خودجذبی روبهرو می شویم. البته همان گونه 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 می گردد.



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

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۵، شماره ۳، جلد ۱۰۹، پاییز ۱۴۰۳، ص ۱۴۳–۱۵۵

149

۲.۳ نتایج شببهسازی واحد غناسنج

پس از صحتسنجی کد MCNP نتایج شبیهسازی جهت مقایسه و بررسی حساسیت چینش آشکارسازها حول مخزن حاوى پودر اورانيم تترافلورايد به درصد غناى ايزوتوپ اورانيم-۲۳۵ و نیز ارتفاعهای مختلف ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتیمتری یودر ترسیم و در شکل ۶ نشان داده شد. همان گونه 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 هستيم. با افزايش ارتفاع يودر درون مخزن در ابتدا با یک افزایش نرخ شمارش و نیز اختلاف در نرخ شمارشهای مربوط به مقادیر درصدی غنای متوالی مواجه

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

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



**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.

آنچه از نمودارهای شکل ۷ مشهود است آن است که بهازای آشکارساز واقع در زاویه ۷۰ درجه بهازای کلیه ارتفاعهای پودر درون مخزن مقادیر اختلاف شمارش از یک مرتبه بزرگی برخوردارند. در این زاویه عملاً با عدموابستگی بین اختلاف شمارش ۲ درصد غنای متوالی به ارتفاع پودر روبهرو هستیم و این موقعیت میتواند بهعنوان 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 می شود تا بتوانیم تابع وابستگی نرخ شمارش برای آشکارساز واقع در این موقعیت زاویه ای بهینه را نسبت به درصد غنای پودر با کمک نمودار فوق استخراج کنیم.

### ۱.۲.۳ کالیبراسیون بخش غناسنج

در ادامه و بهمنظور محاسبه دقیق نمودار کالیبراسیون بخش غناسنجی نمودار تغییرات نرخ شمارش برای آشکارساز واقع در موقعیت زاویهای بهینه ۲۰ درجه برحسب درصد غنا و بهازای 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 بهعنوان یکی از نتایج مطلوب در نمودار شکل ۹ خودنمایی می کند. به منظور پرهیز از دشواری و متعاقباً خطای سیستماتیک در تنظیم دقیق ارتفاع پودر چه در مرحله کالیبراسیون و چه در فرایند آنلاین اندازه گیری غنا یک معادله كاليبراسيونى واحد همراه با بيشينه خطاى ممكن براى محاسبات درصد غنا ارائه شد. بدینمنظور نمودار خطی برازششده بر روی میانگین نرخ شمارشهای متناظر با مقادیر درصد غناى مشخص بهازاى مقادير مختلف ارتفاع يودر محاسبه شد. در شرایط عملیاتی و بهازای ثبت نرخ خوانش آشکارساز واقع در این موقعیت بهینه، با بهره گیری از این معادله مقدار میانگین غنای پودر محاسبه می شود. 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.







شکل ۹. تغییرات درصد غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ برحسب شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلو الکترونولت بهازای ارتفاعهای مختلف پودر اورانیم تترافلوراید در زاویه قطبی ۷۰ درجه حول مخزن.

#### ۳.۳ واحد توزين (ارتفاعسنج)

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، بهازای یک مقدار مشخص از نرخ شمارش بیش از یک مقدار واحد برای ارتفاع قابلاندازه گیری است. بنابراین امکان برازش یک تابع روی نمودار تغییرات ارتفاع برحسب شمارش برای موقعیت فعلی آشکارساز فراهم نیست. راهکار قابلارائه در این بخش انتخاب موقعیت زاویهای دومی به عنوان موقعیت بهینه برای عملکرد دقیق در واحد توزین سیستم می باشد. بدین منظور نتایج شبیه سازی جهت مقایسه و بررسی حساسیت چینش آشکارسازها حول مخزن حاوی پودر به ارتفاع و درصد غنا در شکل ۱۰ رسم

گردید. همان گونه 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

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.



**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 درصدغنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵.



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.



6.00E-06 telative 4.00E-06 2.00E-06 0.00E+00 0 10 40 70 80 20 30 50 60 90 Detector angular position

شکل ۱۱. تغییرات اختلاف نرخ شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلوالکترونولت بهازای ارتفاعهای متوالی پودر اورانیم تترافلوراید در زوایای قطبی حول مخزن حاوی درصدهای غنای متفاوت 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 عدموابستگی بین اختلاف شمارش دو ارتفاع متوالی پودر به درصد غنا روبهرو هستیم و این موقعیت میتواند بهعنوان زاویه بهینه در واحد توزین لحاظ گردد.

همان گونه 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 کیلوالکترون ولت نسبت به زاویه قطبی ۹۰ درجه حول مخزن حاوی مقادیر مختلف ارتفاع پودر اورانیم تترافلوراید و درصد غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵.



**شکل ۱۳. ت**غییرات ارتفاع پودر برحسب شمارش زیر فوتوپیک گامای ۱۸۳ کیلوالکترونولت بهازای درصدهای غنای ایزوتوپ اورانیم-۲۳۵ در زاویه قطبی ۹۰ درجه حول مخزن.

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 109, 2024, P 143-155

# ۱.۳.۳ کالیبراسیون بخش توزین

با رسم نمودار تغییرات ارتفاع پودر برحسب نرخ شمارش بهازای مقادیر مختلف درصد غنا همان گونه 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 می گردد. آن گونه که مشهود است بهازای مقادیر درصد غنای بالای پودر اختلاف ارتفاعهای محاسباتی کمتر می گردد 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 می شود 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 نمی تواند برای مقاصد توزین (ارتفاع سنجی) به کار رود و ضروری است از یک سیستم کمکی ثانویه برای اندازهگیری همزمان ارتفاع و درصد غنای یودر استفاده شود. سیستم موردنظر در این کار تحقیقاتی به کارگیری یک سنجش گر ارتفاع بر مبنای شمارش گامای عبوری حاصل از یک چشمه نقطهای گامازا در یک سمت مخزن و آشکارساز سوسوزن در سمت دیگر خواهد بود. علی الاصول، 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 نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی ارائه یک سیستم با توانایی اندازه گیری همزمان غنا و وزن پودر درون مخزن موردنظر بود. با وجود این که 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 مونت کارلو برخوردار بودند. ترتیب مقادیر نرخ شمارش در یک غنای مشخص بهازای ارتفاعهای مختلف و همچنین رفتار خطی غنای مشخص بهازای ارتفاعهای مختلف و همچنین رفتار خطی شبیهسازی رفتاری یکسان را نشان میدهند که دلالت بر صحت شبیهسازی دارد. با توجه به صحتسنجی به عمل آمده می توان به سایر نتایج خروجی کد محاسباتی MCNP مورد استفاده در به سایر نتایج خروجی کد محاسباتی و MCNP مورد استفاده در زاویهای بهینه آشکارساز حول مخزن اعتماد کرد.

نتایج حاصل از شبیه سازی مونت کارلو گویای این مطلب است که امکان ارائه واحد غناسنجی با تکیه بر خوانش آشکار ساز واقع در موقعیت بهینه زاویه ای ۷۰ درجه حول مخزن استوانه ای پودر فراهم است. واحد مذکور بر پایه خوانش پرتوهای گامای گسیلی از پودر اکتیو استوار است. بدین منظور سطح زیر قله انرژی ۱۸۳ کیلو الکترون ولت مربوط به ایزوتوپ اورانیم -۲۳۵ خوانده و در محاسبات کالیبراسیون و بالتبع محاسبه درصد غنای آنلاین 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 گامازای پرانرژی نظیر سزیم-۱۳۷ و یا کبالت-۶۰ در یک سمت و شمارش توسط آشکارساز سوسوزن در سمت دیگر صورت می پذیرد 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 محاسبه شده 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 می گردد که عملاً پس از ترسیم نمودار کالیبراسیونی ارتفاع برحسب نرخ شمارش و مستقل از واحد غناسنجی می تواند ارتفاع پودر درون مخزن و درادامه وزن آن را به صورت لحظهای محاسبه و گزارش کند. ایراد مهم وارد بر این ساختار آن است که به دلیل به کارگیری آشکارساز پلاستیکی و اینکه در این حالت با طیف انرژی فاقد فوتوپیک مواجه هستیم شمارش تمام طیف مورد نظر است که به دلیل حضور در محیطی با پرتوزایی ناشی از پودر عملاً امکان تفکیک شمارش های ناشی از پودر و چشمه جانبی ممکن نیست و بنابراین ساختار نخست راهکار نهایی مورد نظر ماست.

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 45 (3), Serial Number 109, 2024, P 143-155

- 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 selffluorescence X-rays to 92\* keV gamma ray in UXKα spectral region. Talanta. 2009;78.2:410-417.
- 3. 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.
- 5. Hamel M.C, Polack J.K, Ruch M.L, Marcath M.J, Clarke S.D, Pozzi S.A. Active neutron and gammaray imaging of highly enriched uranium for treaty verification. Scientific Reports. 2017;7.1:7997.
- 6. Korob R.O, Blasiyh Nuño G.A. A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution  $\gamma$  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.
- 9. 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 nondestructive methods to estimate the uranium enrichment in nuclear materials. Results in Physics. 2019;13:102345.
- 11. Smith Jr H.A. The measurement of uranium enrichment. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. 1991;7:195-220.
- 12. 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 اندازه گیری غنا و وزن پودر اورانیم تترافلوراید. مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، ۱۹۹–۱۵۵. Url: https://jonsat.nstri.ir/article\_1601.html .DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1601