

Conceptual Design of Formation Water Salinity Meter System based on Gamma Technique

Mohsen Sharifzadeh

Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School

mssharifzadeh@aeoi.org.ir

DOI: 10.22078/pr.2023.5226.3316

Received: August/21/2023

Accepted: October/11/2023

Introduction

Accurate measurement of formation water salinity is very important in various industries such as oil and gas exploration, environmental monitoring and groundwater management. The most of the measurement systems that can be installed on process pipelines in onshore/offshore locations are affected by the properties of salinity and electrical conductivity of the passing fluid. The water salinity leads to a change in the density and elemental content of the substance, and in the meantime, the existing salts are found as a solvent in the aqueous phase, so it is necessary to use the simultaneous measurement module of salinity in most of the mentioned systems [1-3]. In this research study, it was decided to investigate the possibility of measuring formation water salinity using the gamma technique with the conceptual design of a pass sampling system. This article presents the conceptual design of a formation water salinity measuring system based on the gamma technique passing through the pipe containing fluid flow, which focuses on the geometry configuration of the source collimator with the aim of improving the measurement accuracy and reducing the absorption dose of the personnel.

Materials and Methods

Theory

In the conceptual design of formation water salinity measurement using the gamma technique, the geometry and dimensions of the collimator opening, the depth

and location of the source inside the collimator, and the spatial angle related to the exploitation of the source emission radiation as parameters affecting the accuracy of different values of the salinity fraction was investigated [4].

Modelling

Modeling and simulation are vital tool in engineering, which is very important in various industrial fields [5]. In order to take advantage of modeling and simulation in the nuclear industry, Monte Carlo codes are widely used for various applications. MCNP, which stands for N-Particle Monte Carlo, is a widely used Monte Carlo code in the nuclear industry. It is a powerful and versatile simulation tool that allows accurate modeling of complex radiative transport processes [6]. A schematic of the headspace design in the Monte Carlo is shown in Fig. 1.

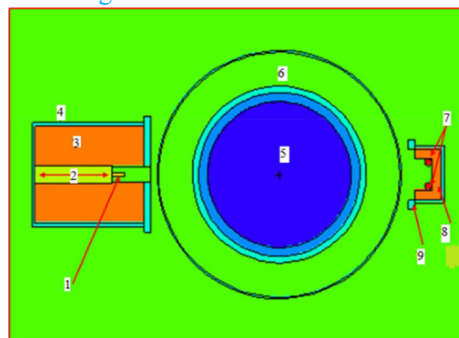


Fig. 1 A schematic of the headspace design in the Monte Carlo environment, 1) Source, 2) Depth, 3) Shield, 4) Body, 5) Fluid, 6) Pipe, 7) Geiger-Muller, 8) Frame, 9) Frame's coating.

The fluid used in the simulation is a mixture of water and NaCl salt. The density of this solution is in the range of 1 to 1.6 g/cm³. Different values of 5, 10, 15, and 20 cm were considered for the depth of the source inside the collimator. The source was set in two positions, vertical and horizontal inside the collimator and for each of these conditions, in the two collimator opening of conical and cylindrical. the counting rate changes by two Geiger-Mueller cylindrical detector was recorded in three possible states of the active surface involved in the source, including its front, middle and end parts.

Results and Discussion

The equivalent dose vs the density of the passing fluid in different positions of the source and also the types of collimator openings was drawn in Figs 2, 3, 4, and 5.

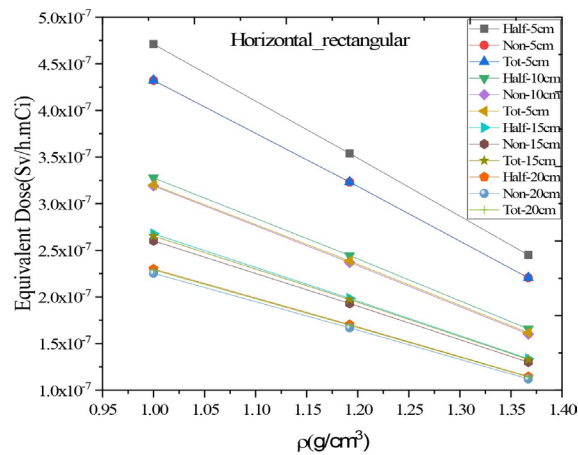


Fig. 2 The equivalent dose vs fluid density in horizontal-rectangular position.

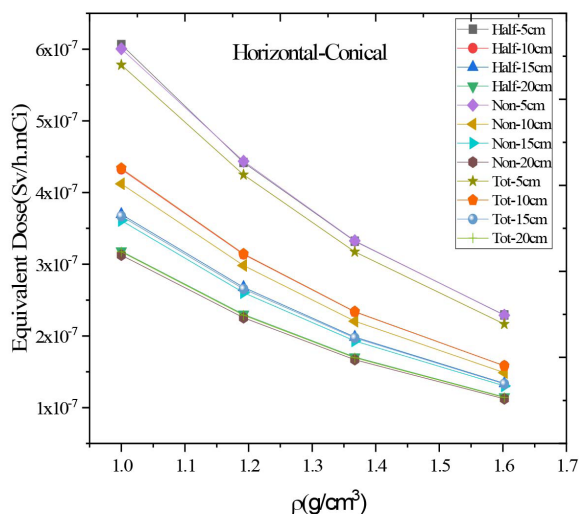


Fig. 3 The equivalent dose vs fluid density in horizontal-conical position.

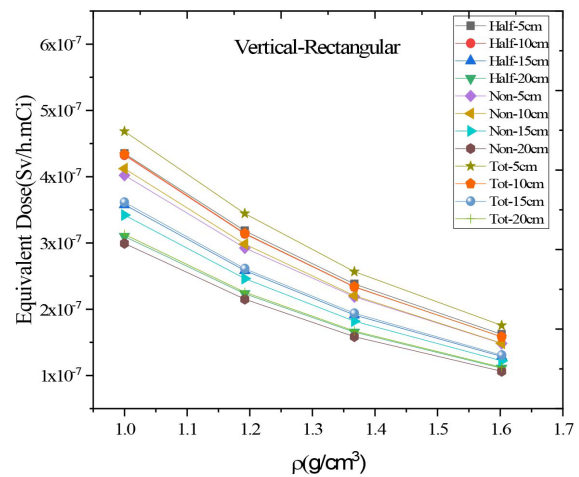


Fig. 4 The equivalent dose vs fluid density in vertical-rectangular position.

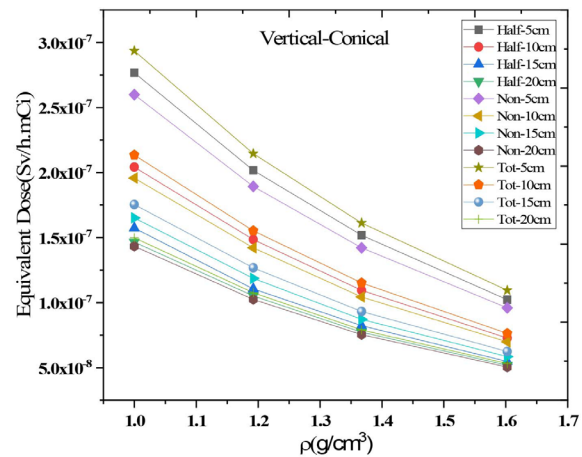


Fig. 5 The equivalent dose vs fluid density in vertical-conical position.

Conclusions

In determining the maximum differentiation between different densities of slurry passing through the pipe, what is important is the gradient of dose changes vs density. On the other hand, the counting sensitivity of the detectors is important to provide data with minimum error caused by the counting statistics.

The two positions of horizontal-conical and vertical-rectangular have higher sensitivity and differentiation, which after comparing the results of these two states, the geometry of the horizontal-conical is chosen as the optimal geometry.

Although a smaller depth is more suitable in terms of differentiation accuracy and sensitivity, but taking into account radiation safety considerations, a depth of 7 cm and an activity of 26 mCi were calculated as optimal options for the location of the 60Co source.

References

1. Holstad, M. B., & Johansen, G. A. (2005). Produced water characterization by dual modality

- gamma-ray measurements. *Measurement Science and Technology*, 16(4), 1007, doi: 10.1088/0957-0233/16/4/013.
2. Miller, G. J., Alexander, C. J., & Thompson, D. J. (1999). A high-accuracy, calibration-free multiphase meter, In 17th North sea flow measurement workshop, Oslo, Institute of Petroleum on behalf of NIF, NFOGM and NEL.
3. Thorn, R., Johansen, G. A., & Hammer, E. A. (1997). Recent developments in three-phase flow measurement, *Measurement Science and Technology*, 8(7), 691, doi: 10.1088/0957-0233/8/7/001.
4. Breton, D. J., Hamilton, G. S., & Hess, C. T. (2009). Design, optimization and calibration of an automated density gauge for firn and ice cores, *Journal of Glaciology*, 55(194), 1092-1100, doi: org/10.3189/002214309790794841.
5. Sinha, R., Paredis, C. J., Liang, V. C., & Khosla, P. K. (2001). Modeling and simulation methods for design of engineering systems. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, 1(1), 84-91.
6. Waters, L. S. (2002). MCNPX user's manual. Los Alamos National Laboratory, 124.

طراحی مفهومی سیستم شوری سنج آب سازند بر مبنای تکنیک گاما

محسن شریف‌زاده

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

چکیده

در فرآیند استخراج گاز و میعانات گازی از بستر دریا اغلب با جریانی چندفازی مواجه هستیم. جریان سیالات چندفازی برای عبور از لوله‌های انتقال نیازمند انجام جداسازی آب خروجی از سازند بر روی سکوها دریا به منظور حذف اثرات خوردگی در تاسیسات پایین دست نظیر پالایشگاه می‌باشد. آب سازند اغلب پس از جداسازی وارد دریا می‌شود. مانیتورینگ آب سازند از نظر میزان شوری بخش مهمی از فرآیند اندازه‌گیری دبی مولفه‌های جریان چندفازی در محل جداساز توسط سیستم‌های میتترینگ تک‌فازی است. نظر به وابستگی شدید پارامترهایی نظیر چگالی، ویسکوزیته و رسانایی الکتریکی سیال به میزان شوری، در این کار تحقیقاتی امکان طراحی مفهومی سیستم شوری‌سنج آب سازند بر مبنای تکنیک گاما را بررسی کردیم. به‌ازای تغییر در مشخصات کلیدی مربوط به شکل‌دهنده باریکه گامای گسیلی از چشمه رادیواکتیو کبالت-۶۰ و با ملاحظات مربوط به ایمنی پرتوی پرسنل شرایط بهینه هندسی و ابعادی یکسوساز به‌منظور دستیابی به بیشینه دقت در تفکیک مقادیر مختلف کسر شوری نمک دیدیم در آب را به‌دست آوردیم.

کلمات کلیدی: طراحی مفهومی، شوری، تکنیک گاما، شبیه‌سازی، مونت کارلو

مقدمه

است. عمده سیستم‌های اندازه‌گیری قابل نصب بر روی خطوط لوله فرآیندی در موقعیت‌های ساحل/فراساحل متأثر از خواص شوری و رسانایی الکتریکی سیال عبوری است. شوری آب که نماینده حضور نمک در آن است منجر به تغییر چگالی و محتوای عنصری ماده می‌گردد و در این بین نمک‌های موجود به‌صورت حلال در فاز آبی یافت می‌شوند لذا ضروری است که در عمده سیستم‌های مورد اشاره از مازول اندازه‌گیری هم‌زمان شوری استفاده گردد [۱-۳]. در تحقیقی که توسط مریک و همکاران صورت گرفت با استفاده از آنالیز گاماها‌ی آنی ساطع‌شده از نمونه آب دریا که پیش از این با

اندازه‌گیری دقیق شوری آب سازند در صنایع مختلف از جمله اکتشاف نفت و گاز، پایش محیط زیست و مدیریت آب‌های زیرزمینی بسیار مهم است. شوری آب سازند، که به محتوای نمک محلول اشاره دارد، اطلاعات ارزشمندی را در مورد سازندهای زمین‌شناسی ارائه می‌دهد و می‌تواند بر کارایی و ایمنی فرآیندهای استخراج تأثیر بگذارد. در این حوزه، توسعه یک سیستم قابل اعتماد و کارآمد برای اندازه‌گیری شوری آب سازند بسیار مهم

تابش باریکه نوترونی رادیواکتیو شده بود، نوع و غلظت نمک‌های موجود در نمونه آب دریا اندازه‌گیری شد [۴]. اگرچه روش مذکور به‌عنوان یکی از تکنیک‌های غیرتداخلی مهم که از دقت بالایی در تعیین درصد عناصر مختلف در شوری برخوردار است شناخته می‌شود اما با این ایراد اساسی مواجه است که چنان‌چه مراقبت لازم در طراحی و به‌کارگیری مواد مناسب در بدنه نمونه‌گیری انجام نشود می‌تواند با فعال‌سازی بدنه تحلیل‌گر به‌عنوان یک منبع آلودگی پرتوی مشکل‌ساز شود. در تحقیق دیگری توسط باربوسا و همکاران برروی توسعه روش غیرتداخلی استفاده از پرتوهای گاما برای اندازه‌گیری شوری آب دریا کار شد. در این روش با استفاده از طیف‌نگاری پرتو گامای کم‌انرژی تابیده به نمونه آب دریا مقدار پارامتر ضریب تضعیف جرمی آب شور و در ادامه کسر نمک موجود در آن اندازه‌گیری شد [۵]. پرتوهای گاما در قیاس با نوترون از مزیت عدم ایجاد آلودگی پرتوی جانبی به‌سبب فعال‌سازی رادیواکتیو بدنه تحلیل‌گر برخوردارند اما استفاده از گامای کم‌انرژی با عمق نفوذ اندک نه تنها نیازمند ساخت بدنه با مواد سبک است، بلکه به‌دلیل وابستگی سطح مقطع برهم‌کنش پرتوهای گاما در این محدوده انرژی به چگالی و عدد اتمی ماده جاذب می‌تواند به نتایج متفاوت در محاسبه شوری ترکیبات مختلف نمک در آب منجر شود. در تحقیقی توسط جوهانسون و جکسون برروی ارائه راهکاری نوین در اندازه‌گیری کسر گاز موجود در یک ترکیب دوفازی مستقل از شوری کار شد. در این مطالعه به‌منظور حذف وابستگی تغییرات گامای شمارشی عبوری از ترکیب به شوری، از دو مکانیزم 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 مجبور به استفاده

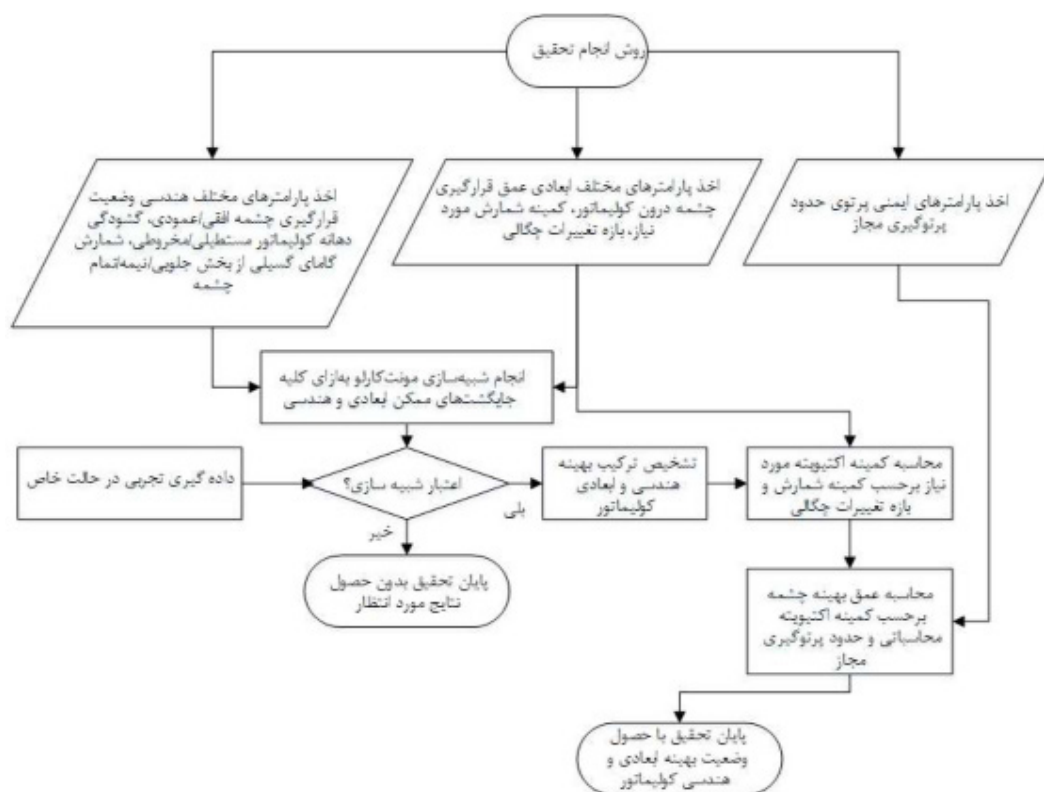
از چشمه کم‌انرژی امرسیوم-۲۴۱ شدند [۶]. اگرچه روش ارائه‌شده در این تحقیق از نوآوری لازم در زمان خود برخوردار بوده اما به‌سبب استفاده از گامای کم‌انرژی همچنان با چالش‌های مورد اشاره در این حوزه به‌عنوان نقطه ضعف اصلی مواجه خواهد بود. مطالعات مشابه دیگری نیز در ادامه توسط هولستاد و همکاران [۷] و ساتره و همکاران [۸] با استفاده از تلفیق تکنیک گامای عبوری و پراکنده برای اندازه‌گیری کسر فازی گاز درون مخلوط همگن دوفازی و مستقل از وابستگی به شوری صورت پذیرفت که در آنها نیز میزان شوری اندازه‌گیری و به‌منظور حذف وابستگی ضریب تضعیف جرمی مخلوط چندفازی به این پارامتر مورد استفاده قرار می‌گرفت. هولستاد و همکاران برروی استفاده از روند دوگانه شمارش پرتوهای گامای عبوری و پراکنده از محفظه تحلیل‌گر خاص طراحی شده بدین منظور کار کردند. در این پژوهش تمرکز بر تولید نمودارهای کالیبراسیونی وابستگی خوانش گاماها عبوری و پراکنده به نوع و میزان مولفه‌های مختلف شوری و در ادامه محاسبه مقادیر موجود در نمونه مجهول با استفاده از فرآیند درونیابی این نمودارها قرار گرفت [۹]. روش مورد اشاره از کارایی خوبی در به‌کارگیری پرتو گامای واحد برای استخراج بیشینه اطلاعات از نمونه آب شور برخوردار بود اما ضعف اصلی آن به‌کارگیری چشمه گامای کم‌انرژی و محدودیت‌های عملیاتی کار با این چشمه‌ها است. سالگادو و همکارانش 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 [۱۰]. 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 به‌همراه آشکارسازهای سوسوزن واقع در دو راستای عبوری و پراکنده و در دو رژیم

چشمه‌های کم‌انرژی نیز با انتخاب چشمه پرانرژی کبالت-۶۰ با انرژی میانگین $1/25 \text{ MeV}$ اجتناب گردد. ه ژئوفیزیک و چاه نگاری استفاده شده است.

روش

روش مورد استفاده در این کار تحقیقاتی استفاده از محیط شبیه‌ساز مونت کارلو با هدف بررسی تغییرات شمارش آشکارسازهای پرتوی گامای گسیلی از چشمه رادیواکتیو کبالت-۶۰ به‌ازای مقادیر مختلف کسر شوری آب-نمک است. بدین‌منظور تغییرات مقادیر مختلف پارمترهای هندسی و ابعادی یکسوساز چشمه و تأثیر در نرخ شمارشی بررسی و به‌منظور رسیدن به بیشینه دقت در تفکیک مقادیر مختلف شوری استفاده شد. در انتها نیز با اعمال محدودیت ایمنی پرتوی و مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی وضع‌شده در حوزه تنظیم مقررات پرتوی ساختار بهینه نهایی یکسوساز 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 مونت کارلو با نتایج داده‌گیری تجربی، به‌دلیل عدم وجود انعطاف لازم در ساخت و بهره‌گیری از کلیه طراحی‌های ممکن در یکسوسازهای موجود در آزمایشگاه، با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به‌حالت خاص یکسوساز موجود در آزمایشگاه، روند تغییرات شمارش برحسب چگالی محلول آب-نمک دیدید سدیدم به‌عنوان معیار اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. به‌سبب عدم امکان داده‌گیری تجربی برای تمام شرایط هندسی و ابعادی مورد بررسی در شبیه‌سازی، در یک وضعیت خاص تلاش شد تا فرآیند داده‌گیری تجربی انجام و پس از تأیید همخوانی این نتایج با داده‌های شبیه‌سازی، از نتایج آن برای فهم تغییرات در سایر شرایط هندسی و ابعادی جهت نیل به ساختار بهینه یکسوساز استفاده شد. فلوچارت روش مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مورد نظر استفاده شد. نقطه قوت کار در ارائه طرحی است که قادر است با کمک شبکه عصبی و اعمال ضرایب تصحیح تا حدودی اثرات منفی اندازه‌گیری وابسته به‌شوری و رژیم را حذف کند. از نقاط ضعف این سیستم استفاده از چشمه دوانرژی است که در تئوری می‌بایست با اولویت بسیار کم انرژی و پرانرژی انتخاب شود که در انرژی پایین همچنان با مشکلات پیشین روبرو است. جهت انجام فرآیند اندازه‌گیری شوری آب سازند نیاز به آنالیز آب جداسازی شده از سیال چند فازی برداشتی از مخزن وجود دارد. از آنجاکه در هر دو موقعیت ساحل/ فراساحل امکان نصب سیستم‌های جداساز مولفه‌های جریان وجود دارد، در این کار پژوهشی بر آن شدیم که با طراحی مفهومی یک سیستم نمونه‌برداری کنار گذر به‌صورت برخط امکان اندازه‌گیری میزان شوری آب سازند را با استفاده از تکنیک گاما بررسی کنیم. همان‌گونه که در ارتباط با کارهای تحقیقاتی پیشین بیان شد سنجشگرهای گاما نقش مهمی را در صنعت نفت و پتروشیمی ایفا می‌کنند، که در این صنایع اندازه‌گیری دقیق و آنالیز پارامترهای مختلف برای کنترل فرآیند، تضمین کیفیت و ایمنی ضروری است. تکنیک‌های گاما به‌دلیل توانایی آنها در نفوذ به مواد و ارائه اطلاعات دقیق در مورد ترکیب آنها، به‌طور گسترده در زمین این مقاله طراحی مفهومی یک سیستم شوری سنج آب سازند را براساس تکنیک گامای عبوری از مخزن حاوی نمونه ارائه می‌کند که بر پیکربندی هندسه یکسوساز چشمه پرتوی با هدف بهبود دقت اندازه‌گیری و کاهش دز جذبی پرسنل تمرکز دارد. آنچه به‌عنوان وجه تمایز و نوآوری در این کار تحقیقاتی مورد نظر است ایجاد تغییرات در شکل‌دهی به باریکه خروجی از یکسوساز است به‌گونه‌ای که در هندسه‌ای مخروطی و متفاوت از هر دو حالت باریکه قلمی و یا پهن در کارهای دیگران بتواند دقت بیشینه‌ای را در اندازه‌گیری شوری به‌دست آورد و ضمناً از معایب مربوط به استفاده از



شکل ۱ نمودار جریان روش تحقیق

تئوری

پس پراکنشی است که مد عبوری در شرایطی که دسترسی به دو طرف مخزن وجود داشته باشد مورد توجه قرار می گیرد. ساختار حاکم بر این چینش به صورت قرارگیری چشمه رادیواکتیو و آشکارساز پرتوی به صورت متقابل و در دو سمت مخزن است. مطابق با قانون تضعیف نمایی لامبرت-بیرز شدت خوانش آشکارساز در دو وضعیت متفاوت پرتو شدگی مخزن به قرار زیر است [۱۲]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

که I_0 و I به ترتیب شدت خوانش به ازای شرایط پرتو شدگی مخزن توسط هوا و ماده چگال می باشد و μ ضریب تضعیف خطی ماده جاذب و x طولی است که پرتوی یونساز در ماده می پیماید تا به آشکارساز برسد. آنچه در ادامه مورد توجه است دستیابی به مقادیر شمارشی قابل قبول به منظور تفکیک دو ماده فوق می باشد. بدیهی است که به کارگیری مواد سوسوزن با محتوای عنصری و چگالی بالا می تواند منجر به ثبت بیشینه تابش ورودی به

در طراحی مفهومی اندازه گیری شوری آب سازند با استفاده از تکنیک گاما، هندسه و ابعاد گشودگی دهانه یکسوساز، عمق و محل قرارگیری چشمه برداری از تابش گسیلی چشمه به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر دقت تفکیک مقادیر مختلف کسر شوری آب مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. یکسوساز به عنوان یک حفاظ چشمه رادیواکتیو عمل می کند که جهت و شدت تابش گامای گسیل شده از چشمه را کنترل می کند. دهانه یکسوساز به روزه های اطلاق می شود که تابش گاما از آن عبور می کند و با نمونه مورد بررسی اندرکنش می نماید و در سیستم های گامای عبوری، این شار تضعیف شده توسط آشکارساز شمارش می شود و در نهایت به پارامترهای فیزیکی سیال مرتبط می گردد. روند کلی حاکم بر سیستم های سنجش گر مبتنی بر گاما به دو صورت خوانش شدت پرتوی عبوری و

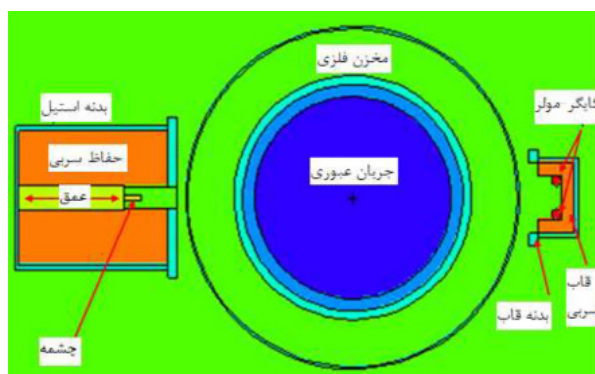
چشمه‌های پرتوزا و آشکارسازهای مختلف را بدون خطر پرتوگیری با استفاده از شبیه‌سازی به‌دست آورند. جهت بهره‌گیری از مدل‌سازی و شبیه‌سازی در صنعت هسته‌ای کدهای مونت کارلو به‌طور گسترده برای کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند. MCNP که مخفف Monte Carlo N-Particle است، یک کد مونت کارلو پرکاربرد در صنعت هسته‌ای است. این یک ابزار شبیه‌سازی قدرتمند و همه‌کاره است که امکان مدل‌سازی دقیق فرآیندهای پیچیده ترابرد پرتوی را فراهم می‌کند. MCNP می‌تواند رفتار ذرات مانند نوترون، فوتون و الکترون را به‌دقت شبیه‌سازی کند، زیرا آنها با ماده برهم‌کنش دارند. این فرآیندهای فیزیکی مختلف، از جمله پراکندگی، جذب، و واکنش‌های هسته‌ای را در نظر می‌گیرد و اطلاعات دقیقی در مورد اندرکنش ذرات و سپارش انرژی ارائه می‌دهد. یکی از نقاط قوت کلیدی MCNP توانایی آن در مدل‌سازی طیف گسترده‌ای از سیستم‌ها و سناریوهای هسته‌ای است. این می‌تواند ترابرد پرتوها را در محیط‌های مختلف مانند راکتورهای هسته‌ای، شتاب دهنده‌های ذرات، پرتو پزشکی و حتی کاربردهای فضایی شبیه‌سازی کند. این امر MCNP را به ابزاری ارزشمند برای محققان، مهندسان و دانشمندانی تبدیل می‌کند که در زمینه‌های مختلف علوم و فن‌آوری هسته‌ای کار می‌کنند [۱۶].

در این مطالعه بخش مدل‌سازی از سه واحد اصلی، چشمه پرتوزا در داخل یکسوساز، ماده فرآیند و واحد آشکارسازی تشکیل شده است که طرح نهایی با کد مونت کارلو MCNP شبیه‌سازی شد. طرح نشان داده شده در شکل ۲ از هندسه سیستم که در محیط مونت کارلو شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد. در ارتباط با واحد چشمه آنچه می‌تواند بر روی دقت اندازه‌گیری و قدرت تفکیک مقادیر مختلف کسر فازی سیال عبوری از لوله جریان موثر باشد در میزان فعالیت پرتوایی چشمه، نوع و انرژی گسیلی پرتوهای گاما و جنس و هندسه یکسوساز مورد استفاده خلاصه می‌شود.

آشکارساز گردد اما در شرایط خاص حاکم بر میادین عملیاتی که با میزان ارتعاش و گرادیان دمایی زیاد مواجه خواهیم شد به‌طور عملی به‌کارگیری این نوع آشکارساز را با محدودیت مواجه خواهد نمود و گزینه مطلوب در این بین به‌کارگیری آشکارسازهای گازی نظیر تیوب‌های گایگر-مولر خواهد بود [۱۳]. محدودیت آشکارساز مذکور بازدهی نسبتاً پایین آن است که با افزایش حجم تیوب از یکسو و از سوی دیگر با افزایش شار گسیلی از چشمه به‌سمت آشکارساز تا حد زیادی قابل رفع است.

مدل‌سازی

مدل‌سازی و شبیه‌سازی ابزاری حیاتی در مهندسی است که در حوزه‌های مختلف صنعتی اهمیت زیادی دارد. با استفاده از مدل‌سازی می‌توان یک مدل دیجیتال یا نمایش یک سیستم یا فرآیند برای آنالیز و پیش‌بینی رفتار یا عملکرد آن بدون نیاز به ساختن یا آزمایش فیزیکی با آن را ایجاد نمود. از طریق مدل‌سازی و در ادامه شبیه‌سازی، مهندسان می‌توانند طراحی سیستم 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 سیستم‌های پیچیده است. مهندسان اغلب با سیستم‌های پیچیده‌ای سر و کار دارند که متغیرهای متعددی را شامل می‌شود [۱۴]. شبیه‌سازی به آنها اجازه می‌دهد تا مشاهده کنند که چگونه تغییرات در یک پارامتر بر عملکرد و نتیجه نهایی سیستم تأثیر می‌گذارد. این به مهندسان در ارزیابی گزینه‌های مختلف طراحی و انتخاب بهتر طراحی کمک می‌کند. علاوه‌بر بهینه‌سازی طراحی، شبیه‌سازی به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند [۱۵]. در صنعت هسته‌ای به‌سبب بهره‌گیری از چشمه‌های رادیواکتیو و مولدهای پرتوهای یونساز شبیه‌سازی اهمیت‌ی دو چندان می‌یابد. محققان می‌توانند تجربیات ارزشمندی را در کار با مواد و ابزارهای هسته‌ای مختلف از قبیل



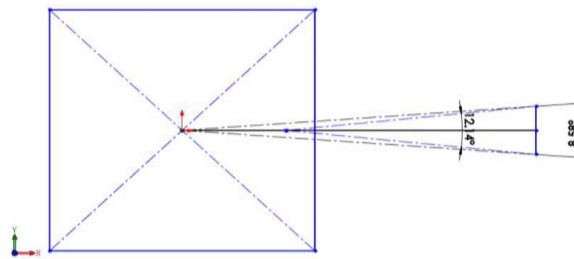
شکل ۲ شماتیکی از طرح هندسه در محیط مونت کارلو

حالت ممکن سطح فعال درگیر از چشمه شامل بخش جلویی، میانی و انتهایی آن ثبت گردید. پس از انجام شبیه‌سازی پارامتر مهمی که می‌تواند ابعاد و هندسه بخش قبل را تایید کند محدودیت‌های مرتبط با اعمال اصول حفاظت در برابر با اشعه است. آنچه به استانداردهای موجود در این حوزه ضروری است لزوم کاهش میزان دز معادل در ۵ cm اطراف یکسوساز چشمه تا مقدار 500 uSv/h برای پرتوکاران می‌باشد [۱۷].

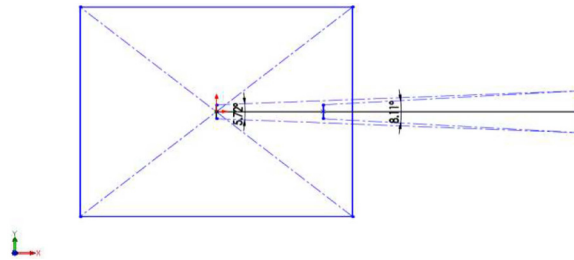
اعتبارسنجی

در ارتباط با اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با نتایج داده‌گیری تجربی، به دلیل عدم وجود انعطاف زیاد در ساخت و بهره‌گیری از کلیه طراحی‌های ممکن در یکسوسازهای موجود در آزمایشگاه، با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی مربوط به حالت قرارگیری افقی چشمه درون یکسوساز و در عمق ۷ cm و با گشودگی دهانه مستطیلی با داده‌های تجربی مربوط به یکسوساز مشابه موجود در آزمایشگاه، روند تغییرات شمارش برحسب چگالی محلول آب-نمک یدید سدیم به‌عنوان معیار اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. چشمه کبالت-۶۰ مورد استفاده نیز از اکتیویته 5 mCi برخوردار است. نمایی از ساختار تجربی موجود در آزمایشگاه در شکل ۵ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است تأمین چشمه رادیواکتیو از اهمیت خاصی برخوردار است که با توجه به امکان تولید اکتیویته‌های مورد نیاز از چشمه کبالت-۶۰ در داخل کشور بر آن شدیم تا تمرکز در این کار تحقیقاتی برروی بهینه‌سازی هندسه یکسوساز و حفاظ آشکارساز انجام گیرد. بدین منظور پارامترهای اساسی هندسی عمق استقرار چشمه، وضعیت قرارگیری عمودی/افقی چشمه درون یکسوساز هندسه گشودگی روزنه یکسوساز مخروطی/استوانه‌ای و سطح فعال درگیر از چشمه در اندازه‌گیری و گسیل پرتو به سمت آشکارساز در سه حالت بخش جلویی، میانی و انتهایی طی فرآیند شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳ قرارگیری چشمه در وضعیت افقی درون کولیماتور و در شکل ۴ این قرارگیری در وضعیت عمودی به تصویر کشیده شده است. سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی مخلوط آب و نمک NaCl است که چگالی این محلول در محدوده ۱ تا 1.06 g/cm^3 است. مقادیر مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ cm برای عمق قرارگیری چشمه درون یکسوساز لحاظ شد. چشمه به طول $4/1$ و قطر $1/2 \text{ cm}$ به شکل استوانه در دو حالت قرارگیری عمودی و افقی درون یکسوساز تنظیم گردید و به‌ازای هر کدام از این شرایط در دو وضعیت گشودگی دهانه یکسوساز مخروطی و استوانه‌ای تغییرات نرخ شمارش توسط دو آشکارساز استوانه‌ای شکل گایگر مولر با طول ۲۷ و قطر $2/28 \text{ cm}$ در سه



شکل ۳ قرارگیری افقی چشمه استوانه‌ای شکل



شکل ۴ قرارگیری عمودی چشمه استوانه‌ای شکل



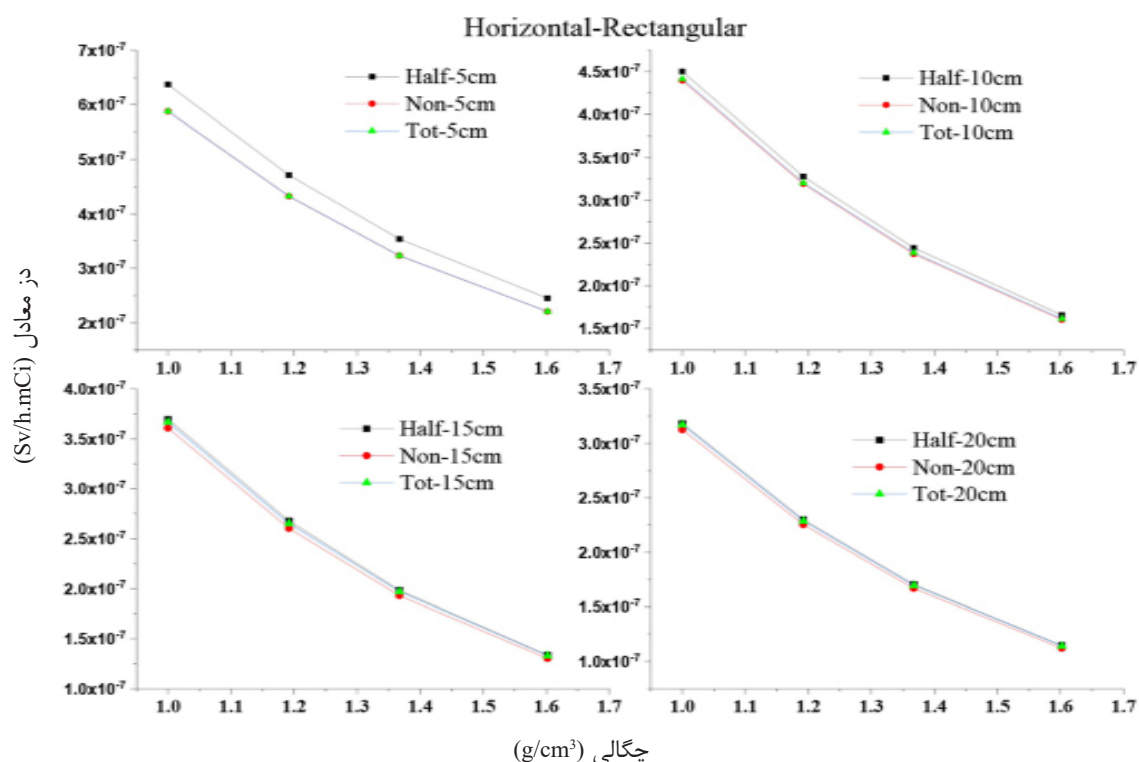
شکل ۵ نمایی از سیستم داده‌گیری تجربی، اندازه‌گیری چگالی محلول آب-نمک یدید سدیم موجود در آزمایشگاه

نتایج

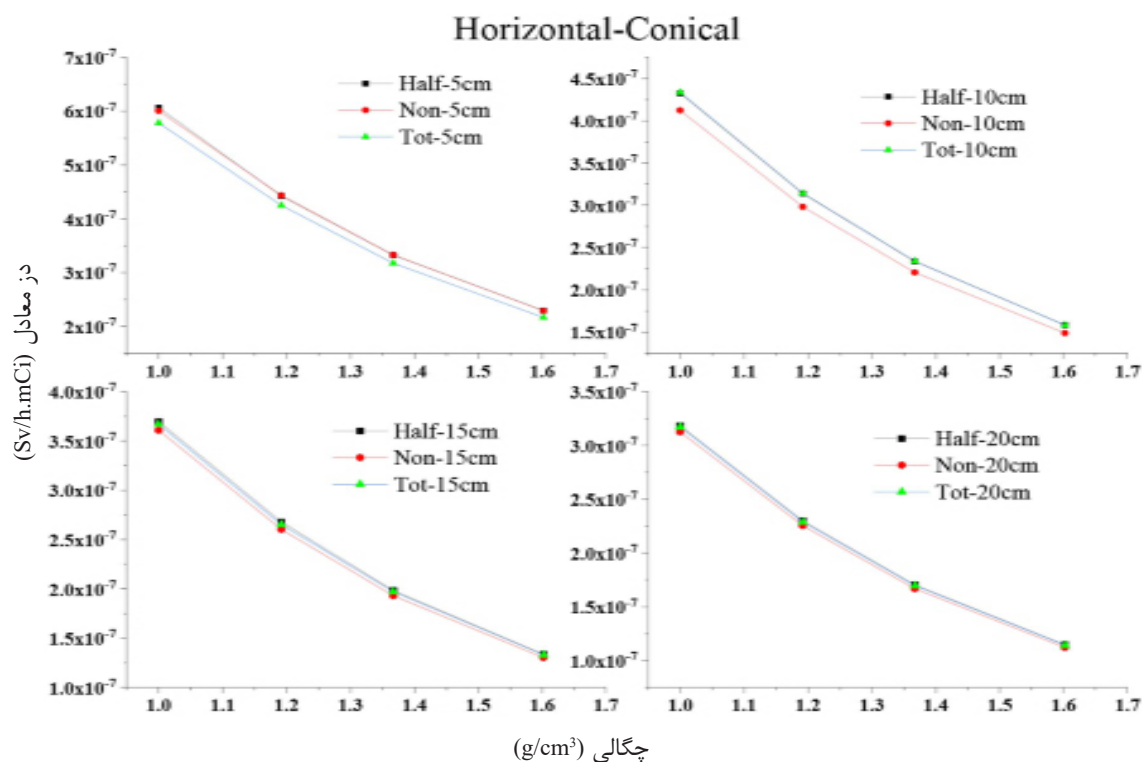
نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو

گردید. در ادامه و به‌منظور مقایسه بهتر بین انواع مختلف پارامترهای مورد شبیه‌سازی و تاثیر آنها در حصول بیشینه دقت تفکیک سیال درون لوله، نمودار تغییرات دز معادل برحسب چگالی سیال عبوری در وضعیت‌های ۴ گانه قرارگیری چشمه و گشودگی یکسوساز به‌صورت افقی-مستطیلی **شکل ۶**، افقی-مخروطی **شکل ۷**، عمودی-مستطیلی **شکل ۸**، و عمودی-مخروطی **شکل ۹** در سه وضعیت شمارش تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و به‌ازای عمق‌های قرارگیری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ cm رسم شد. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو در **شکل ۱۰**، **شکل ۱۱**، **شکل ۱۲** و **شکل ۱۳** به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره رسم گردید.

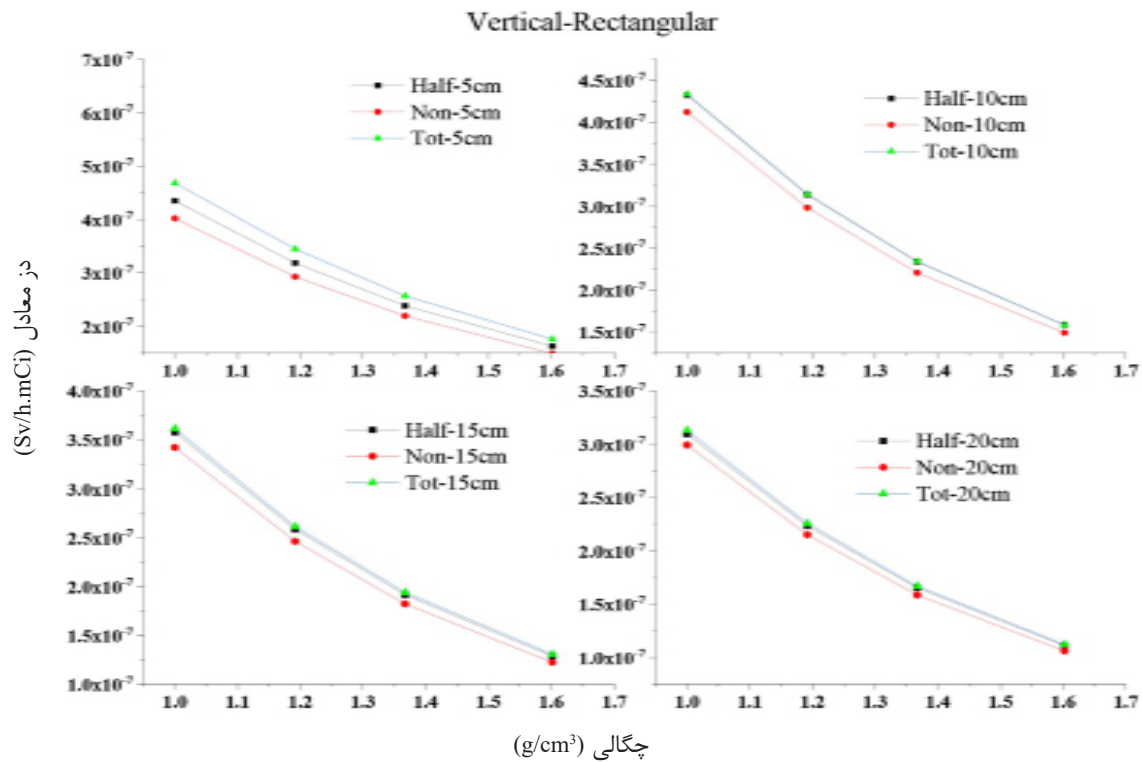
نمودار تغییرات دز معادل برحسب چگالی سیال عبوری برای چشمه کبالت-۶۰ در وضعیت‌های ۴ گانه قرارگیری چشمه و گشودگی یکسوساز به‌صورت افقی-مستطیلی **شکل ۶**، افقی-مخروطی **شکل ۷**، عمودی-مستطیلی **شکل ۸**، و عمودی-مخروطی **شکل ۹** در سه وضعیت شمارش تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و به‌ازای عمق‌های قرارگیری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ cm رسم شد. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو در **شکل ۱۰**، **شکل ۱۱**، **شکل ۱۲** و **شکل ۱۳** به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره رسم گردید.



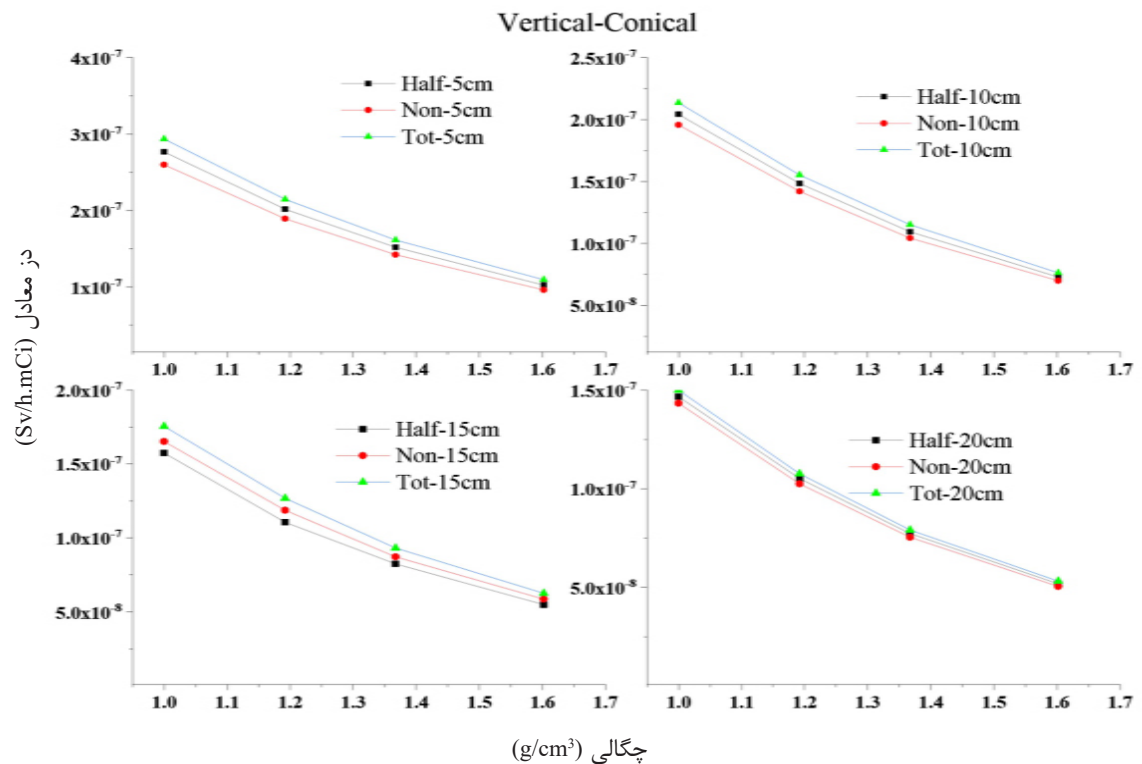
شکل ۶ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب به‌ازای پارامترهای هندسی عمق، و سطح مؤثر چشمه در تابش دهی به آشکارساز مقابل، در وضعیت تعبیه افقی و نوع گشودگی مستطیلی دهانه یکسوساز برای چشمه کبالت-۶۰



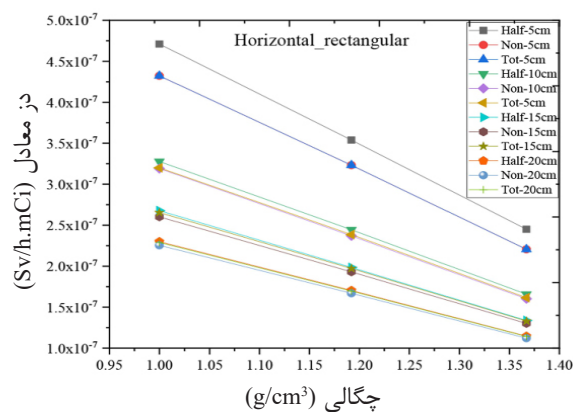
شکل ۷ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب به‌ازای پارامترهای هندسی عمق، و سطح مؤثر چشمه در تابش دهی به آشکارساز مقابل، در وضعیت تعبیه افقی و نوع گشودگی مخروطی دهانه یکسوساز برای چشمه کبالت-۶۰



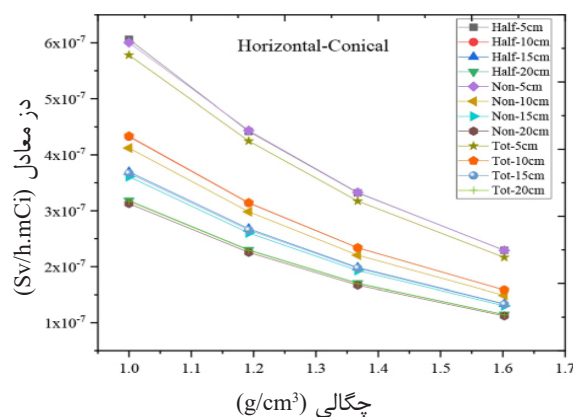
شکل ۸ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب به‌ازای پارامترهای هندسی عمق، و سطح موثر چشمه در تابش دهی به آشکارساز مقابل، در وضعیت تعبیه عمودی و نوع گشودگی مستطیلی دهانه یکسوساز برای چشمه کبالت-۶۰



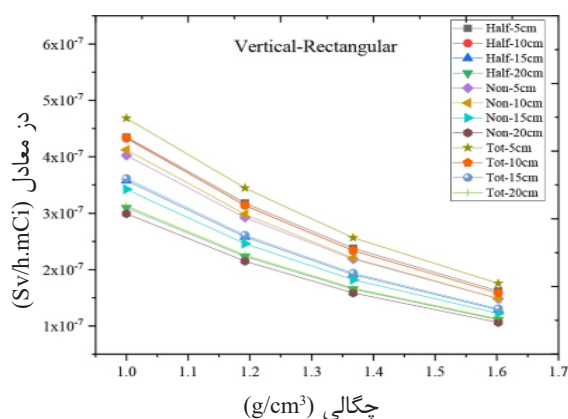
شکل ۹ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب به‌ازای پارامترهای هندسی عمق، و سطح موثر چشمه در تابش دهی به آشکارساز مقابل، در وضعیت تعبیه عمودی و نوع گشودگی مخروطی دهانه یکسوساز برای چشمه کبالت-۶۰



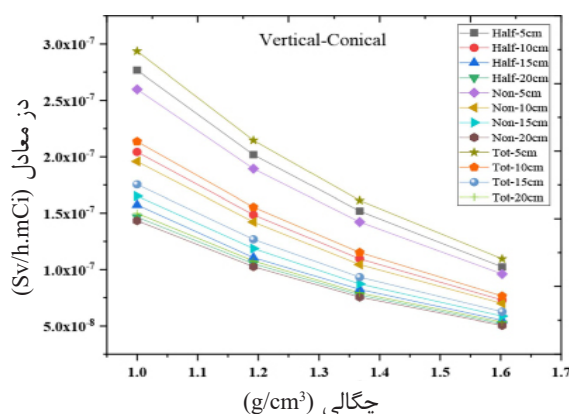
شکل ۱۰ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب در وضعیت قرارگیری چشمه افقی و گشودگی یکسوساز مستطیلی، به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره برای چشمه کبالت-۶۰



شکل ۱۱ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب در وضعیت قرارگیری چشمه افقی و گشودگی یکسوساز مخروطی، به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره برای چشمه کبالت-۶۰

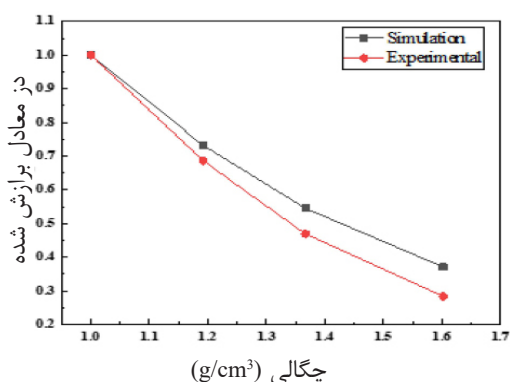


شکل ۱۲ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب در وضعیت قرارگیری چشمه عمودی و گشودگی یکسوساز مستطیلی، به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره برای چشمه کبالت-۶۰



شکل ۱۳ تغییرات دز معادل برحسب چگالی دوغاب در وضعیت قرارگیری چشمه عمودی و گشودگی یکسوساز مخروطی، به‌ازای تمام وضعیت‌های شمارشی تابش‌های گسیلی از بخش جلویی، نیم و کل چشمه و همچنین در تمام عمق‌های مورد اشاره برای چشمه کبالت-۶۰

با ابعاد و هندسه یکسوساز و اکتیویته چشمه در دسترس در آزمایشگاه، روند کلی تغییرات شمارش نرمالیزه‌شده برحسب چگالی برای دو وضعیت مشابه تجربی و شبیه‌سازی مورد استناد قرار گرفت. همان‌گونه که پیش از این بیان شد این مقایسه برای حالت قرارگیری افقی چشمه کبالت-۶۰ درون یکسوساز و در عمق ۷ cm و با گشودگی دهانه مستطیلی و نیز شمارش تابش‌های گسیلی از بخش جلویی صورت پذیرفت. نمودار تغییرات شمارش بر حسب چگالی در شکل ۱۵ آورده شده است.

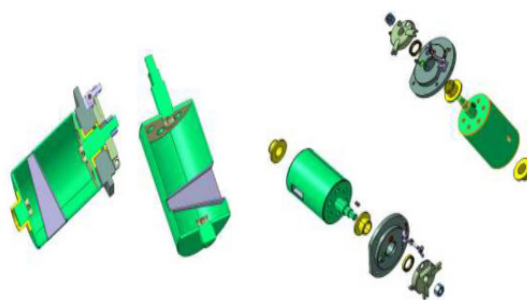


شکل ۱۵ تغییرات شمارش نرمالیزه‌شده برحسب چگالی آب-نمک یدید سدیم در وضعیت قرارگیری چشمه افقی و گشودگی یکسوساز مستطیلی و شمارش پرتوهای گسیلی از بخش جلویی چشمه کبالت-۶۰ واقع در عمق ۷ cm: الف) حاصل از داده‌گیری تجربی، و ب) حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو

مقایسه نمودار تغییرات دز معادل برحسب چگالی به‌ازای وضعیت‌های مختلف قرارگیری چشمه و نیز گشودگی دهانه کولیماتور گویای این مهم است که وضعیت افقی چشمه و گشودگی مخروطی به بیشینه دقت در اندازه‌گیری منجر خواهد شد که در ادامه نمای درون و بیرون این کولیماتور در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

نتایج اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و با توجه به محدودیت‌های ذکرشده در ارتباط



شکل ۱۴ نمای درونی و طرحواره انفجاری یکسوساز چشمه با گشودگی مخروطی

نتیجه گیری

در ارتباط با اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه سازی مونت کارلو با نتایج داده گیری تجربی، به دلیل عدم وجود انعطاف زیاد در ساخت و بهره گیری از کلیه طراحی های ممکن در یکسوسازهای موجود در آزمایشگاه، با استفاده از مقایسه نتایج شبیه سازی مربوط به حالت قرارگیری افقی چشمه درون یکسوساز و در عمق ۷ cm و با گشودگی دهانه مستطیلی با داده های تجربی مربوط به یکسوساز مشابه موجود در آزمایشگاه، روند تغییرات شمارش برحسب چگالی محلول آب-نمک دیدید سدید به عنوان معیار اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. روند کلی تغییرات شمارش نرمالیزه شده برحسب چگالی برای دو وضعیت مشابه تجربی و شبیه سازی مبنای مقایسه داده ها با هدف تایید صحت شبیه سازی در این وضعیت است. علی الاصول چنانچه داده گیری تجربی برای تمام شرایط هندسی و ابعادی مورد بررسی در شبیه سازی مقدور بود که دیگر انجام شبیه سازی مونت کارلو توجیهی نداشت. بنابراین در یک وضعیت خاص تلاش شد تا فرآیند داده گیری تجربی انجام شود و نتایج با داده های شبیه سازی مقایسه گردد. نتایج از هم خوانی قابل قبولی را در روند تغییرات نرخ شمارش نرمالیزه شده بین داده های تجربی و شبیه سازی نشان می دهد که به عنوان معیاری برای صحت شبیه سازی در این حالت خاص (قرارگیری افقی چشمه کبالت-۶۰ درون یکسوساز و در عمق ۷ cm و با گشودگی دهانه مستطیلی و شمارش گاماها ی گسیلی از صرفاً بخش جلویی چشمه) مبنای تایید عملکرد شبیه سازی قرار می گیرد. در ادامه با اعتماد به شبیه سازی از نتایج آن برای فهم تغییرات در سایر شرایط هندسی و ابعادی جهت نیل به ساختار بهینه یکسوساز استفاده شد.

در تعیین بیشترین توان تفکیک بین چگالی های مختلف دوغاب عبوری از لوله آنچه حائز اهمیت است گرادیان تغییرات دز برحسب چگالی است. از

طرف دیگر در کنار توان تفکیک به عنوان شاخصی مهم در بهینه سازی طراحی هندسی یکسوساز، حساسیت شمارشی آشکارسازها برای ارائه داده هایی با کمینه خطای ناشی از آمار شمارش امری مهم است که به ازای شمارش ها و یا دزهای بالاتر این حساسیت بالاتر و البته مناسب تر خواهد بود. آنچه از نمودارهای فوق قابل استنباط است آنست که به ازای وضعیت قرارگیری چشمه به صورت افقی درون یکسوساز همواره در هر دو گشودگی دهانه مستطیلی/مخروطی با بیشینه توانمان دز شمارشی و گرادیان شمارشی به ترتیب برای تابش های ناشی از نیم، جلو و تمام چشمه مواجهیم که البته هرچه مقدار عمق کوچکتر باشد حساسیت و توان تفکیک بهبود می یابد. نکته حائز اهمیت دیگر آنست که در تمام وضعیت های یادشده با تعبیه گشودگی دهانه یکسوساز به صورت غیرمرسوم مخروطی از حساسیت و توان تفکیک بالاتری نسبت به وضعیت مستطیلی بهره مند خواهیم شد. همچنین در وضعیت گشودگی مخروطی بخش عقبی چشمه توسط ضخامت بیشتری از سرب پیرامون آن احاطه می شود که به معنای حفاظت پرتوی بهتر است و اجازه عملیاتی شدن طراحی یکسوساز با عمق های کمتر تعبیه چشمه را در قیاس با گشودگی مستطیلی خواهد داد اگرچه فرآیند ساخت دشوارتری را خواهد داشت.

اما در ارتباط با وضعیت قرارگیری چشمه به صورت عمودی درون یکسوساز همواره در هر دو گشودگی دهانه مستطیلی/مخروطی با بیشینه توانمان دز شمارشی و گرادیان شمارشی به ترتیب برای تابش های ناشی از تمام چشمه، نیم، و جلو مواجهیم که البته هرچه مقدار عمق کوچکتر باشد حساسیت و توان تفکیک بهبود می یابد. نکته حائز اهمیت دیگر آنست که در تمام وضعیت های یادشده و برخلاف قرارگیری افقی چشمه، با تعبیه گشودگی دهانه یکسوساز به صورت مرسوم مستطیلی از حساسیت و توان تفکیک بالاتری نسبت به وضعیت مخروطی بهره مند خواهیم شد.

لازم به ذکر است که در این حالت که با قرارگیری عمودی چشمه روبرو هستیم همچنان در وضعیت گشودگی مخروطی بخش عقبی چشمه توسط ضخامت بیشتری از سرب پیرامون آن احاطه خواهد شد که به معنای حفاظت پرتوی بهتر است.

بنابراین دو وضعیت چشمه افقی-گشودگی مخروطی و چشمه عمودی-گشودگی مستطیلی دارای حساسیت و توان تفکیک بالاتری هستند که برای رسیدن به نتیجه‌ای واحد که قابلیت ساخت داشته باشد ضروری است در ادامه نتایج این دو وضعیت را با هم مقایسه کنیم. با مقایسه نتایج حاصل از دو وضعیت فوق به این نتیجه می‌رسیم که در هر دو پارامتر حساسیت و توان تفکیک در شرایطی که از وضعیت هندسی چشمه افقی-گشودگی مخروطی استفاده شود با مقادیر بالاتر و به عبارتی مناسب‌تر روبرو می‌شویم که هندسه مورد نظر را به عنوان هندسه بهینه از بین ۴ وضعیت ممکن نشان می‌دهد.

از آنجا که براساس نمودارهای بالا همواره با کاهش عمق قرارگیری چشمه درون یکسوساز مقدار حساسیت و توان تفکیک روندی بهتر را دارد پس کفایت کمینه عمق قابل استفاده برای چشمه کبالت-۶۰ با اکتیویته مورد نظر را مشروط به برآورده ساختن شرایط حفاظت پرتوی محاسبه کرده و در ادامه با قراردادی چشمه به صورت افقی درون یکسوساز و با گشودگی مخروطی دهانه برای شکل‌دهی به باریکه گسیلی فرآیند طراحی جامداتی را انجام دهیم.

آشکارسازهای دوگانه مورد استفاده در این کار پژوهشی از نوع گایگر-مولر هستند که با توجه به دامنه شمارشی معقول از مرتبه بزرگی ۱۰۰۰ و با بهره‌گیری از نمودارهای کالیبراسیونی دز برحسب شمارش، مقدار آهنگ دز $6/5 \text{ uSv/h}$ به عنوان دز قابل اندازه‌گیری را مورد نظر قرار می‌دهیم. با توجه به نمودار تغییرات آهنگ دز برحسب واحد اکتیویته به ازای چگالی در وضعیت هندسی بهینه چشمه افقی-گشودگی مخروطی، کمینه آهنگ دز

برحسب واحد اکتیویته در بازه $0/25 \text{ uSv/h.mCi}$ - $0/125$ در نوسان است که برای رسیدن به آهنگ دز $6/5 \text{ uSv/h}$ به اکتیویته‌ای در محدوده ۲۶-۵۲ برای رسیدن به این مقدار آهنگ دز کمینه نیاز است. برای بررسی عامل محدودساز شدت دز جذبی پرسنل اطراف یکسوساز براساس استاندارد ملی پایه حفاظت در برابر اشعه و نیز دستورالعمل دریافت پروانه سیستم‌های سنجش گر هسته‌ای ضروری است به فاصله 5 cm یکسوساز در هیچ جایی مقدار آهنگ دز از 500 uSv/h تجاوز نکند. در واقع این استاندارد و دستورالعمل به منظور رعایت مسائل ایمنی پرتوی و HSE توسط نهاد تنظیم‌کننده مقررات پرتوی در کشور و نیز سطح بین‌الملل وضع و کلیه سیستم‌های پرتوی ملزم به رعایت این ملاحظات در طراحی خود می‌باشند. با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی آنلاین موجود در سایت اینترنتی www.radprocalculator.com به ازای عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و 20 cm مورد اشاره در شبیه‌سازی، آهنگ دز را پس از دیواره سربی با ضخامت‌های برابر با عمق مورد نظر در دو حالت حدی اکتیویته ۲۶ و 52 mCi محاسبه کردیم که نتایج در **جدول ۱** زیر نشان داده شده است. از آنجا که عمق‌های کوچک‌تر از نظر حساسیت و دقت تفکیک مناسب تر هستند بایستی کوچک‌ترین عمق ممکن که از نظر داده موجود در جدول فوق منجر به بیشینه آهنگ دز پایین‌تر از حد 500 uSv/h می‌شود را انتخاب کنیم. با توجه به نتایج جدول فوق این عمق بین ۵ تا 10 cm باید باشد که با بهره‌گیری از سایت فوق در روندی معکوس و به منظور رسیدن به حد دز بیشینه 500 uSv/h ، عمق بهینه برای اکتیویته‌های ۲۶ و 52 mCi به ترتیب برابر با ۷ و 8 cm محاسبه گردید.

باتوجه به این که عمق کوچک‌تر از حیث دقت تفکیک و حساسیت مناسب‌تر است و در عین حال به ازای اکتیویته پایین‌تری (و بالتبع هزینه پایین‌تر) به آهنگ شمارش مناسب منجر می‌شود.

جدول ۱ آهنگ دز در فاصله ۵ cm از حفاظ کروی فرضی حول چشمه کبالت-۶۰ در بازه تغییرات اکتیویته ۲۹ تا ۵۲ میلی کوری

		آهنگ دز در فواصل مختلف از حفاظ کروی فرضی حول چشمه (uSv/h)			
		۵ cm	۱۰ cm	۱۵ cm	۲۰ cm
فعالیت پرتوزایی	۲۶ mCi	۲۱۳۷/۷۹	۵۴/۲۶	۱/۵۱	۰/۰۵
	۵۲ mCi	۴۲۷۵/۵۸	۱۰۸/۵۳	۳/۰۱	۰/۰۹

قبول برای پرتوکاران قرار دارد که چنانچه قرار باشد با تعبیه سرب اضافی برای عموم ایمن باشد باتوجه به حد دز سالانه عموم که ۰/۰۵ پرتوکاران و برابر با ۱ mSv است با ایجاد حداکثر ۵ cm ضخامت سرب علاوه بر حفاظت در برابر ضربه و حرارت و نور مستقیم خورشید برای آشکارسازها شرایط ایمن پرتوی را در پشت این حفاظ تضمین کند.

بنابراین عمق ۷ cm و اکتیویته ۲۶ mCi به عنوان گزینه‌های بهینه برای قرارگیری چشمه کبالت-۶۰ به صورت افقی درون یکسوساز و با گشودگی دهانه مخروطی برای بخش طراحی جامداتی لحاظ گردید. در طراحی این بخش به این صورت عمل شد که با توجه به نتایج مربوط به بخش طراحی یکسوساز چشمه، مقدار آهنگ دز در محل آشکارسازها از مرتبه بزرگی ۶/۵ uSv/h شد که در محدوده قابل

مراجع

- [1]. Holstad, M. B., & Johansen, G. A. (2005). Produced water characterization by dual modality gamma-ray measurements, *Measurement Science and Technology*, 16(4), 1007, doi: 10.1088/0957-0233/16/4/013.
- [2]. Miller, G. J., Alexander, C. J., & Thompson, D. J. (1999). A high-accuracy, calibration-free multiphase meter, In 17th North sea flow measurement workshop, Oslo, Institute of Petroleum on behalf of NIF, NFOGM and NEL.
- [3]. Thorn, R., Johansen, G. A., & Hammer, E. A. (1997). Recent developments in three-phase flow measurement, *Measurement Science and Technology*, 8(7), 691, doi: 10.1088/0957-0233/8/7/001.
- [4]. Meric, I., Johansen, G. A., Holstad, M. B., Wang, J., & Gardner, R. P. (2011). Produced water characterization by prompt gamma-ray neutron activation analysis, *Measurement Science and Technology*, 22(12), 125701, doi: 10.1088/0957-0233/22/12/125701.
- [5]. Barbosa, C. M., Kenup-Hernandes, H. O., Raitz, C., Dam, R. S. D. F., Salgado, W. L., Lima, I. C., & Salgado, C. M. (2021). 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, 109784, doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109784.
- [6]. Johansen, G. A., & Jackson, P. (2000). Salinity independent measurement of gas volume fraction in oil/gas/water pipe flows, *Applied Radiation and Isotopes*, 53(4-5), 595-601, doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00232-3.
- [7]. Holstad, M. B. (2004). Gamma-ray scatter methods applied to industrial measurement systems (No. NEI-NO--1551), Bergen Univ.(Norway), Dept. of Physics and Technology.
- [8]. Sætre, C., Johansen, G. A., & Tjugum, S. A. (2010). Salinity and flow regime independent multiphase flow measurements, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(4), 454-461, doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2010.06.002.
- [9]. Holstad, M. B., & Johansen, G. A. (2005). Produced water characterization by dual modality gamma-ray measurements, *Measurement Science and Technology*, 16(4), 1007, doi: 10.1088/0957-0233/16/4/013.
- [10]. Salgado, C. M., Brandão, L. E., Pereira, C. M., & Salgado, W. L. (2014). Salinity independent volume fraction prediction in annular and stratified (water-gas-oil) multiphase flows using artificial neural networks, *Progress in Nuclear Energy*, 76, 17-23, doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.05.004.
- [11]. Breton, D. J., Hamilton, G. S., & Hess, C. T. (2009). Design, optimization and calibration of an automated density gauge for firn and ice cores, *Journal of Glaciology*, 55(194), 1092-1100, doi.org/10.3189/002214309790794841.
- [12]. Swinehart, D. F. (1962). The beer-lambert law, *Journal of Chemical Education*, 39(7), 333, doi.org/10.1021/ed039p333.
- [13]. Bryan, F. R., & Nahstoll, G. A. (1948). An industrial application of geiger-müller counters to the analysis of phosphorus in steels, *JOSA*, 38(6), 510-517, doi.org/10.1364/JOSA.38.000510.
- [14]. Sinha, R., Paredis, C. J., Liang, V. C., & Khosla, P. K. (2001). Modeling and simulation methods for design of engineering systems, *Journal Comput. Inf. Sci. Eng.*, 1(1), 84-91.

- [15]. Rosova, A., Behun, M., Khouri, S., Cehlar, M., Ferencz, V., & Sofranko, M. (2022). Case study: the simulation modeling to improve the efficiency and performance of production process, *Wireless Networks*, 28(2), 863-872, doi.org/10.1007/s11276-020-02341-z.
- [16]. Waters, L. S. (2002). MCNPX user's manual. Los Alamos National Laboratory, 124.
- [17]. Upton, A. C. (1982). The biological effects of low-level ionizing radiation. *Scientific American*, 246(2), 41-49.