



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Optimizing the Nuclear Concentration Measuring System of the Cutter Suction Dredger Using MCNPX Monte Carlo Code

Mojtaba Askari ^{a,*}, Mohsen Sharifzadeh ^a, Ali Taheri ^a

^a Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-02-06

Revised: 2024-05-15

Accepted: 2024-05-26

Keywords:

Optimization;
Nuclear concentration
measuring system;
Dredger;
Cutter suction;
Monte Carlo;
MCNPX.

ABSTRACT

Using a dredger to remove mud and garbage accumulated in the river or sea docks is a common and important process. In order to monitor the condition of sediments on the sea bed, it is necessary to use an online measurement system for the concentration of transfer slurry from the floor to the surface. The nuclear-based systems have this important and operational capability to provide the possibility of online monitoring of the passing slurry by installing it on the pipeline without causing any disruption in the transfer process. The concentration measurement system of the cutter-suction dredger uses the combination of two nuclear and non-nuclear parts to measure the fluid parameters desired by the client, such as the volumetric and mass flow rate of the two-phase fluid and its components. In using hybrid systems for this purpose, basic conditions such as online measurement capability, non-physical, chemical or environmental interference in the passing flow, compatibility with the operational conditions of temperature, pressure, humidity and vibrations in the dredging site, measurement accuracy should be met and safety principles should be considered. In this study, using Monte Carlo simulation with MCNPX code, the effect of different geometrical and dimensional parameters of output gamma ray collimator on the accuracy of measuring the concentration of passing slurry was investigated, and with the considerations related to personnel radiation safety, the final optimal mode was proposed. The decrease in the placement depth of the horizontal spring inside the beam is associated with the simultaneous maximum of gradient and count statistics. In all of the mentioned situations, the opening of the conical beam-forming aperture has a higher sensitivity and resolution compared to a rectangular one.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33210.2618>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: moasgari@aeoi.org.ir

How to cite this article:

Askari, M., Sharifzadeh, M., & Taheri, A. (2024). Optimizing the nuclear concentration measuring system of the cutter suction dredger using MCNPX Monte Carlo code. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(79), 243-254. doi: 10.22075/jme.2024.33210.2618

بهینه‌سازی باریکه‌ساز غلظت‌سنج هسته‌ای لایروب برنده-مکش MCNPX با استفاده از کد مونت کارلو

مجتبی عسکری^{۱*}، محسن شریف‌زاده^۱، علی طاهری^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷	استفاده از لایروب به‌منظور برداشت گل و لای و زباله‌های انباشت‌شده در رودخانه و یا اسکله‌های دریایی روندی مرسوم و با اهمیت است. به‌منظور نظارت بر وضعیت رسوبات کف آب نیاز است از یک سامانه اندازه‌گیری برخط غلظت دوغاب انتقالی از کف به سطح استفاده شود. سامانه‌های مبتنی بر فناوری‌های هسته‌ای دارای این قابلیت مهم و عملیاتی هستند که با نصب بر روی خط لوله، بدون آنکه در فرایند انتقال خللی ایجاد کنند امکان نظارت برخط دوغاب عبوری را فراهم آورند. سیستم غلظت‌سنج لایروب برنده-مکش از ترکیب دو بخش هسته‌ای و غیرهسته‌ای برای اندازه‌گیری پارامترهای سیالاتی مورد نظر کارفرما نظیر دبی حجمی و جرمی سیال دوفازی و مولفه‌های آن بهره می‌برد. در بکارگیری سامانه‌های ترکیبی برای این منظور بایستی شروط اساسی نظیر قابلیت اندازه‌گیری برخط، عدم دخالت فیزیکی، شیمیایی و یا زیست محیطی در جریان عبوری، سازگاری با شرایط عملیاتی دما، فشار، رطوبت و ارتعاشات در محل لایروب، دقت اندازه‌گیری و اصول ایمنی مورد نظر قرار گیرد. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNPX تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و ابعادی یکسوساز پرتو گامای خروجی بر دقت اندازه‌گیری غلظت دوغاب عبوری، بررسی و با ملاحظات مربوط به ایمنی پرتوی پرسنل، حالت بهینه‌نهایی پیشنهاد گردید. کاهش عمق قرارگیری چشمه افقی درون باریکه‌ساز با بیشینه همزمان گرادیان و آمار شمارش همراه است. در تمام وضعیت‌های یادشده گشودگی دهانه باریکه‌ساز مخروطی نسبت به مستطیلی از حساسیت و توان تفکیک بالاتری برخوردار است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶	
واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، غلظت‌سنج هسته‌ای، لایروب، برنده-مکش، مونت کارلو، MCNPX.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33210.2618>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه
عملیاتی دما، فشار، رطوبت و ارتعاشات در محل لایروب، دقت اندازه‌گیری و اصول ایمنی مورد نظر قرار گیرد. سامانه‌های جرم‌سنجی متشکل از یک واحد غلظت‌سنج هسته‌ای در کنار جریان‌سنج مغناطیسی گزینه‌ای مناسب هستند که این شروط اساسی را برآورده می‌سازند. جریان‌سنج مغناطیسی بر اساس قانون القای مغناطیسی فارادی به‌عنوان دستگاهی ایده‌آل برای اندازه‌گیری سرعت کلیه سیالاتی دارای هدایت الکتریکی بیش از ۵

غلظت‌سنج هسته‌ای لایروب برنده-مکش از ترکیب دو بخش هسته‌ای و غیرهسته‌ای برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر کارفرما نظیر دبی حجمی و جرمی سیال دوفازی و مولفه‌های آن بهره می‌برد. در بکارگیری سامانه‌های ترکیبی برای این منظور بایستی شروط اساسی نظیر قابلیت اندازه‌گیری برخط، عدم دخالت فیزیکی، شیمیایی و یا زیست محیطی در جریان عبوری، سازگاری با شرایط

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: moasgari@aeoi.org.ir

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

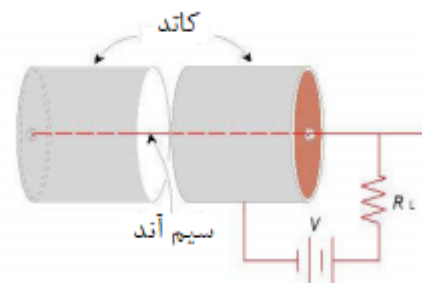
استفاده از طیف‌نگاری پرتو گامای کم‌انرژی عبوری از نمونه آب دریا مقدار پارامتر ضریب تضعیف جرمی آب شور و در ادامه کسر نمک موجود در آن اندازه‌گیری شد [۴]. در تحقیقی توسط جوهانسون و جکسون در سال ۲۰۰۰ بر روی ارائه راهکاری نوین در اندازه‌گیری کسر گاز موجود در یک ترکیب دوفازی مستقل از شوری کار شد. در این مطالعه به منظور حذف وابستگی تغییرات گامای شمارشی عبوری از ترکیب به شوری، از دو ساز و کار شمارش گامای عبوری و پراکنده از محتوای داخلی لوله جریان به‌طور همزمان بهره گرفته شد. اساس این طراحی بر داده‌های سطح مقطع برهمکنش تقریباً یکسان پرتوهای گاما در دو روند متفاوت عبوری و پراکنده است که بدین منظور ناگزیر به استفاده از چشمه کم‌انرژی امرسیوم-۲۴۱ شدند [۵]. مطالعات مشابه دیگری نیز در ادامه توسط هولستاد و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۶] و ساتره و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۷] با استفاده از تلفیق فناوری گامای عبوری و پراکنده برای اندازه‌گیری کسر فازی گاز درون مخلوط همگن دوفازی و مستقل از وابستگی به شوری صورت پذیرفت. سالکادو و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با استفاده از تلفیق شبکه عصبی و پرتو گاما امکان اندازه‌گیری کسر گاز در مخلوط سه فازی آب-گاز-نفت را در دو رژیم جریان حلقوی و لایه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۸]. در این روش سعی بر آن شد تا با استفاده از شبکه عصبی الگوی متفاوت موجود در نمودارهای توزیع دیفرانسیلی ارتفاع پالس به‌ازای مقادیر مختلف شوری موجود در فاز آبی و رژیم جریان استخراج گردد. از چشمه گامای دوانرژی به همراه آشکارسازهای سوسوزن واقع در دو راستای عبوری و پراکنده و در دو رژیم مورد نظر استفاده شد. نقطه قوت کار در ارائه طراحی است که قادر است با کمک شبکه عصبی و اعمال ضرایب تصحیح تا حدودی اثرات منفی اندازه‌گیری وابسته به شوری و رژیم را حذف کند. از نقاط ضعف این سامانه استفاده از چشمه دوانرژی است که در فاز نظری می‌بایست با اولویت بسیار کم انرژی و پرا انرژی انتخاب شود که در انرژی پایین همچنان با مشکلات پیشین روبروست. فرید و همکاران در سال ۲۰۲۳ یک روش اندازه‌گیری هیبریدی جدید برای اندازه‌گیری چگالی و تفکیک درصد مولفه‌های جریان سه‌فازی جامد-مایع-گاز در یک راکتور ستون حباب دوغابی با استفاده از روش‌های چگالی‌سنجی پرتو گاما و پروب فیبر نوری نقطه‌ای ایجاد و به کار گرفتند [۹]. در تحقیقی دیگر توسط

میکروزیمنس بر سانتیمتر کارایی دارد. این جریان‌سنج‌ها بسیار دقیق بوده و اندازه‌گیری جریان توسط آنها مستقل از دانسیته، دما و فشار سیال انجام می‌گیرد [۱].

چگالی به‌عنوان یک مقدار استاندارد برای توصیف مواد در تجزیه و سنتز آنها استفاده می‌شود. اغلب از چگالی برای تعیین غلظت یک ماده در محلول آبی استفاده می‌شود. امروزه روش‌های اندازه‌گیری هسته‌ای، به دلیل قابلیت غیرتماسی در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس عملکردی عمده این سامانه‌ها استفاده از یک یا چند چشمه تابش یونساز و یک یا چند واحد آشکارسازی پرتو است. پارامترهای سیستم یا فرآیند، از اندازه‌گیری اندرکنش‌های بین تابش‌های یونساز و سیستم یا فرآیند تحت بررسی، حاصل می‌شود.

در این مطالعه، هدف دستیابی به طراحی بهینه باریکه‌ساز واحد غلظت‌سنج هسته‌ای برای اندازه‌گیری غلظت گل و لای عبوری از خط لوله فولادی قطور و ضخیم بر روی لایروب برنده-مکش است.

استفاده از چشمه پرتوزا کبالت-۶۰ با انرژی میانگین ۱/۲۵ مگا الکترون‌ولت به دلیل عمق نفوذ بالا در کنار بکارگیری آشکارسازهای گازی گایگر-مولر که در شرایط محیطی دما، فشار و رطوبت بالا و نیز ارتعاشات لوله بهترین عملکرد شمارشی را دارند گزینه‌های مناسبی در این مطالعه هستند [۲]. نمایی از آشکارساز گایگر-مولر در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از برهمکنش پرتوهای گاما با گاز درون آشکارساز گایگر-مولر و ایجاد فرایند یونسازی، فرایند جمع‌آوری سریع این بار الکتریکی انجام می‌شود که نتیجه آن تولید جریان الکتریکی است که توسط یک آمپر متر حساس اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱- طراحی از آشکارساز گایگر و نحوه عملکرد آن [۳].

در تحقیقی که توسط باریوسا و همکاران در سال ۲۰۲۱ بر روی توسعه روش غیرتداخلی استفاده از پرتوهای گاما برای اندازه‌گیری غلظت نمک در آب دریا صورت گرفت، با

در این سامانه با استفاده از قانون تضعیف نمایی بیر-لمبرت پرتوهای گاما عبوری از محتویات درونی لوله مقدار غلظت اندازه‌گیری می‌شود [۱۳]:

$$I = BI_0 e^{-\mu_p \rho \cdot x} \quad (1)$$

که I و I_0 به ترتیب شدت خوانش به ازای شرایط پر شدگی مخزن توسط هوا و دوغاب می‌باشد و μ_p ضریب تضعیف جرمی، ρ چگالی و x طولی است که پرتوی گاما در دوغاب می‌پیماید تا به آشکارساز برسد. ضریب انباشت پرتوهای گاما، B ، همواره عددی بزرگتر از واحد است که در واقع سهم پرتوهای پراکنده‌شده از محتوای چگالی میان چشمه و آشکارساز را در خوانش نهایی آشکارسازها لحاظ می‌کند. در مواردی نظیر چگالی‌سنج‌های قفل‌شده بر روی لوله‌های قطور جریان که فاصله چشمه و آشکارساز زیاد است و نیز اعمال کولیماتورهای سربی که تا حدود زیادی مانع از رسیدن این پرتوهای مزاحم به درون آشکارسازها می‌شوند و نیز در ادامه بهره‌گیری از پنجره‌های انرژی در سیستم الکترونیکی شمارش می‌توان این ضریب را با دقت مطلوبی برابر با واحد فرض کرد. نسبت دو متغیر I و I_0 به‌عنوان پارامتر کلیدی در اندازه‌گیری چگالی و در ادامه محاسبه غلظت دوغاب تابع شرایط هندسی و ابعادی باریکه‌ساز است. روش مورد استفاده در این کار تحقیقاتی استفاده از محیط شبیه‌ساز مونت کارلو با هدف بررسی تغییرات شمارش آشکارسازهای پرتوی گامای گسپلی از چشمه پرتوزا کبالت-۶۰ به‌ازای مقادیر مختلف غلظت دوغاب است. بدین‌منظور تغییرات مقادیر مختلف پارامترهای هندسی و ابعادی باریکه‌ساز چشمه و تاثیر در نرخ شمارشی بررسی و به منظور رسیدن به بیشینه دقت در تفکیک مقادیر مختلف غلظت خاک در دوغاب استفاده شد. در انتها نیز با اعمال محدودیت ایمنی پرتوی و مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی وضع‌شده در حوزه تنظیم مقررات پرتوی [۱۴] ساختار بهینه نهایی باریکه‌ساز که در بر دارنده بیشینه دقت در اندازه‌گیری و در عین حال رعایت حدود ایمنی پرتوی است بدست آمد. در ادامه و برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج داده‌گیری تجربی، به دلیل عدم وجود انعطاف در ساخت و بهره‌گیری و از کلیه طراحی‌های ممکن در باریکه‌سازهای موجود در آزمایشگاه، با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به حالت خاص باریکه‌ساز موجود در آزمایشگاه، روند تغییرات شمارش برحسب چگالی

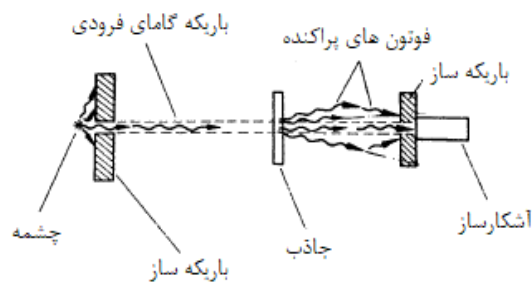
سالگادو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ انباشت رسوب درون خطوط لوله جریان چندفازی آب-گاز-نفت با استفاده از یک شبکه عصبی آموزش‌دیده به کمک داده‌های شبیه‌سازی ترابرد پرتوهای گاما در ماده در محیط نرم‌افزار MCNP6 مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ توسط دم و همکارانش انجام شد کسر حجمی سیال چندفازی عبوری از لوله و نیز میزان رسوب انباشته باریم-سولفات با بکارگیری دو آشکارساز سوسوزن یدور سدیم برای خوانش پرتوهای گامای عبوری و پراکنده حول لوله اندازه‌گیری شد [۱۱].

همانگونه که در ارتباط با کارهای تحقیقاتی پیشین بیان شد سنجشگرهای گاما نقش مهمی را در صنایع مختلف با هدف اندازه‌گیری غلظت سیال چندفازی و در ادامه آنالیز پارامترهای مختلف برای کنترل فرآیند، تضمین کیفیت و ایمنی ایفا می‌کنند. فناوری گاما به دلیل توانایی آنها در نفوذ به مواد و ارائه اطلاعات دقیق در مورد ترکیب آنها، به طور گسترده در شرایط دشوار عملیاتی و بر روی لوله‌های قطور جریان کاربرد دارند.

در این مقاله بهینه‌سازی باریکه‌ساز در سامانه غلظت‌سنج هسته‌ای از حیث پارامترهای تاثیرگذار و مهم ابعادی، هندسی و ایمنی به‌منظور دستیابی به بیشینه دقت در اندازه‌گیری غلظت گل و لای همگن عبوری از خط لوله جریان متصل به لایروب برنده-مکش مورد نظر است. وجه تمایز و نوآوری در این کار تحقیقاتی تمرکز بر شکل‌دهی باریکه خروجی از باریکه‌ساز و بررسی انواع مختلف آن با هدف حصول بیشینه توان تفکیک مقادیر مختلف غلظت گل و لای است.

۲- روش انجام تحقیق

طرحی از اصول اندازه‌گیری یک سامانه غلظت‌سنج هسته‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است.



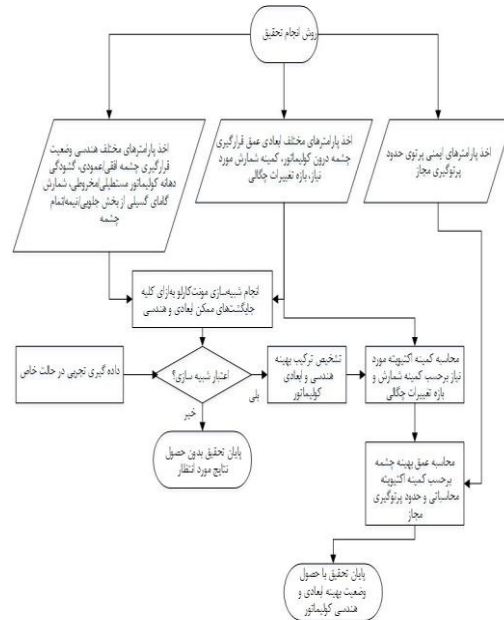
شکل ۲- اجزای تشکیل دهنده بخش هسته‌ای غلظت‌سنج لایروب [۱۲].

بخش مغناطیسی غلظت سنج لایروب بر پایه القای الکترومغناطیسی فارادی عمل و با اعمال یک میدان مغناطیسی جریان متناوب عبوری از سیم‌پیچ تعبیه شده حول لوله، سیگنال الکتریکی حاصل از فرایند القای الکترومغناطیسی را توسط دریافت کننده‌های عمود بر جهت میدان دریافت و در مرحله کالیبراسیون، برای سیال عبوری (آب) با چگالی ۱۰۰۰ گرم بر سانتیمتر مکعب و دمای $^{\circ}\text{C}$ ۲۸ در محدوده سرعت‌های ۰ تا ۱۰ متر بر ثانیه کالیبره می‌گردد.

۲-۱- شبیه‌سازی

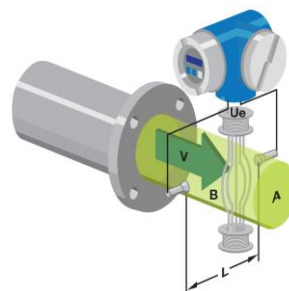
مدلسازی و شبیه‌سازی ابزاری حیاتی در مهندسی است که در حوزه‌های مختلف صنعتی اهمیت زیادی دارد. از طریق مدلسازی و در ادامه شبیه‌سازی، مهندسان می‌توانند طراحی سامانه را بهینه کنند و قبل از راه‌اندازی نمونه‌های اولیه یا پیاده‌سازی پرهزینه تصمیم‌گیری کنند. یکی از دلایل اصلی اهمیت شبیه‌سازی در مهندسی، توانایی آن در پیش‌بینی و درک رفتار سامانه‌های پیچیده است. مهندسان اغلب با سامانه‌های پیچیده‌ای سر و کار دارند که متغیرهای متعددی را شامل می‌شود [۱۶]. علاوه بر بهینه‌سازی طراحی، شبیه‌سازی به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند [۱۷]. در صنعت هسته‌ای به سبب بهره‌گیری از چشمه‌های پرتوزا و مولدهای پرتوهای یونساز شبیه‌سازی اهمیت دو چندان می‌یابد. محققان می‌توانند تجربیات ارزشمندی را در کار با مواد و ابزارهای هسته‌ای مختلف از قبیل چشمه‌های پرتوزا و آشکارسازهای مختلف را بدون خطر پرتوگیری با استفاده از شبیه‌سازی به دست آورند. به‌عنوان نمونه توسعه‌یافته کد مونت کارلو MCNPX به‌عنوان نمونه توسعه‌یافته کد مونت کارلو MCNP^2 جهت انجام فرایند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]. مطابق با شکل ۵، از چشمه استوانه‌ای کبالت-۶۰ به طول ۴/۱ سانتیمتر و قطر ۱/۲ سانتیمتر با انرژی میانگین ۱۲۵۰ کیلو الکترون‌ولت در عمق‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتری درون باریکه‌ساز سربی در شبیه‌سازی استفاده گردید. فرایند داده‌گیری در ۲ موقعیت قرارگیری عمودی و افقی چشمه درون باریکه‌ساز و به‌ازای وضعیت گشودگی دهانه باریکه‌ساز مخروطی و استوانه‌ای صورت پذیرفت. تالی F8 در این فرایند به‌منظور محاسبه آهنگ شمارش دو آشکارساز گایگر-مولر استوانه‌ای با طول ۲۷ سانتیمتر و قطر ۲/۲۸ سانتیمتر در سه حالت ممکن

دوغاب به‌عنوان معیار اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. پس از تایید همخوانی این نتایج با داده شبیه‌سازی، و با اعتماد به نتایج شبیه‌سازی در سایر مقادیر هندسی و ابعادی ساختار بهینه باریکه‌ساز بدست آمد. نمودار روش تحقیق در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار روش انجام تحقیق.

در ادامه نیز با بهره‌گیری از تلفیق بخش هسته‌ای و مغناطیسی امکان اندازه‌گیری همزمان چگالی و دبی حجمی دوغاب به‌منظور محاسبه دبی حجمی خاک اشباع و دبی جرمی خاک خشک عبوری از خط لوله جریان فراهم خواهد شد. طرح اصول اندازه‌گیری یک سامانه غلظت‌سنج هسته‌ای در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- اجزای تشکیل دهنده بخش مغناطیسی غلظت‌سنج لایروب، (A) سطح مقطع سیال عبوری از لوله جریان، (B) میدان مغناطیسی عمود بر جریان عبوری سیال، (V) بردار سرعت سیال عبوری، و (Ue) اختلاف پتانسیل الکتریکی القایی [۱۵].

² Monte Carlo N-Particle

چگالی های مورد نظر ثبت و محاسبه می‌گردد. به‌ازای هر مقدار چگالی دوغاب این امکان فراهم است تا با داشتن مقادیر درصد وزنی خاک و آب و نیز ترکیبات عنصری هر کدام، ضرایب فراوانی درصدی تک‌تک عناصر در کارت داده کد مطابق با فرمولاسیون زیر محاسبه و به ورودی برنامه داده شود:

$$wf_j = \sum_i wf_i \cdot \frac{M_j}{M_i} \quad (2)$$

wf_i درصد جرمی خاک رس و آب در دوغاب و wf_j ضریب فراوانی درصدی عنصر j در دوغاب می‌باشد. M_j و M_i نیز به ترتیب وزن اتمی خاک رس و آب و عنصر j در دوغاب است. محدودیت‌های مرتبط با اعمال اصول حفاظت در برابر با اشعه پارامتر مهمی است که می‌تواند پس از انجام شبیه سازی، ابعاد و هندسه بخش قبل را تایید کند. کمیت مفیدی که دارای توانایی تفکیک اثرات انواع مختلف پرتوها در بافت‌های مختلف بدن بوده و جهت تعیین حدود پرتوگیری برای اطمینان از وقوع اثرات احتمالی پرتو در محدوده کمتر از آستانه‌های پذیرفتنی استفاده می‌شود دز معادل نامیده می‌شود. مقدار دز معادل پرتو R برابر با حاصل ضرب دز متوسط جذب‌شده ($D_{T,R}$) از این پرتو در بافت T در ضریب توزین پرتو (W_R) است که در یک میدان مختلط پرتو، مقدار دز معادل از جمع اثر همه انواع پرتوها و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

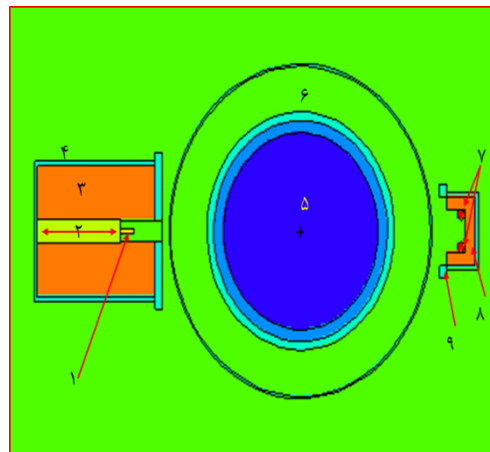
$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (3)$$

مقادیر ضریب توزین پرتو ابتدا در کمیته فنی ICRP-60 و تغییرات پیشنهادی در ادامه در ICRP-103 مطرح و مورد پذیرش قرار گرفتند [۲۰ و ۲۱]. یکای این کمیت ژول بر کیلوگرم است که با نام ویژه سیورت بیان می‌شود. آنچه به استناد استانداردهای موجود در این حوزه ضروری است لزوم کاهش میزان دز معادل در ۵ سانتیمتری اطراف باریکه‌ساز چشمه تا مقدار ۵۰۰ میکروسیورت بر ساعت برای پرتوکاران می‌باشد [۲۲].

۲-۲- اعتبارسنجی شبیه‌سازی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با نتایج داده‌گیری تجربی و با توجه به عدم وجود انعطاف زیاد در طراحی و ساخت باریکه‌سازهای موجود در آزمایشگاه، نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به قرارگیری افقی چشمه

سطح فعال درگیر از چشمه شامل بخش جلویی، میانی و انتهایی آن استفاده گردید. کلیه شبیه‌سازی‌ها با 10^8 ذره و با خطای بیشینه ۱٪ برای مقادیر چگالی ۱ و ۱/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب به ترتیب برای آب و خاک رس انجام شد.



شکل ۵- هندسه شبیه‌سازی در محیط مونت کارلو (۱) چشمه حالت قرارگیری افقی (۲) عمق قرارگیری (۳) حفاظ سربی (۴) بدنه استیل (۵) دوغاب (۶) مخزن فلزی (۷) آشکارسازها (۸) قاب سربی و (۹) پوشش استیل قاب آشکارساز.

در ارتباط با چشمه آنچه می‌تواند بر روی دقت اندازه‌گیری و قدرت تفکیک مقادیر مختلف غلظت دوغاب موثر باشد در میزان فعالیت پرتوایی چشمه، نوع و انرژی گسیلی پرتوهای گاما و جنس و هندسه باریکه‌ساز مورد استفاده خلاصه می‌شود. از آنجا که تأمین چشمه پرتو از اهمیت خاصی برخوردار است با توجه به امکان تولید فعالیت‌های پرتوایی مورد نیاز از چشمه کبالت-۶۰ در داخل کشور تمرکز در این کار تحقیقاتی بر روی بهینه‌سازی هندسه باریکه‌ساز و حفاظ آشکارساز برای این چشمه صورت گرفت. بدین منظور پارامترهای اساسی هندسی عمق استقرار چشمه، قرارگیری عمودی/ افقی چشمه درون باریکه‌ساز، هندسه گشودگی روزنه باریکه‌ساز مخروطی/ استوانه ای و سطح فعال درگیر از چشمه در اندازه گیری و گسیل پرتو به سمت آشکارساز در سه حالت بخش جلویی، میانی و انتهایی طی فرایند شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت.

در آماده‌سازی مقادیر مختلف چگالی دوغاب از ترکیب عنصری خاک جهانی موجود در جدول ۵ مقاله مرجع وایلوپولسکی و همکاران استفاده شد [۱۹]. در ادامه و با اضافه نمودن خاک به استوانه مدرج حاوی مقادیر حجمی و جرمی معین آب واقع بر روی ترازوی دیجیتال، جرم و درصد جرمی خاک لازم برای رسیدن به دوغاب همگن با

V سرعت لحظه‌ای دوغاب عبوری و D نیز قطر لوله جریان است. ρ_s مقدار چگالی خاک اشباع با نمونه‌گیری در محل لایروب قابل اندازه‌گیری است. روش کار به این صورت است که مقداری از دوغاب در ظرفی مدرج واقع بر روی ترازو قرار داده شده و پس از زمان کافی جهت ته‌نشینی کامل خاک، تمام آب روی این خاک خیس به آرامی برداشته می‌شود. چگالی خاک خیس خورده نهایی تحت عنوان چگالی خاک اشباع ثبت می‌گردد. فرمولاسیون مورد استفاده در محاسبه دبی حجمی خاک اشباع به قرار زیر است:

$$Q_s = Q_{mix} \times \left[\frac{\rho_{mix} - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right] \quad (۶)$$

پس از محاسبه مقدار Q_s و با داشتن مقادیر ρ_{mix} و Q_{mix} امکان محاسبه دبی جرمی خاک خشک با استفاده از فرمولاسیون زیر فراهم است:

$$M_{ds} = Q_{mix} \times \left[\frac{\rho_{mix} - \rho_w}{\rho_{ds} - \rho_w} \right] \times \rho_{ds} \quad (۷)$$

۴-۲- روش تجربی

در انتها و پس از دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای هندسی، ابعادی و فعالیت چشمه، طراحی و در ادامه ساخت باریکه‌ساز نهایی جهت انجام فرایند تست و داده‌گیری تجربی انجام شد. بدین منظور و پس از ساخت و نصب باریکه‌ساز چشمه و آشکارساز حول لوله، فرایند تحویل خوراک به لوله، هم‌زدن و همگن‌سازی مطلوب و در نهایت شمارش در بازه زمانی مناسب انجام گردید. نمونه‌های مختلف دوغاب آب و گل پس از اضافه نمودن مقادیر افزایشی خاک به آب درون لوله و همگن‌سازی و سپس نمونه‌برداری و سنجش چگالی توسط استوانه مدرج واقع بر روی ترازوی دیجیتال آماده و مورد شمارش قرار می‌گیرند. شکل (۶) نمایی از سیستم غلظت‌سنج هسته‌ای مورد استفاده در فرایند داده‌گیری تجربی را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که پرتوهای گاما در طیف امواج الکترومغناطیسی با سرعتی برابر با سرعت نور در فضا گسیل می‌شوند که با مرتبه بزرگی 10^8 برابر سرعت‌های معمول دوغاب عبوری از لایروب، امکان بکارگیری نمونه‌های از پیش آماده شده را در غیاب تست لوپ فراهم می‌آورد.

کبالت-۶۰ با فعالیت ۵ میلی‌کوری درون باریکه‌ساز و در عمق ۷ سانتیمتری و با گشودگی دهانه مستطیلی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳- محاسبات ریاضی

در مرحله نخست اندازه‌گیری دو پارامتر عملیاتی مهم سرعت سیال عبوری از لوله در لحظه و نیز چگالی آن مطرح است. سرعت توسط بخش مغناطیسی غلظت‌سنج اندازه‌گیری می‌شود و برای اندازه‌گیری چگالی از نرخ شمارش لحظه‌ای آشکارسازهای گایگر-مولر بهره برده می‌شود. در ادامه مسئله اندازه‌گیری به محاسبه کسر حجمی خاک اشباع در دوغاب و سپس کسر خاک خشک در خاک اشباع تقلیل می‌یابد. در نهایت با داشتن مقادیر کسر حجمی، چگالی، سرعت، و سطح مقطع لوله مقادیر دبی حجمی خاک اشباع و جرم کل خاک خشک عبوری از لوله قابل محاسبه است. فرمولاسیون مورد استفاده در محاسبه چگالی لحظه‌ای دوغاب عبوری به قرار زیر است:

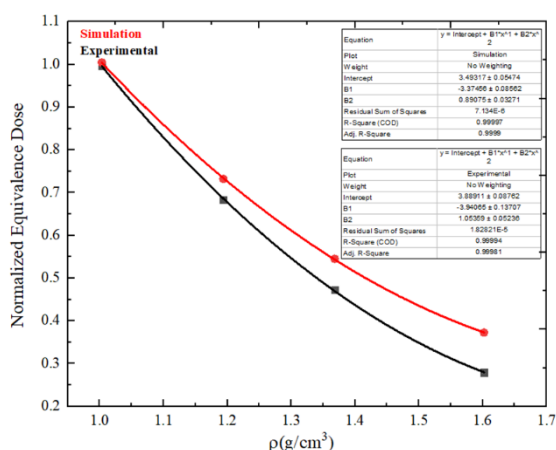
$$\rho_{mix} = (\rho_w - \rho_{ds}) \times \left[(1 - \chi_w) \times \left(\frac{\ln(I_{mix}) - \ln(I_s)}{\ln(I_w) - \ln(I_s)} \right) + \chi_w \right] + \rho_{ds} \quad (۴)$$

I_w و I_s به ترتیب مقادیر شدت شمارش آشکارساز در شرایطی است که لوله توسط دوغاب، خاک اشباع، و آب پر شده باشد. مقدار کمیت نخست لحظه‌ای و دو کمیت دیگر در مرحله کالیبراسیون اندازه‌گیری می‌شوند. ρ_w مقدار چگالی آب است که با نمونه‌گیری در محل لایروب، مشخص می‌شود. ρ_{ds} مقدار چگالی خاک خشک است که از طریق برون‌یابی نمودار خطی منطبق بر تغییرات چگالی دوغاب برحسب کسر آب محاسبه و برابر با عرض از مبدا نمودار مذکور و در محدوده تقریبی چگالی سیلیکون یعنی ۲/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب لحاظ می‌شود. χ_w درصد حجمی آب در خاک اشباع است که با استفاده از نمودار خطی فوق‌الذکر و برابر با مقدار کسر آب متناظر با مقدار چگالی خاک اشباع و برابر با ۰/۴۵ خواهد بود.

فرمولاسیون مورد استفاده در محاسبه دبی حجمی دوغاب عبوری به قرار زیر است:

$$Q_{mix} = V \times 1/4\pi \times D^2 \quad (۵)$$

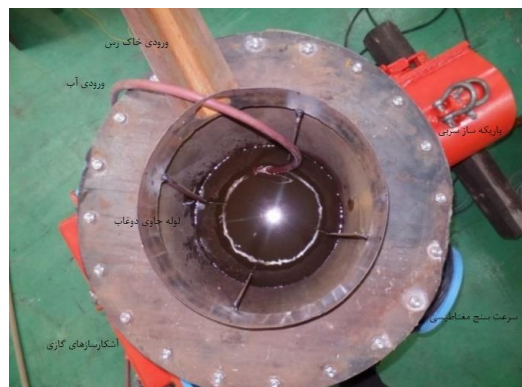
مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه تغییرات دز معادل نرمالیزه شده برحسب چگالی دوغاب در وضعیت چشمه افقی و گشودگی باریکه‌ساز مستطیلی به‌ازای تابش‌های گسلی از بخش جلویی چشمه در عمق ۷ سانتیمتر حاصل از داده‌گیری تجربی و شبیه‌سازی.

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی

در ادامه و پس از اخذ تایید اعتبار شبیه‌سازی، نوبت به انجام فرایند شبیه‌سازی برای کلیه حالات ۴ گانه چشمه افقی/گشودگی مستطیلی، چشمه افقی/گشودگی مخروطی، چشمه عمودی/گشودگی مستطیلی، و چشمه عمودی/گشودگی مخروطی رسید. به‌ازای تمام این حالات هندسی آهنگ شمارش در ۳ وضعیت سطح فعال چشمه جلویی، میانی و انتهایی طی فرایند شبیه‌سازی محاسبه گردید. در هر کدام از فایل‌های ورودی به کد مونت کارلو چشمه در یکی از ۴ عمق قرارگیری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر از حفاظ سربی قرار داده شد. در این بخش و ضمن حفظ مشخصات هندسی، ابعادی و جنس لوله، محتوای دوغاب درون آن، آشکارسازهای گازی، فواصل نسبی حفاظ سربی و آشکارساز و لوله، تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب محاسبه گردید. همچنان از تالی F8 در شبیه‌سازی به‌منظور محاسبه آهنگ شمارش دو آشکارساز گایگر-مولر استوانه‌ای با طول ۲۷ سانتیمتر و قطر ۲/۲۸ سانتیمتر استفاده شد. کلیه شبیه‌سازی‌ها با 10^8 ذره و با خطای بیشینه ۱٪ برای مقادیر چگالی بین ۱ و ۱/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب مربوط به دوغاب آب و خاک رس انجام شد. در نمودار شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی در چهار وضعیت مختلف هندسی یادشده نشان داده شده است.



شکل ۶- نمایی از سامانه داده‌گیری تجربی موجود در آزمایشگاه

۳- نتایج

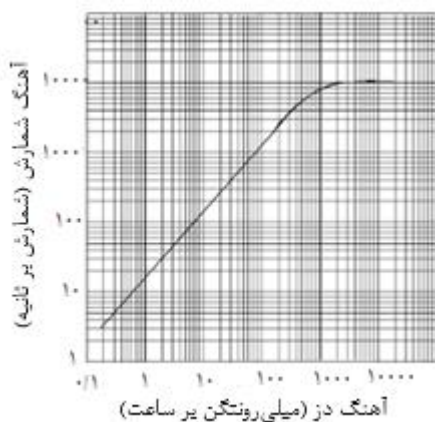
۱-۳- نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی

در ابتدا و به‌منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی در محیط MCNPX نیاز به مقایسه این نتایج به‌ازای حالات هندسی و ابعادی مشابه با یک نمونه معتبر احساس گردید. بدین منظور و با توجه به باریکه‌ساز موجود در آزمایشگاه، تغییرات دز معادل برازش‌شده برحسب چگالی دوغاب در وضعیت قرارگیری افقی چشمه کبالت-۶۰ با اکتیویته ۲۰۵ میلی-کوری درون باریکه‌ساز با دهانه گشودگی مستطیلی در محیط شبیه‌سازی و طی فرایند داده‌گیری تجربی بدست آمد. در هر دو این موارد صرفاً تابش‌های ناشی از بخش جلویی چشمه واقع در عمق ۷ سانتیمتری از حفاظ سربی استوانه‌ای در شمارش آشکارسازهای گازی گایگر-مولر دخیل بودند. تالی مورد استفاده در شبیه‌سازی، F8، جهت محاسبه آهنگ شمارش دو آشکارساز گایگر-مولر استوانه‌ای با طول ۲۷ سانتیمتر و قطر ۲/۲۸ سانتیمتر استفاده گردید. کلیه شبیه‌سازی‌ها با 10^8 ذره و با خطای بیشینه ۱٪ برای مقادیر چگالی بین ۱ و ۱/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب مربوط به دوغاب آب و خاک رس انجام شد. نمودار شکل (۷)

شبیه‌سازی صحنه گذاشته و استفاده از سایر نتایج شبیه‌سازی برای رسیدن به ساختار هندسی و ابعادی بهینه باریکه‌ساز چشمه را توجیه می‌کند.

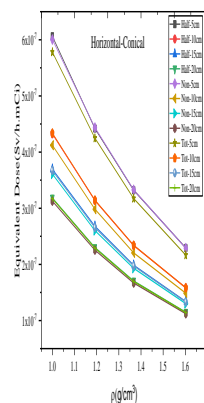
در تعیین بیشترین توان تفکیک بین مقادیر مختلف چگالی دوغاب از یک طرف گرادیان تغییرات شمارش بر حسب چگالی و از طرف دیگر خطای ناشی از آمار شمارش مهم است. با توجه به نمودار شکل (۸) وضعیت قرارگیری چشمه افقی درون باریکه‌ساز با بیشینه همزمان گرادیان و آمار شمارش به ترتیب برای تابش‌های ناشی از نیم، جلو و تمام چشمه مواجه است که با کاهش عمق نیز افزایش می‌یابد. در تمام وضعیت‌های یادشده گشودگی دهانه باریکه‌ساز مخروطی نسبت به مستطیلی از حساسیت و توان تفکیک بالاتری برخوردار است.

با احتساب دامنه شمارشی معقول از مرتبه بزرگی ۱۰۰۰ و با بهره‌گیری از نمودارهای کالیبراسیونی دز بر حسب شمارش، دستیابی به مقدار آهنگ دز ۶/۵ میکروسیورت بر ساعت و در ادامه بازه فعالیت پرتوزایی ۲۶ تا ۵۲ میلی‌کوری از چشمه کبالت-۶۰ متناظر با مقادیر چگالی دوغاب ۱ و ۱/۶ گرم بر سانتیمتر نیاز است.

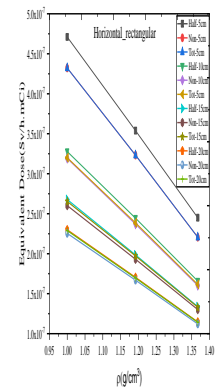


شکل ۹- منحنی کالیبراسیون تغییرات دز معادل بر حسب شمارش در آشکارساز گایگر-مولر [۲۳].

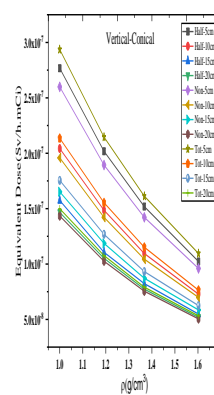
بر اساس استاندارد ملی پایه حفاظت در برابر اشعه ضروری است به فاصله ۵ سانتیمتری باریکه‌ساز در هیچ جایی مقدار آهنگ دز از ۵۰۰ میکروسیورت بر ساعت تجاوز نکند. با استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی برخط معتبر [۲۴]، بازای عمق‌های مختلف مقدار آهنگ دز در این فاصله از باریکه‌ساز سربی و در دو حالت حدی فعالیت ۲۶ و ۵۲ میلی‌کوری محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شد.



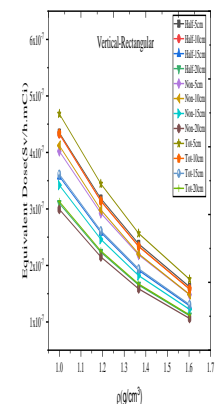
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸- تغییرات دز معادل بر حسب چگالی دوغاب در وضعیت (الف) چشمه افقی و گشودگی باریکه‌ساز مستطیلی، (ب) چشمه افقی و گشودگی باریکه‌ساز مخروطی، (ج) چشمه عمودی و گشودگی باریکه‌ساز مستطیلی و (د) چشمه عمودی و گشودگی باریکه‌ساز مخروطی به‌زای تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه در عمق‌های مختلف.

۳-۳- استخراج پارامترهای بهینه

معادلات برازش اعمالی بر نمودار شکل (۷) می‌توان مبنای کمی مناسبی را برای صحت‌سنجی اعتبار شبیه‌سازی ارائه دهد. اختلاف نسبی درصدی مقادیر دز معادل برازش‌شده برای این دو نمودار به قرار زیر است:

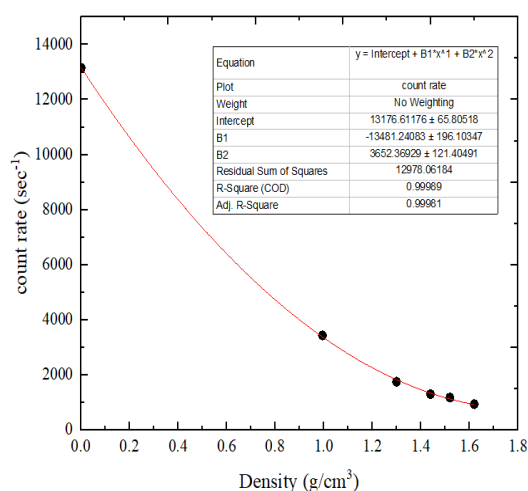
$$\frac{Sim - Exp}{Sim} (\%) = \begin{cases} 0.99 \\ 26.32 \end{cases} \quad (۸)$$

اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و تجربی با افزایش چگالی دوغاب روندی افزایشی را دارد و روند کلی تغییرات شمارش برای این دو وضعیت در توافق با یکدیگر است که بر اعتبار

۳-۴- نتایج تجربی

با تعبیه باریکه‌ساز بهینه و آشکارسازهای گازی حول بدنه غلظت‌سنج هسته‌ای مطابق شکل (۱۰) و آماده‌سازی مقادیر مختلف چگالی دوغاب امکان تست و داده‌گیری تجربی برای مقادیر مختلف چگالی دوغاب فراهم و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

داده جدول فوق همواره با خطای ناشی از آمار شمارش برابر با جذر مقدار شمارشی همراه است. در ادامه و همانگونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است با استفاده از این مقادیر نرخ شمارش ثبت‌شده، منحنی کالیبراسیون سامانه غلظت سنج هسته‌ای لایروب ترسیم گردید.



شکل ۱۱- منحنی کالیبراسیون بخش هسته‌ای غلظت‌سنج هسته‌ای لایروب

در انتها نیز نتایج کالیبراسیون بخش مغناطیسی غلظت‌سنج به قرار زیر در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳- نتایج کالیبراسیون بخش مغناطیسی غلظت‌سنج لایروب.

ردیف	کسر مقیاس کل (%)	حجم عبوری مرجع (لیتر)	حجم عبوری اندازه‌گیری شده (لیتر)	مدت زمان (ثانیه)	درصد خطای اندازه‌گیری	عدم قطعیت در اندازه‌گیری
۱	۱۰	۵۰۱۳۱	۵۰۲۳۳	۱۰۰۳	۰/۲۰	
۲	۲۵	۱۳۰۱۱۱	۱۳۰۲۰۷	۱۰۴۱	۰/۱۹	
۳	۵۰	۲۵۰۰۱۱	۲۵۰۱۰۶	۱۰۰۰	۰/۰۴	۰/۱۲۶
۴	۷۵	۳۷۵۱۰۰	۳۷۵۵۰۰	۱۰۰۰	۰/۱۱	
۵	۱۰۰	۴۹۹۸۰۷	۴۹۹۹۰۱۱	۱۰۰۰	-۰/۱۶	

جدول ۱- آهنگ دز در فاصله ۵ سانتیمتری از حفاظ کروی سربی حول چشمه کبالت-۶۰ در بازه تغییرات فعالیت پرتوزایی ۲۹ تا ۵۲ میلی‌کوری.

آهنگ دز در فاصله ۵ سانتیمتری از حفاظ کروی فرضی حول چشمه (میکروسیورت بر ساعت)					
عمق (سانتیمتر)	۵	۱۰	۱۵	۲۰	
فعالیت پرتوزایی (میلی-کوری)	۲۶	۲۱۳۷/۷۹	۵۴/۲۶	۱/۵۱	۰/۰۵
	۵۲	۴۲۷۵/۵۸	۱۰۸/۵۳	۳/۰۱	۰/۰۹

با توجه به نتایج محاسباتی فوق عمق مناسب بین ۵ تا ۱۰ سانتیمتر است که با تکرار محاسبات برخط و با اعمال محدودیت تجاوز دز از مقدار ۵۰۰ میکروسیورت بر ساعت عمق بهینه ۷ سانتیمتر و فعالیت پرتوزایی ۲۶ میلی‌کوری به‌عنوان گزینه بهینه انتخاب گردید.



شکل ۱۰- غلظت‌سنج هسته‌ای بهینه‌سازی شده و مورد استفاده جهت داده‌گیری تجربی

جدول ۲- داده تجربی سامانه غلظت سنج لایروب

میانگین نرخ شمارش در (شمارش در ثانیه)	چگالی دوغاب (گرم بر سانتیمترمکعب)					
	۰/۰۰۱۲۵	۰/۱۹۹۵	۱/۳	۱/۴۴	۱/۵۲	۱/۶۲
آشکارساز ۱	۵۹۲۲	۱۵۷۳	۸۱۳	۶۰۵	۵۶۹	۴۴۱
آشکارساز ۲	۷۲۳۳	۱۸۵۹	۹۳۷	۶۹۱	۶۰۸	۴۹۴
مجموع آشکارسازهای ۲و۱	۱۳۱۵۵	۳۴۳۲	۱۷۵۰	۱۲۹۶	۱۱۷۷	۹۳۵

۴- نتیجه‌گیری

گردید تا حالت بهینه ابعادی و هندسی باریکه‌ساز در ادامه و براساس داده‌های خروجی موجود در شکل (۸) استخراج گردد. در ادامه و به‌منظور رسیدن به پاسخ بهینه مربوط به عمق قرارگیری چشمه کبالت-۶۰ و نیز میزان فعالیت پرتوزایی مورد نیاز، محاسبات ایمنی پرتوی انجام گرفت. آنچه در انتها و پس از ساخت و نصب باریکه‌ساز بهینه‌نهایی بر روی لوله حاوی دوغاب با مقادیر مختلف چگالی در آزمایشگاه صورت پذیرفت گویای این مهم است که نمونه بهینه و بومی‌سازی‌شده این سیستم هسته‌ای قادر است با درصد خطای پایین (مطابق با نمودار شکل ۱۱) امکان بکارگیری همزمان با واحد مغناطیسی را جهت اندازه‌گیری آنلاین مقادیر دبی حجمی خاک اشباع و دبی جرمی خاک خشک در یک سیستم لایروب فراهم کند.

ارائه سیستم غلظت‌سنج هسته‌ای بهینه لایروب به‌منظور محاسبات دقیق مالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مورد این واحد هسته‌ای آنچه به‌طور معمول مورد استفاده است به‌صورت جعبه سیاهی بدون انتشار اطلاعات از طرف شرکت‌های معتبر بین‌المللی باقی می‌ماند. در این کار تحقیقاتی و با هدف ارائه یک سیستم بومی و بهینه‌سازی شده از حیث ابعاد و هندسه باریکه‌ساز در کنار نوع و فعالیت پرتوزایی چشمه رادیواکتیو شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNP صورت پذیرفت.

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته برای شبیه‌سازی مطابق با داده‌های ارائه‌شده در شکل (۷) این امکان فراهم

مراجع

- [1] <http://psanjeshp.ir>.
- [2] F.R. Bryan, and G.A. Nahstoll. "An Industrial Application of Geiger-Müller Counters to the Analysis of Phosphorus in Steels." *JOSA* 38, no. 6 (1948): 510-517.
- [3] D. Arbutina, and A. Vasić-Milovanović. "Improving the geiger muller counter characteristics by optimizing the anode and cathode radius dimensions." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 67, no. 10 (2020): 2231-2237.
- [4] C.M. Barbosa, H.O. Kenup-Hernandes, C. Raitz, R.S.de.F. Dam, W.L. Salgado, I.C.B. Lima, D. Braz, and C.M. Salgado. "Development of a non-invasive method for monitoring variations in salt concentrations of seawater using nuclear technique and Monte Carlo simulation." *Applied Radiation and Isotopes* 174 (2021): 109784.
- [5] G.A. Johansen, and P. Jackson. "Salinity independent measurement of gas volume fraction in oil/gas/water pipe flows." *Applied Radiation and Isotopes* 53, no. 4-5 (2000): 595-601.
- [6] M.B. Holstad, "Gamma-ray scatter methods applied to industrial measurement systems." No. NEI-NO--1551. Bergen University. Dept. of Physics and Technology, (2004).
- [7] C. Sætre, G.A. Johansen, and S.A. Tjugum. "Salinity and flow regime independent multiphase flow measurements." *Flow Measurement and Instrumentation* 21, no. 4 (2010): 454-461.
- [8] C.M. Salgado, L.E.B. Brandão, C.M.N.A. Pereira, and W.L. Salgado. "Salinity independent volume fraction prediction in annular and stratified (water-gas-oil) multiphase flows using artificial neural networks." *Progress in Nuclear Energy* 76 (2014): 17-23.
- [9] O. Farid, B. Qi, S. Uribe, and M. Al-Dahhan. "New dual modality technique of gamma-ray densitometry (GRD) and optical fiber probe (OFP) to investigate line-averaged diameter profiles of gas, liquid, and solid holdups along the height of a slurry bubble column." *Chemical Engineering Science* (2023): 119032.
- [10] W.L. Salgado, R.S.de.F. Dam, T.P. Teixeira, C.C. Conti, and C.M. Salgado. "Application of artificial intelligence in scale thickness prediction on offshore petroleum using a gamma-ray densitometer." *Radiation Physics and Chemistry* 168 (2020): 108549.
- [11] R.S.de.F. Dam, M.C. Dos Santos, W.L. Salgado, B.L. da Cruz, R. Schirru, and C.M. Salgado. "Prediction of fluids volume fraction and barium sulfate scale in a multiphase system using gamma radiation and deep neural network." *Applied Radiation and Isotopes* 201 (2023): 111021.
- [12] H. Cember. "Introduction to health physics." (1969): xi+-422.
- [13] D.F. Swinehart. "The beer-lambert law." *Journal of Chemical Education* 39, no. 7 (1962): 333.
- [14] World Health Organization. "Radiation protection and the safety of radiation sources." (1996).

- [15] Y. Jiang, W. Jiang, and C. Zhang. "Simulation Research on Optimal Installation Position of partially-filled pipe Electromagnetic Flowmeter sensor." *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1453, no. 1, p. 012074. IOP Publishing, 2020.
- [16] R. Sinha, C.J.J. Paredis, V. Liang, and P.K. Khosla. "Modeling and simulation methods for design of engineering systems." *J. Comput. Inf. Sci. Eng* 1, no. 1 (2001): 84-91.
- [17] A. Rosova, M. Behun, S. Khouri, M. Cehlar, V. Ferencz, and M. Sofranko. "Case study: the simulation modeling to improve the efficiency and performance of production process." *Wireless Networks* 28, no. 2 (2022): 863-872.
- [18] L. Waters. "MCNPX user's manual." *Los Alamos National Laboratory* 124 (2002).
- [19] L. Wielopolski, Z. Song, I. Orion, A.L. Hanson, and G. Hendrey. "Basic considerations for Monte Carlo calculations in soil." *Applied Radiation and Isotopes* 62, no. 1 (2005): 97-107.
- [20] B.E. Heinmiller. Review of ICRP Publication 60. No. AECL--10563. Atomic Energy of Canada Ltd., 1992.
- [21] R.J. Vetter, "ICRP Publication 103, The recommendations of the international commission on radiological protection." (2008): 445-446.
- [22] A.C. Upton. "The biological effects of low-level ionizing radiation." *Scientific American* 246, no. 2 (1982): 41-49.
- [23] https://www.gqelectronicsllc.com/forum/topic.asp?TOPIC_ID=4578.
- [24] www.radprocalculator.com.