Document Type: Full length research Paper
Pages: 1-10

Design and Optimization of the Radioactive Source Arrangement for the Level Gauging of Petrochemical Urea Reactor

Seyedeh Zahra Islami Rad*, Sahar Eisvand Nazari

[1]Department of Physics, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran

Received: 05.06.2024 Final revised: 25.09.2024 Accepted: 21.07.2025

Doi: 10.22055/jrmbs.2025.20193

Abstract

Measuring the level and height of liquids in industrial reactors at high temperature and pressure in the oil, gas, and petrochemical industries has particular importance due to the complexity of the production process. The height of Urea in the vessel can be measured using the nuclear level gauging method, which is a non-destructive method. Therefore, the energy of the gamma emitting source, the design, and arrangement of the geometry of the source, including the point or rod, and the detector material including the use of sodium iodide crystal or plastic scintillator are important. In this research, firstly, a nuclear level gauge system—comprising a source, detector, and a reactor with urea and high-temperature, high-pressure gases—was simulated using the MCNPX Monte Carlo code. The simulation results were then validated against experimental data. The study then optimized the detector's response by testing different arrangements of the radioactive source and its distances, as well as various detector types and geometries, to find the best configuration. The analysis revealed that using three strategically placed point sources is a superior and more cost-effective alternative to a rod source. This setup offers high accuracy and stability at a significantly lower production cost.

Keywords: Design and optimization, Radioactive source, Level gauge, Urea Reactor, Gamma-ray, Simulation, MCNPX Monte Carlo code

*Corresponding Author: szislami@qom.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

طراحی و بهینه‌سازی چیدمان چشمهٔ رادیواکتیو برای ارتفاع‌سنجی راکتور اوره پتروشیمی

سیده زهرا اسلامی راد*، سحر عیسوند نظری

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶ ویرایش نهائی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

Doi :10.22055/jrmbs.2025.20193

چکیده

تعیین سطح و ارتفاع مایعات راکتورهای صنعتی در دما و فشار بالا در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به‌دلیل پیچیدگی فرایند تولید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با استفاده از روش ارتفاع‌سنجی هسته‌ای که یک روش غیرمخرب است، می‌توان ارتفاع اوره در مخازن را اندازه‌گیری نمود. بنابراین انرژی چشمهٔ گسیلندهٔ گاما، طراحی هندسهٔ چشمه شامل نقطه‌ای یا میله‌ای و جنس آشکارساز شامل استفاده از کریستال یدورسدیم یا سوسوزن پلاستیک حائز اهمیت است. در این تحقیق، ابتدا ارتفاع‌سنج هسته‌ای شامل چشمه، آشکارساز و مخزن شامل اوره و گازها به‌وسیلهٔ کد مونت‌کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد و نتایج با مقادیر تجربی مقایسه و اعتبار سنجی گردید. سپس پاسخ آشکارساز با توجه به طراحی‌های متفاوت چشمه و فواصل آن و همچنین نوع آشکارساز و هندسهٔ آن بهینه‌سازی گردید و چیدمان بهینه انتخاب شد. مقایسهٔ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل حاصل از آن نشان داد که استفاده از چشمه‌های نقطه‌ای با فواصل مشخص (سه نقطه) به‌جای چشمه‌های میله‌ای به‌دلایل داشتن ساختاری ساده، دقت و پایداری بالا و کاهش هزینهٔ تولید نسبت به هزینهٔ بالای چشمه‌های میله‌ای می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. همچنین جهت ارتفاع‌سنجی دقیق، آشکارسازهای میله‌ای باید جایگزین آشکارسازهای نقطه‌ای شود.

کلیدواژگان: طراحی و بهینه سازی، چشمهٔ رادیواکتیو، ارتفاع‌سنج، راکتور اوره، پرتو گاما، شبیه‌سازی، کد مونت کارلو MCNPX

مقدمه

منابع پرتو و چشمه‌های رادیواکتیو کاربرد گسترده‌ای در صنایع نفت، پتروشیمی، فولاد، خودروسازی، سیمان و صنایع غذایی دارند. از جمله کاربردهای چشمه‌های رادیواکتیو تعیین ارتفاع مواد درون مخزن است که به‌علت پیچیدگی فرایندهای تولیدی در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، فولاد و غیره اهمیت بالایی دارد. از منابع پرتو همچنین برای اندازه‌گیری در فرایندهای صنعتی مانند ضخامت‌سنج در صنایع کاغذ و فولاد استفاده می‌شود [۳-۱]. همچنین بهینه‌سازی و کنترل فرایندهای صنعتی، آنالیز ترکیبات و ساختار مواد، تشخیص عیوب در عملکرد سیستم با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب انجام می‌پذیرد. تعیین ارتفاع مواد موجود در یک مخزن، یکی از کاربردهای مهم استفاده از سطح‌سنج‌ها و چشمه‌های رادیواکتیو برای ارتفاع‌سنجی مواد در صنعت است. مواد شیمیایی و خطرناک که به‌صورت

*نویسندهٔ مسئول: szislami@qom.ac.ir

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ۴.۰ بین‌المللی می‌باشد

مایع یا گاز هستند و امکان اندازه‌گیری فیزیکی مستقیم سطح آنها وجود ندارد؛ را می‌توان به‌روش‌های مختلفی مانند فشار تفاضلی، فراصوت، رادار، لیزر، خازن، مغناطیس و روش هسته‌ای برای سنجش ارتفاع استفاده کرد [۱۲-۴]. مناسب‌ترین روش جهت ارتفاع‌سنجی در صنایع پتروشیمی، استفاده از روش هسته‌ای است. تجهیزات مورد استفاده برای آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش‌های هسته‌ای در اصطلاح سنجشگر هسته‌ای خوانده می‌شوند. هر سنجشگر هسته‌ای شامل یک چشمه پرتوزا و یک آشکارساز است. در سنجشگر پرتوگاما، یک چشمهٔ گاما که فعالیت و انرژی آن با توجه به‌ویژگی‌های مخزن یعنی ابعاد، ضخامت دیواره و مواد درون مخزن و غیره تعیین می‌شود، در یک مخزن یا داخل مخزن و یک آشکارساز پرتو گاما در طرف مقابل قرار می‌گیرد. چشمه و آشکارساز می‌توانند طراحی‌های مختلفی شامل نقطه‌ای و میله‌ای داشته باشند. پارامتر دیگر مؤثر بر روی اندازه‌گیری دقیق ارتفاع و افزایش کارایی، نوع و جنس آشکارساز است که با توجه به کاربرد می‌توان از سوسوزن‌های یدورسدیم و پلاستیک استفاده کرد. با توجه به‌نکات ذکر شده، طراحی و بهینه‌سازی چیدمان چشمهٔ پرتو گاما و آشکارساز، نوع چشمه و نوع آشکارساز می‌تواند نقش مؤثری در تعیین دقیق ارتفاع مواد در مخازن و افزایش کارایی آشکارساز داشته باشد. پژوهشگران، مطالعات مختلفی در این زمینه انجام دادند [۱۷-۱۳]. تاجیک و همکاران اثر موقعیت چشمهٔ گاما و آشکاساز سوسوزن (سنتیلاتور) را بر بازدهی یک سوسوزن پلاستیکی بزرگ به‌طور تجربی و نظری بررسی کردند. فاصلهٔ بین چشمه تا آشکارساز بر مقدار بازدهی تأثیر می‌گذارد به‌طوری که با تغییر فاصله بین آشکارساز و چشمه تعداد ذرات وارد شده به آشکارساز تغییر می‌کند. برای این منظور تابع پاسخ سوسوزن NE102 که در معرض چشمهٔ ^{137}Cs در موقعیت‌های مختلف نسبت به سوسوزن قرار گرفته بود، با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی و سپس به‌طور تجربی اندازه‌گیری گردید. سپس اثر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن بر روی بازدهی با محاسبهٔ زاویهٔ فضایی نسبی تشکیل شده از سوسوزن در محل چشمه به‌صورت تحلیلی بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی توافق خوبی داشت. شمارش‌های به‌دست آمده از نتایج تجربی و شمارش‌های حاصل از شبیه سازی با MCNPX خطای نسبی ۲ تا ۸ درصد را نشان می‌دهد [۱۳]. طابت و همکاران، بازده هندسی به‌زاویه تحت تأثیر منابع رادیواکتیو و سطوح آشکارساز را مورد بررسی قرار دادند. آنها رویکرد ریاضی جدیدی برای محاسبهٔ زاویه و بازده هندسی با استفاده از چشمه‌های نقطه‌ای در ارتباط با آشکارساز ارائه دادند [۱۴]. همچنین در پژوهشی دیگر از چشمهٔ میله‌ای برای کالیبراسیون و تعیین ارتفاع دقیق در مخزن استفاده شد. در این مطالعه از چشمهٔ میله‌ای ^{60}Co گسیلندهٔ گاما با ارتفاع۱٫۵m و اکتیویتهٔ ۱۷۰mCi در داخل مخزن استفاده کردند. همچنین آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک با طول ۵۰cm در خارج از مخزن مقابل چشمه قرار داشت. آنها با این چیدمان روش جدیدی برای کالیبراسیون ارائه دادند [۱۵]. در این مقاله، به‌منظور ارتفاع‌سنجی دقیق در راکتور اوره پتروشیمی و افزایش کارایی پاسخ آشکارساز، راکتور پتروشیمی حاوی اوره و گازها در دما و فشار بالا، هندسهٔ چشمهٔ پرتو گاما، اکتیویته و نوع آن (نقطه‌ای یا میله‌ای)، همچنین هندسه، نوع و جنس آشکارساز با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX شبیه‌سازی شد. نتایج با مقادیر تجربی تحلیل، مقایسه و اعتبارسنجی گردید. سپس پاسخ آشکارساز با توجه به طراحی‌های متفاوت چشمهٔ رادیواکتیو و فواصل آن و همچنین نوع

آشکارساز و هندسهٔ آن بررسی و بهینه‌سازی گردید و چیدمان مناسب انتخاب شد.

تکنیک تابش برای اندازه‌گیری ارتفاع

برای تعیین ارتفاع از روش هسته‌ای آشکارسازی پرتوهای گامای عبوری استفاده شد. کاهش شدت به‌وسیلهٔ قانون بیر مشخص می‌شود که آن را تابعی از انرژی پرتو گاما، طول مسیر و ضریب تضعیف خطی مواد توصیف می‌کند که به‌صورت زیر بیان شد:

$$I = I_0 e^{-[w_1\mu_1\rho_1 + w_2\mu_2\rho_2]x} \qquad ۱$$

که در آن I شدت پرتوی گامای تضعیفی دریافت شده توسط آشکارساز، I_0 شدت پرتوی گامای خروجی از چشمه، w درصد وزنی ماده در مخزن پتروشیمی، μ ضریب تضعیف جرمی هر یک از مواد موجود در راکتور $(\frac{cm^2}{g})$، ρ چگالی ماده با یکای $(\frac{g}{cm^3})$ و x ارتفاع سیال و گاز (در فواصل بین چشمه و آشکارساز) است. بنابراین سطح سیال در هر ارتفاع مشخص می‌گردد [۱۸-۱۶].

طراحی ارتفاع‌سنج شامل چشمه، آشکارساز و مخزن پتروشیمی

به‌منظور بررسی و بهینه‌سازی طراحی‌های متفاوت چشمهٔ رادیواکتیو و آشکارساز برای ارتفاع‌سنجی دقیق، ابتدا ارتفاع‌سنج هسته‌ای شامل چشمه، آشکارساز و مخزن شامل اوره و گازها در دما و فشار بالا به‌وسیلهٔ کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد و نتایج با مقادیر تجربی تحلیل، مقایسه و اعتبارسنجی گردید. سپس به‌منظور بهینه‌سازی چیدمان چشمه و آشکارساز برای اکتساب مناسب‌ترین داده‌ها جهت ارتفاع‌سنجی، شبیه‌سازی در طراحی‌های متفاوت انجام شد.

روش تجربی

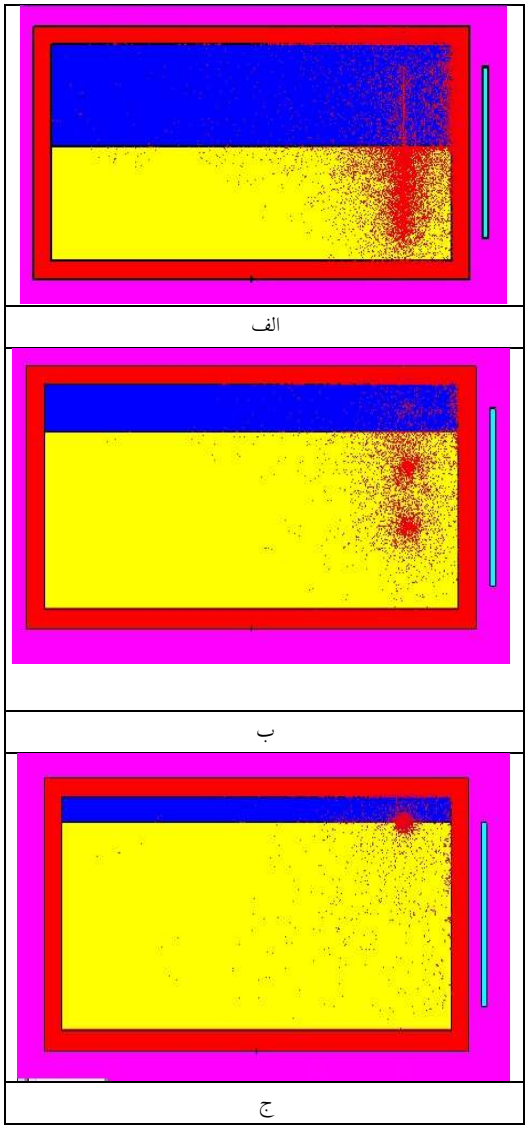
برای تعیین ارتفاع در مخزن شامل اوره و گازهای NH_3، H_2O و CO_2 در دمای ۲۱۰ ^oC و فشار بالای ۱۶۸٫۸ bar، ارتفاع‌سنج شامل آشکارساز سوسوزن پلاستیک BC-400 با ارتفاع ۱۵۰cm و قطر ۵cm به‌صورت میله‌ای بر روی مخزن نصب گردید. آشکارساز در مقابل چشمه و در فاصلهٔ ۱۵cm از پوستهٔ خارجی مخزن نصب شد. چشمهٔ مورد استفاده ^{60}Co با اکتیویته ۵۵mCi و دارای انرژی۱۱۷۳keV و keV ۱۳۳۲ می‌باشد و در فاصلهٔ ۴۶cm از جدارهٔ داخلی مخزن قرار گرفت. چشمهٔ میله‌ای به‌قطر ۰٫۸cm و ارتفاع ۱۵۰cm به‌صورت همسانگرد و بدون حفاظ سربی است که درون یک لولهٔ هدایت کننده از جنس استیل و قطر داخلی ۲cm و ضخامت ۰٫۵cm که از قبل در مخزن تعبیه شده و انتهای آن بسته است قرار گرفته و از طرف دیگر با یک کابل مهارکننده به‌صورت معلق قرار می‌گیرد. جنس مخزن از استیل-۳۱۶ با چگالی$8g/cm^3$ و ضخامتی معادل ۱۶٫۵cm است. با توجه به فشار و دمای بسیار بالای گازهای درون مخزن در حالت عملیاتی، ارتفاع اوره به‌صورت آنلاین و غیر-مخرب با استفاده از روش پرتو گاما اندازه‌گیری شد. عملیات بدین صورت هست که شدت پرتوهای گامای تضعیف شده (شمارش‌ها) توسط آشکارساز در حالت‌هایی که ارتفاع سیال اوره در موقعیت ۱۷، ۲۰، ۲۵، ۳۵، ۳۹، ۴۵، ۵۱، ۵۸، ۶۳، ۶۹، ۷۶ و ۹۰ درصد می‌باشد، با زمان داده برداری ۱s اندازه‌گیری شد.

شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNPX

مطابق با شرایط تجربی، مخزن و ارتفاع سنج هسته‌ای پتروشیمی به‌منظور انتخاب بهینه‌ترین پیکربندی، چشمه و آشکارساز با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی گردید. MCNPX یک کد مونت کارلوی N ذره‌ای

همه منظوره بوده که می‌تواند برای محاسبات ترابرد نوترون، فوتون، الکترون، و همچنین ترابرد حالات جفت شدهٔ نوترون/فوتون/الکترون، نوترون/فوتون، فوتون/الکترون مورد استفاده قرار گیرد. برای استفاده از کد MCNPX بایستی یک فایل ورودی از اطلاعات مسئله که شامل هندسه، مواد، چشمه و نوع خروجی تهیه گردد. این کد با استفاده از اطلاعات فایل ورودی و کتابخانه سطح مقطع‌ها، مسئله را حل کرده و نتایج را در یک فایل خروجی تولید می‌کند [۱۹].

برای پاسخ مناسب‌تر و در نتیجه ارتفاع‌سنجی دقیق، طراحی هندسه، نوع چشمه و آشکارساز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بررسی با توجه به هزینهٔ بالای تولید چشمه میله‌ای رادیواکتیو، امکان استفاده از چشمه‌های نقطه‌ای با فواصل مشخص به‌جای چشمه‌های میله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با شکل ۱ ابتدا استوانه‌ای به شعاع داخلی ۱۸۷٫۵cm و شعاع خارجی ۲۰۴cm، ارتفاع ۲۲۲cm و ضخامت ۱۶٫۵cm با جنس استیل به‌عنوان مخزن شبیه‌سازی شد. مواد داخل مخزن که شامل اوره و گازهای NH_3، H_2O، N_2 و CO_2 در دما و فشار بالا (دمای ۲۱۰°C و فشار ۱۶۸٫۸bar) باید شبیه‌سازی گردد. درصد وزنی گازهای NH_3، H_2O، N_2 و CO_2 به‌ترتیب برابر ٪۲۲٫۵، ٪۶۸، ٪۳٫۹ و ٪۵٫۶ است. با توجه به‌اینکه چگالی گازها در دما و فشار بالا تغییر می‌کند، چگالی هر یک از گازها در دما و فشار بیان شده محاسبه شد. در جدول ۱ چگالی هر یک از گازهای NH_3، H_2O، N_2 و CO_2 در دمای ۲۱۰°C و فشار ۱۶۸٫۸ bar آمده است. با توجه به‌اینکه هدف اندازه‌گیری سطح سیال اوره در مخزن است، اوره با فرمول شیمیایی CH_4N_2O همراه با NH_3، H_2O، N_2 و CO_2 به‌صورت مایع با چگالی ۱٫۰۲ g/cm^3 و با در نظر گرفتن کسر اتمی در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.



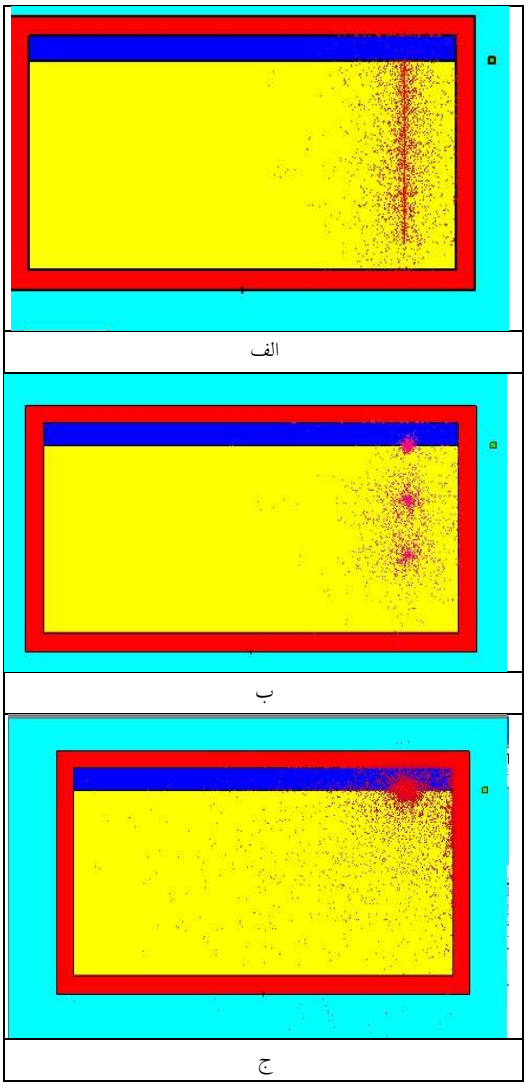
شکل ۱. نمایی از شبیه‌سازی مخزن، آشکارساز سوسوزن پلاستیک با هندسهٔ میله‌ای و طراحی چشمه‌ها به‌صورت الف) میله‌ای ب) سه نقطه ج) تک نقطه.

حال، برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع اوره در مخزن مجتمع تولید اوره پتروشیمی، شدت فوتون‌های ثبت شده توسط آشکارسازها یدور سدیم و سوسوزن پلاستیک در ارتفاع‌های متفاوت اوره به‌صورت ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شد. در ارتفاع صفر، مخزن فقط پر از ترکیب گاز NH_3، H_2O، N_2 و CO_2 است و در مراحل بعد اوره اضافه می‌شود.

جدول۱. چگالی گازهای موجود در استریپر در دمای ^{o}C ۲۱۰ و فشار ۱۶۸٫۸ bar

نام ماده	NH_3	H_2O	CO_2	N_2
چگالی g/cm^3	۰٫۰۹۸۸	۰٫۸۹۱	۰٫۱۹۱	۰٫۰۹۸

حال برای دستیابی به هدف که بهترین طراحی چشمه و آشکارساز و به‌تبع آن ارتفاع‌سنجی دقیق است طراحی‌های متفاوت چشمه انجام شد. ارتفاع‌سنجی سطح مایع اوره توسط چشمه‌های رادیواکتیو ^{60}Co و ^{137}Cs با سه طراحی میله‌ای، سه نقطه و تک نقطه صورت گرفت. در مرحلهٔ۱ چشمهٔ کبالت ^{60}Co به‌صورت میله‌ای به‌قطر ۰٫۸cm و ارتفاع ۱۵۰cm در داخل سلول استوانه و در مختصات (۳۶، ۱۴۱٫۵، ۰) و دقیقاً روبروی آشکارساز قرار گرفت و میزان شار فوتون‌های دریافتی توسط تالی F4 در محل سلول که آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک می‌باشد، دریافت گردید. مرحلهٔ۲ چشمهٔ کبالت ^{60}Co به‌صورت نقطه‌ای با قطر۰٫۸cm و ارتفاع ۱cm در فواصل (۸۶، ۱۴۱٫۵، ۰)، (۱۳۶،۱۴۱٫۵، ۰) و (۱۸۶، ۱۴۱٫۵، ۰) قرار گرفت و شار فوتون‌های رسیده به آشکارساز دریافت گردید. در مرحلهٔ۳ یک چشمهٔ نقطه‌ای با قطر۰٫۸cm و ارتفاع ۱cm در فاصلهٔ (۱۸۶، ۱۴۱٫۵، ۰) قرار گرفت و میزان شار رسیده بررسی گردید. مراحل ذکر شده برای چشمهٔ ^{137}Cs شبیه‌سازی و تکرار گردید. لازم به‌ذکر است که پنجرهٔ انرژی برای چشمهٔ ^{60}Co در بازهٔ انرژی ۳۰۰-۱۵۰۰keV و برای چشمهٔ ^{137}Cs در بازهٔ انرژی ۱۰۰-۷۰۰keV در نظر گرفته شد و شمارش کل در داخل بازهٔ انرژی بیان شده با استفاده از تالی F4 در محل سلول آشکارساز محاسبه گردید. سپس به‌منظور مقایسه و انتخاب بهترین طراحی آشکارساز و بررسی پاسخ آشکارساز یدورسدیم به چشمه‌های میله‌ای و نقطه‌ای ^{60}Co و ^{137}Cs، آشکارساز یدورسدیم در شبیه‌سازی‌های انجام شده جایگزین آشکارساز سوسوزن پلاستیک شد (شکل۲). آشکارساز یدور-سدیم NaI (Tl) با ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر (ارتفاع 5cm و شعاع ۲٫۵cm به‌فاصلهٔ ۱۵ سانتی‌متر از مخزن در مختصات (۱۸۹، ۲۱۶٫۵، ۰) طراحی شد. مطابق با شکل۲، با شبیه‌سازی سیال اوره با ارتفاع متفاوت که به‌صورت ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ سانتیمتر است، شار فوتون‌های رسیده به آشکارساز محاسبه گردید.



شکل۲. شبیه‌سازی مخزن، آشکارساز یدورسدیم ابعاد با ۵×۵ سانتیمتر و طراحی چشمه‌ها به‌صورت الف) میله‌ای ب) سه نقطه ج) تک نقطه.

پارامترهای ارزیابی داده‌های اکتسابی

به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از داده‌های شبیه‌سازی چشمه و آشکارساز با طراحی‌های متفاوت، نتایج با استفاده از پارامترهای کنتراست، قدرت تفکیک، میدان دید و خطای برازش R^2 ارزیابی گردید.

کنتراست

مفهوم کنتراست برای دستگاه‌های سنجشگر متناسب با اختلاف آهنگ شمارش بین دو اندازه‌گیری حداقل و حداکثر می‌باشد. مقدار کنتراست بین صفر و یک است که اگر داده‌ها به یک نزدیک‌تر باشد مناسب‌تر است و به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$C = \left| \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \right| \qquad ۲$$

$I_{\max}$ و $I_{\min}$ به‌ترتیب شدت‌های (آهنگ شمارش) بیشینه و کمینه است [۱۸].

قدرت تفکیک

قدرت تفکیک به کوچکترین تغییر در اندازه‌گیری که می‌تواند توسط ارتفاع‌سنج تشخیص داده شود، اشاره دارد که از رابطهٔ زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$R = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2\sigma_{\max}(counts)} \qquad ۳$$

$I_{\max}$ و $I_{\min}$ به‌ترتیب شدت‌های (آهنگ شمارش) بیشینه و کمینه است. $\sigma_{\max}$ انحراف استاندارد بیشینه آهنگ شمارش که به‌طور تجربی محاسبه می‌شود. هر چه مقدار رزولوشن پایین‌تر باشد نتایج مطلوب‌تر است [۱۸].

میدان دید

یکی از پارامترهای ارزیابی طراحی چشمه و آشکارساز، پارامتر میدان دید است. این پارامتر بازهٔ تعیین ارتفاع اوره را نشان می‌دهد.

میانگین خطای نسبی

به منظور ارزیابی داده‌های تجربی و شبیه‌سازی با کد MCNPX، نتایج با استفاده از خطای میانگین درصد خطای نسبی(MRE%) مقایسه گردید.

$$MRE\% = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{a_i - \hat{a}_i}{a_i} \right| \qquad ۴$$

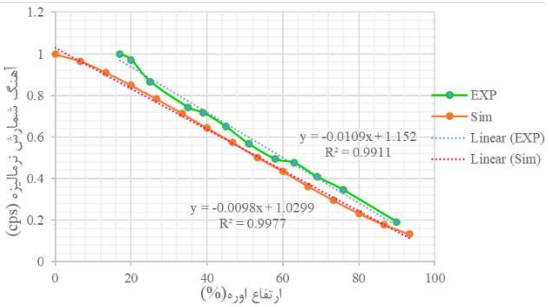
که a_i و $\hat{a}_i$ به‌ترتیب مقادیر تجربی و شبیه‌سازی و N تعداد کل داده‌ها است [۱۸].

خطای برازش R^2

پارامتر دیگری به‌نام خطای برازش R^2 برای پیش بینی و ارزیابی انتخاب بهینهٔ چشمه رادیواکتیو و آشکارساز و طراحی آن به‌صورت میله‌ای و نقطه‌ای ارائه گردید.

نتایج و بحث

در این مطالعه، به‌منظور مقایسه و بهینه سازی طراحی چشمهٔ رادیواکتیو و آشکارساز برای ارتفاع سنجی دقیق، ابتدا ارتفاع‌سنج هسته‌ای شامل چشمه، آشکارساز و مخزن شامل اوره و گازها در دما و فشار بالا به‌وسیلهٔ کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد و نتایج با مقادیر تجربی تحلیل، مقایسه و اعتبار سنجی گردید که نتایج در شکل۳ آمده است.



شکل۳. مقایسه شدت پرتوهای رسیده به آشکارساز سوسوزن پلاستیک (آهنگ شمارش) ناشی از تضعیف سیال به ازای ارتفاع اوره متفاوت در حالت شبیه سازی و تجربی.

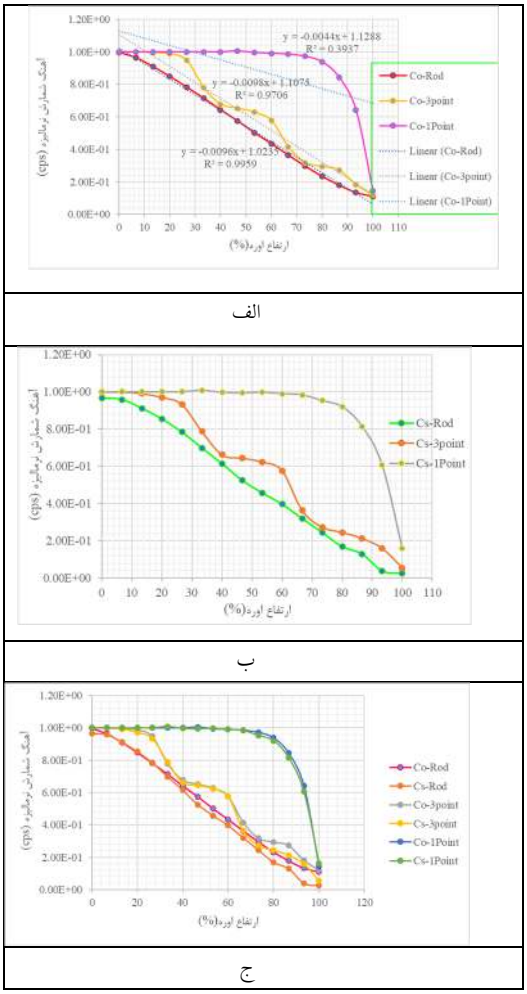
مطابق با نتایج، با افزایش سیال، چگالی افزایش یافته و تضعیف پرتو گامای گسیلی از چشمه بیشتر و در نهایت پرتوهای گامای رسیده به آشکارساز کاهش می‌یابد. خطای نسبی بین داده‌های شبیه‌سازی و تجربی برابر ٪۱۱ گردید. همچنین پارامترهای ارزیابی شامل کنتراست، رزولوشن، رگرسیون داده‌های تجربی و شبیه سازی در جدول۲ مقایسه گردید که نتایج نشان دهنده نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی و تجربی است.

جدول۲. مقایسهٔ پارامترهای ارزیابی به‌ازای ارتفاع اوره متفاوت در حالت شبیه‌سازی و تجربی.

پارامتر	قدرت تفکیک	کنتراست	خطای برازش R^2
تجربی	۰٫۶۱۹	۰٫۸۰۷۳	۰٫۹۹۱۱
تئوری	۰٫۵۶۲	۰٫۸۹۰۰	۰٫۹۹۷۷

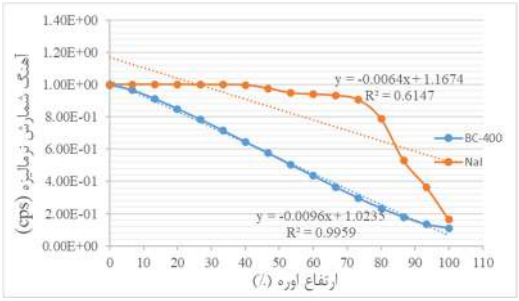
پس از اعتبارسنجی، سپس به‌منظور بهینه‌سازی چیدمان چشمه و آشکارساز برای اکتساب بهترین داده‌ها جهت ارتفاع‌سنجی، شبیه‌سازی در طراحی‌های متفاوت انجام شد. مطابق با پارامترهای بیان شده نتایج حاصل از چشمه و آشکارسازها با نوع و طراحی‌های متفاوت مقایسه و ارزیابی گردید. برای انتخاب بهترین طراحی چشمهٔ رادیواکتیو، یک آشکارساز مشخص و یک چشمه با انرژی مشخص را در نظر گرفته و اثر طراحی میله‌ای، سه نقطه و تک نقطه بررسی شد. ابتدا چشمهٔ ^{60}Co به‌صورت میله‌ای، سه نقطه و تک نقطه و آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک طراحی شد و نتایج در شکل۴-الف آمده است. سپس چشمهٔ ^{137}Cs به‌صورت میله‌ای، سه نقطه و تک نقطه شبیه‌سازی و پاسخ آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک بررسی گردید که در شکل۴-ب آمده است. در نهایت نتایج حاصل از چشمه‌های کبالت و سزیوم با یکدیگر مقایسه گردید که در شکل۴-د نشان داده شده است.

مطابق با نتایج، طراحی میله‌ای چشمهٔ رادیواکتیو بهترین میدان دید، کنتراست، رزولوشن و رگرسیون را در مقایسه با طراحی سه نقطه و تک نقطه ارائه کرد. میدان دید برای چشمه تک نقطه از ٪۸۰ ارتفاع اوره شروع شده و مناسب ارتفاع‌سنجی نیست و برای مقایسه سایر پارامترهای ارزیابی لحاظ نمی‌گردد. بنابراین طراحی سه نقطه و میله‌ای مقایسه گردید. در طراحی میله‌ای کمیت‌های کنتراست، رزولوشن و رگرسیون به‌ترتیب برابر ۰٫۸۹، ۰٫۵۶۲و ۰٫۹۹۵۹ محاسبه شد در حالی‌که این پارامترها برای طراحی سه نقطه ۰٫۸۸۱، ۰٫۵۶۸ و ۰٫۹۷۰۶ اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل از چشمه‌های سه نقطه نزدیکی قابل توجه به داده‌های طراحی میله‌ای دارد. با توجه به‌میزان هزینهٔ بالای تولید چشمه‌های میله‌ای، می‌توان از طراحی چشمهٔ سه نقطه در ارتفاع-سنج‌های هسته‌ای استفاده نمود.



شکل۴. ارزیابی طراحی چشمهٔ رادیواکتیو به‌صورت میله‌ای، سه نقطه و تک نقطه‌ای جهت ارتفاع‌سنجی با استفاده از شدت پرتوهای رسیده به آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک الف- برای چشمهٔ ^{60}Co ب- برای چشمهٔ ^{137}Cs ج- هر دو چشمهٔ ^{60}Co و ^{137}Cs.

در گام بعد، برای انتخاب مناسب‌ترین طراحی آشکارساز، چشمهٔ رادیواکتیو با طراحی و انرژی مشخص را ثابت در نظر گرفته و اثر طراحی میله‌ای و نقطه‌ای را برای آشکارساز یدورسدیم و آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک بررسی کردیم. مطابق با نتایج و نمودار شکل۵، میدان دید برای آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک وسیع است و ارتفاع‌سنجی در ارتفاعات بسیار پایین اوره می‌تواند انجام شود اما برای آشکارساز نقطه‌ای یدورسدیم ارتفاع‌سنجی در سطوح پایین امکان پذیر نیست و از سطح ٪۸۰ اوره می‌تواند تعیین ارتفاع نماید. همچنین مقدار رگرسیون برای آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک ۰٫۹۹۵۹ است که در مقایسه با آشکارساز نقطه‌ای یدورسدیم با مقدار رگرسیون ۰٫۶۱۴۷ برتری دارد.



شکل۵. انتخاب آشکارساز مناسب جهت ارتفاع سنجی دقیق.

نتیجه‌گیری

از آنجایی‌که در ارتفاع‌سنجی اوره در مخزن پتروشیمی، مواد و گازهایی با دمای بسیار بالا و فشار زیاد هستند، می‌توان از روش غیرمخرب هسته‌ای شامل چشمه و آشکارساز استفاده نمود. برای دستیابی به پاسخ مناسب و در نتیجه ارتفاع‌سنجی دقیق، طراحی هندسه، نوع چشمه و آشکارساز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این طراحی با توجه به‌هزینهٔ بالای تولید چشمه میله‌ای رادیواکتیو و در برخی موارد عدم ساخت چشمه‌های میله‌ای در کشور، امکان استفاده از چشمه‌های نقطه‌ای با فواصل مشخص به‌جای چشمه‌های میله‌ای مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به‌نتایج به‌دست آمده ارتفاع سنجی و پاسخ آشکارساز میله‌ای سوسوزن پلاستیک به طراحی چشمهٔ سه نقطه توافق و نزدیکی خوبی با طراحی چشمهٔ میله‌ای دارد. بنابراین چشمه با طراحی به‌صورت سه نقطه می‌تواند جایگزین مناسبی به‌جای چشمه‌های میله‌ای با هزینهٔ بالا باشند .

مرجع‌ها

[1] G.A. Johansen, P. Jackson, Radioisotope Gauges for Industrial Process Measurements. John Wiley & Sons Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, (2004).

[2] Technical data on nucleonic gauges, IAEA-TECDOC-1459, IAEA, VIENNA, (2005).

[3] Industrial applications of sealed radioactive source, IAEA, VIENNA, (2021).

[4] P. Esmaili, F. Cavedo, M, Norgia, Differential pressure-based liquid level measurement in sloshing condition. In 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), (2019), 1-6. 10.1109/I2MTC.2018.8409730

[5] Y. Zhang, B. Zhang, L. Zhang, Y. Li, X. Gao, Z. Liu, 2018. Liquid level measurement model outside of closed containers based on continuous sound wave amplitude, Sensors, 18, 2516. https://doi.org/10.3390/s18082516

[6] J.A. Morton, M. Khavari, A. Priyadarshi, A. Kaur, N. Grobert, J. Mi, K. Porfyrakis, P. Prentice, D.G. Eskin, I. Tzanakis, 2023. Dual frequency ultrasonic cavitation in various liquids: High-speed imaging and acoustic pressure measurements. Phys. Fluids. 35, 017135. https://doi.org/10.1063/5.0136469

[7] J.S. Slongo, J. Gund, T.A. Rigo Passarin, D.R. Pipa, J.E. Ramos, L.V. Arruda, F.N. Junior, 2022. Effects of Thermal Gradients in High-Temperature Ultrasonic Non-Destructive Tests, Sensors. 22, 2799. 10.3390/s22072799

[8] D.J. Jang, H.K. Park, M.C. Lee, 2024. Experimental investigation on the measurement performance of high-speed ultrasonic wave thermometry in ambient- and high-temperature environments. Appl. Therm. Eng. 242, 122484. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122484

[9] D.V.Q. Rodrigues,C. Li, 2021. A Review on Low-Cost Microwave Doppler Radar Systems for Structural Health Monitoring. Sensors. 21, 2612. https://doi.org/10.3390/s21082612

[10] A. Sahare, A. Khan, D.P. Rathod, R. Raichur, Guided Wave Radar for Precise level Measurement using Time Domain Reflectrometry (TDR) Principle, IJIRCCE. 3(6) (2015) 4987-4995. 10.15680/ijircce.2015.0306003

[11] A.A. Ayati, L.F. Farias, A.I.B. Azevedo, I.B. de Paula, 2017. Characterization of linear interfacial waves in a turbulent gas-liquid pipe flow. Phys. Fluids. 29, 062106. https://doi.org/10.1063/1.4985717

[12] J.R. Hanni, S.K. Venkata, 2020. A novel helical electrode type capacitance level sensor for liquid level measurement. SENSOR ACTUAT A-PHYS. 315, 112283. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112283

[13] M. Yadollahi Roshan, M. Tajik, R. Gholipour Peyvandi, Influence of relative position gamma source–scintillator on response a large NE102 rectangular detector, J. Res. Many-Body Syst. 8 (2018) 61-68. [In Persian] 10.22055/jrmbs.2018.13954

[14] A.A. Thabet, A. Hamzawy, M.S. Badawi, New mathematical approach to calculate the geometrical efficiency using different radioactive sources with gamma-ray cylindrical shape detectors. Nucl. Eng. Technol. 52 (2020) 1271-1276. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.11.022

[15] R. Gholipour Peyvandi, A. Taheri, A. Olfateh, S.Z. Islami, A new automated and precise calibration method for gamma level gauges with rod detector arrangement, Appl. Radiat. Isotopes. 112 (2016) 1-4.

https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.011
[16] Rod source point detector arrangement, in Berthold Technologies GmbH & Co. KG2022, Berthold: Germany. p. 6.
[17] Uni-Probe LB 490 Non-Contact Level Measurement, in BERTHOLD TECHNOLOGIES GmbH & Co. KG 2007: Germany. p. 6.
[18] G.F. Knoll, Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons, (2016).
[19] S. Mohtaram, M. Tajik, R. Gholipour Peyvandi, 2021. Comparison of MCNPX and FLUKA Monte Carlo codes in the simulating a nuclear gauge. Appl. Radiat. Isotopes. 170, 109603. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109603