

# طراحی مفهومی سیستم هسته‌ای بررسی قابلیت توپکرانی در محل انشعابات خط لوله

امیرمحمد بیگ زاده، مجتبی عسکری\*، محسن شریف زاده  
پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران  
moasgari@aeoi.org.ir

## چکیده:

توپکرانی در صنایع نفت و گاز از فرایندهای مرسوم است که به منظور حذف رسوبات درون خطوط لوله و نیز انجام برخی آزمون‌های غیرمخرب صورت می‌پذیرد. از طرفی به دلیل انشعابات مختلف در مسیر خط لوله اصلی جریان امکان توقف توپک وجود دارد. راهکار مناسب بکارگیری درپوش‌های مشبکی است که نه تنها مانع از گیر کردن توپک شود بلکه تضمین عبور جریان از کلیه خطوط اصلی و فرعی را نیز شامل شود. بنابر اظهار نظر بازرسان فنی اطلاعات جامعی از حضور/عدم حضور این درپوش‌ها در تعداد زیادی از انشعابات وجود ندارد. دوربین پرتونگاری به دلیل انرژی متوسط پرتو گسیلی و نیز ساختار هندسی آن فاقد توان لازم در تشخیص دو وضعیت حضور و عدم حضور درپوش در شرایط لوله پر است. در این کار تحقیقاتی بر روی طراحی مفهومی سیستم هسته‌ای بررسی قابلیت توپکرانی در محل انشعابات خط لوله در محیط شبیه‌ساز مونت کارلو تمرکز گردید. نتایج گویای این واقعیت است که در وضعیتی که چشمه و آشکارساز عمود بر محور انشعاب اصلی و فرعی و روبروی یکدیگر باشند حساسیت شمارشی و توان نفکیک بیشینه قابل دستیابی است. اختلاف نسبی شمارش حالات با و بدون حضور شبکه فلزی برای دو وضعیت پرشدگی لوله از هوا و نفت به ترتیب برابر با  $53/8\%$  و  $57/1\%$  است. کلیدواژه: طراحی مفهومی، امکان‌سنجی، توپکرانی، انشعاب، فناوری هسته‌ای، شبیه‌سازی، مونت کارلو.

## Conceptual design of the nuclear system for checking pigability at pipeline branches

A.M. Beigzadeh, M. Askari\*, M. Sharifzadeh  
Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,  
Tehran, Iran  
Email: moasgari@aeoi.org.ir

### Abstract:

Pigging is one of the conventional processes in the oil and gas industries, which is done in order to remove sediments from pipelines and also perform some non-destructive tests. On the other hand, due to various branches in the main pipeline, there is a possibility of stopping the pig. The right solution is to use mesh caps that not only prevent the pig from getting stuck, but also guarantee the passage of flow through all the main and secondary lines. According to the opinions of technical inspectors, there is no comprehensive information about the presence/absence of these caps in a large number of branches. The industrial radiography lacks the ability to detect the presence and absence of the cap in a fully filled pipe due to the average energy of the emitted beam and its geometrical structure. It is focused on the conceptual design of the nuclear system for investigating the possibility of pigging in the location of pipeline branches in the Monte Carlo environment. The results show the fact that in the situation where the source and the detector are perpendicular to the axis of the main and secondary branches and facing each other, the maximum counting sensitivity and discrimination can be achieved. The relative

difference of two states with and without the presence of metal grid for two states of filling the pipe with air and oil is equal to 53.8% and 57.1%, respectively.

Keywords: Conceptual design, feasibility, pigging, branch, nuclear technology, Simulation, Monte Carlo.

## ۱- مقدمه

یکی از فرایندهای مکانیکی مهم در صنایع نفت و گاز به منظور حصول اطمینان از عبور آزاد جریان درون خطوط لوله توپکرانی است. این فرایند در دو دسته کلی و با هدف تخلیه رسوبات آلی درون خطوط لوله و نیز مانیتورینگ درون آن صورت می‌پذیرد. برخی مواقع پیش می‌آید که توپک نه تنها وظیفه اصلی خود را انجام نمی‌دهد بلکه به سبب گیر کردن در میانه راه موجب تحمیل خسارت و نیز ممانعت از انتقال نفت، گاز و یا مشتقات می‌شود. یکی از نقاط کلیدی که امکان گیر افتادن توپک در آن وجود دارد در محل انشعابات روی خط لوله اصلی جریان است. در این شرایط بایستی با تعبیه صفحات مشبک در ورودی انشعاب فرعی مانع از به دام افتادن توپک شد. بنابر اظهار نظر بازرسان فنی اطلاعات جامعی از حضور/عدم حضور این صفحات در تعداد زیادی از انشعابات وجود ندارد. لذا، ضرورت دارد به منظور تشخیص انشعابات فاقد صفحه مشبک از مکانیزم‌های اندازه‌گیری غیرمخرب استفاده شود.

استفاده از پرتوهای گاما در تست‌های غیرمخرب کاربرد وسیعی دارد. باربوسا و همکاران در سال ۲۰۲۱ بر روی توسعه روش غیرتداخلی استفاده از پرتوهای گاما برای اندازه‌گیری غلظت نمک در آب دریا تحقیق کردند که با 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 [۱]. در تحقیقی مهم 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. [۲]. مطالعات مشابه دیگری نیز در ادامه توسط هولستاد و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۳] و ساتره و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴] با استفاده از تلفیق فناوری گامای عبوری و پراکنده برای اندازه‌گیری کسر فازی گاز درون مخلوط همگن دوفازی و مستقل از میزان شوری صورت پذیرفت. سالگادو 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 جریانی حلقوی و لایه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۵]. 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 طرحی 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 پراانرژی 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 چگالی سنجی پرتو گاما و پروب فیبر نوری نقطه‌ای ایجاد و به کار گرفتند [۶]. در تحقیقی دیگر توسط سالگادو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ انباشت رسوب درون خطوط لوله جریان چندفازی آب-گاز-نفت با استفاده از یک شبکه عصبی آموزش دیده به کمک داده شبیه‌سازی ترابرد پرتوهای گاما در ماده در محیط نرم‌افزار MCNP6 مورد بررسی قرار گرفت [۷]. در

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ توسط دم و همکارانش انجام شد کسر حجمی سیال چندفازی عبوری از لوله و نیز میزان رسوب انباشته باریم‌سولفات با بکارگیری دو آشکارساز سوسوزن یدور سدیم برای خوانش پرتوهای گامای عبوری و پراکنده حول لوله اندازه‌گیری شد [۸].

همانگونه که مشاهده می‌شود سنجشگرهای گاما نقش مهمی را در صنایع مختلف با هدف اندازه‌گیری و 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. یکی دیگر از روش‌های مرسوم غیرمخرب در استخراج اطلاعات و تصاویر نقایص بکارگیری دوربین پرتونگاری است. از آنجا که دوربین پرتونگاری به دلیل انرژی متوسط پرتو گسیلی و نیز ساختار هندسی آن فاقد توان لازم در تشخیص دو وضعیت حضور و عدم حضور در پوش به‌خصوص در شرایطی است که لوله با سیال نفتی پر شده باشد، هدف در این کار تحقیقاتی طراحی مفهومی سیستم هسته‌ای بررسی قابلیت توپک‌رانی در محل انشعابات خط لوله در محیط شبیه‌ساز مونت‌کارلو تعریف گردید. هدف در این کار تحقیقاتی بررسی امکان دستیابی به چیدمانی بهینه از چشمه و آشکارساز حول انشعاب است به‌گونه‌ای که به دور از هرگونه مخاطرات پرتوی نظیر پرتونگاری صنعتی بتوان با توان تفکیک بالایی دو وضعیت مختلف با و بدون حضور صفحه مشبک فلزی را در محل انشعاب فرعی از یکدیگر تشخیص داد.

## ۲- روش

روش مورد استفاده در این کار تحقیقاتی استفاده از محیط شبیه‌ساز مونت‌کارلو و کد محاسباتی MCNPX با هدف بررسی تغییرات شمارش آشکارساز/آشکارسازهای پرتوی گامای گسیلی از چشمه رادیواکتیو گامازای کبالت-۶۰ در حالت‌های چهارگانه لوله خالی-بدون شبکه فلزی، لوله خالی-با شبکه فلزی، لوله پر-بدون شبکه فلزی، و لوله پر-با شبکه فلزی از یکدیگر است. برای حالت خالی از هوا و برای حالت پر از نفت در شبیه‌سازی استفاده شد. به این منظور میزان اختلاف شمارش کل ثبت‌شده توسط آشکارساز سوسوزن میله‌ای مبنایی برای تعیین توان تشخیص حالات چهارگانه فوق و با هدف کسب اطلاعات در مورد حضور/عدم حضور شبکه فلزی در محل انشعاب فرعی قرار گرفت.

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی مونت‌کارلو، از مقایسه نمودار تغییرات شمارش برحسب چگالی محلول آب-نمک در محیط شبیه‌سازی و داده‌گیری تجربی استفاده شد. به سبب 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 داده شبیه‌سازی، از نتایج آن در سایر شرایط هندسی و ابعادی بهره برد.

### ۲-۱- تئوری

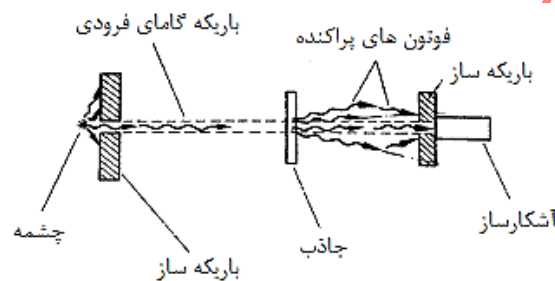
در طراحی مفهومی سیستم هسته‌ای بررسی قابلیت توپک‌رانی در محل انشعابات خط لوله، موقعیت قرارگیری چشمه رادیواکتیو و آشکارساز پرتوی نسبت به یکدیگر و نیز موقعیت زاویه‌ای هر دو حول انشعاب در کنار تعبیه گشودگی بهینه دهانه یکسوساز باریکه خروجی به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر دقت تفکیک محتوای درون لوله از صفحه مشبک مورد بررسی قرار گرفت. در مورد پارامتر نخست، چشمه و آشکارساز در دو وضعیت روبرو و یا کنار یکدیگر جهت شمارش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت اول با استفاده از شمارش پرتوهای گامای عبوری از لوله امکان استخراج اطلاعات مهمی از درون آن فراهم می‌گردد و در حالت دوم این کار با استفاده از شمارش پرتوهای پس‌پراکنده از محتوای درون لوله انجام می‌شود. در مورد پارامتر دوم، با توجه به موقعیت زاویه‌ای قرارگیری چشمه و آشکارساز، وضعیت بهینه از حیث آمار شمارش و نیز بیشینه تمایز در شمارش‌های متناظر با حالات مختلف پرشدگی لوله قابل استخراج خواهد بود. در مورد پارامتر سوم و البته نهایی نیز، یکسوساز

که نوعی حفاظ ایمنی پرتو محسوب می‌شود این امکان را فراهم می‌کند تا با تنظیم شدت تابش گامای گسیل شده از چشمه به سمت لوله، حالت بهینه از حیث کاهش خطای آماری و نیز تمایز بین حالات مختلف پرتودهی لوله فراهم شود.

مطابق با قانون تضعیف نمایی لامبرت-بیر<sup>۱</sup> شدت خوانش آشکارساز در دو وضعیت متفاوت پرتودهی مخزن به فرار زیر است [۹]:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (۱)$$

که  $I_0$  و  $I$  به ترتیب شدت خوانش به‌ازای شرایط پرتودهی مخزن توسط هوا و ماده چگال می‌باشد و  $\mu$  ضریب تضعیف خطی ماده جاذب و  $x$  طولی است که پرتو یونساز در ماده می‌پیماید تا به آشکارساز برسد. طرحی از اصول اندازه‌گیری یک سامانه هسته‌ای مبتنی بر قانون تضعیف نمایی مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. طراحی کلی اجزای یک سیستم هسته‌ای مبتنی بر قانون تضعیف نمایی لامبرت-بیر [۱۰].

آنچه در ادامه مورد توجه است دستیابی به مقادیر شمارشی قابل قبول به‌منظور تفکیک دو ماده فوق می‌باشد. بدیهی است که بکارگیری مواد سوسوزن با محتوای عنصری و چگالی بالا می‌تواند منجر به ثبت بیشینه تابش ورودی به آشکارساز گردد که در شرایط خاص حاکم بر انشعابات در مسیر خطوط لوله جریان و به‌منظور افزایش هرچه بیشتر انعطاف در شکل‌دهی به آشکارساز جهت انطباق با شرایط هندسی و ابعادی از سوسوزن‌های پلاستیکی بهره برده شد. محدودیت آشکارساز مذکور بازدهی نسبتاً پایین آن است که با افزایش حجم ماده سوسوزنی و نیز با افزایش شار گسیلی از چشمه به سمت آشکارساز تا حد زیادی قابل رفع است.

## ۲-۲- 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 [۱۱].

در این مطالعه برای مدل‌سازی هندسه لوله گاز از کد مونت‌کارلوی MCNPX استفاده شد. MCNPX یک کد توسعه یافته مونت‌کارلو است که به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی ترابرد ذراتی مانند نوترون، فوتون و الکترون از طریق هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود [۱۲]. این کد مبتنی بر روش مونت‌کارلو است که از نمونه‌گیری تصادفی برای شبیه‌سازی رفتار ذرات در اندرکنش

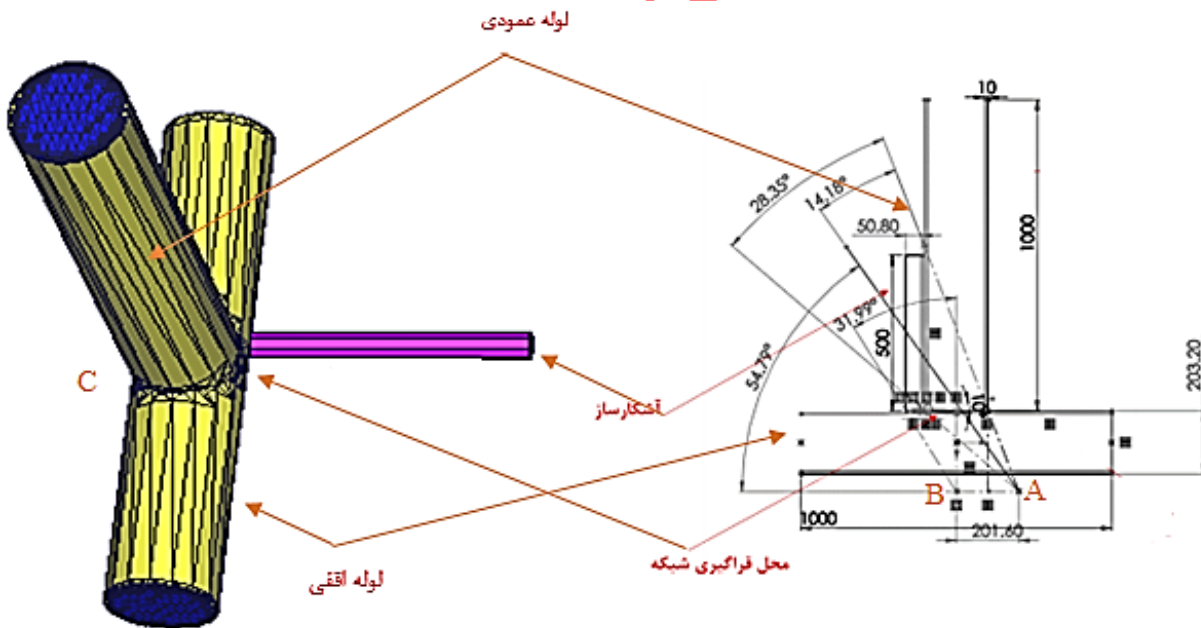
با ماده استفاده می‌کند. این امکان مدل‌سازی دقیق فرآیندهای فیزیکی پیچیده مانند واکنش‌های هسته‌ای، پراکندگی و جذب را فراهم می‌کند. یکی از ویژگی‌های کلیدی این کد توانایی آن در مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده و واقعی از جمله دستگاه‌های تصویربرداری و ابزار دقیق پرتوی است.

در ابتدا طرح چیدمان مورد نظر به صورت دوبعدی ترسیم گردید و مکان چشمه، آشکارسازها یا آشکارساز و زاویه گسیل ذرات از چشمه تنظیم شد. در ادامه نقشه مورد نظر در فضای مونت‌کارلو مدل‌سازی گردید. هدف در اینجا بررسی حضور یا عدم حضور شبکه فلزی است که در ابتدای شاخه فرعی انشعاب مستقر است.

از چشمه گامازای کبالت- $^{60}$  در شبیه‌سازی استفاده گردید. این ایزوتوپ رادیواکتیو به طور گسترده به عنوان منبع پرتو گاما در ابزار دقیق پرتوی بکار می‌رود. این ماده که پس از تابش‌دهی کبالت- $^{59}$  طبیعی با نوترون در یک راکتور هسته‌ای تولید می‌شود پرتوهای گاما با انرژی میانگین  $1/25 \text{ MeV}$  را گسیل می‌کند. گشودگی دهانه یکسوساز به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند تمامی محل استقرار احتمالی شبکه و از طرفی سطح آشکارساز را پوشش دهد.

آشکارساز مورد استفاده نیز یک سوسوزن پلاستیکی از جنس پلی وینیل تولوئن با سطح مقطع  $2$  اینچ و ارتفاع  $50$  سانتیمتر در نظر گرفته شد. این آشکارساز از یک ماتریس پلیمری حاوی مواد سوسوزن ساخته شده است که در صورت قرار گرفتن در معرض تابش گاما از خود نور مرئی گسیل می‌کند. این آشکارسازها دوام و مقاومت بالایی در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت و دما دارند.

در این کار تحقیقاتی، با توجه به امکان‌های موجود از سه چیدمان مختلف چشمه و آشکارساز حول انشعاب استفاده شد و نتایج شمارشی برای مقایسه عملکرد آنها و در نهایت انتخاب ساختار بهینه با بیشینه قابلیت تشخیص حضور و یا عدم حضور شبکه فلزی مورد استفاده قرار گرفت. شماتیک مربوط به چیدمان‌های مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است.

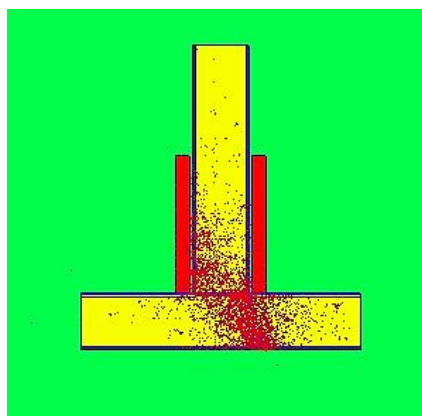


شکل ۲: شماتیک چیدمان سه گانه چشمه-آشکارساز حول انشعاب. (A) چیدمان نخست، چشمه زیر انشعاب اصلی غیرمعمور با انشعاب فرعی و آشکارساز در فضای میانی انشعاب اصلی و فرعی روبروی یکدیگر قرار گرفته اند، (B) چیدمان دوم، چشمه زیر انشعاب اصلی هم‌محور با انشعاب فرعی و آشکارساز در فضای میانی انشعاب اصلی و فرعی گرداگرد انشعاب فرعی روبروی یکدیگر قرار گرفته اند، و (C) چیدمان سوم، چشمه و آشکارساز عمود بر محور انشعاب اصلی و فرعی روبروی یکدیگر قرار گرفته اند.

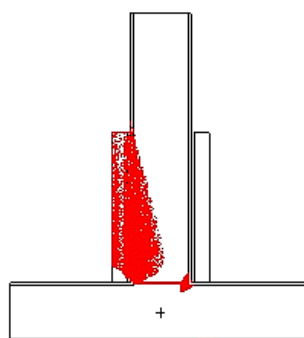
## ۲-۲-۱ چیدمان نخست

در چیدمان نخست آنگونه که در شکل ۲ نیز مشخص شده است چشمه گسیلنده گاما در مکان A در فاصله ۲۰/۱ سانتیمتری از محور اصلی لوله عمودی و ۵/۷ سانتیمتری از بدنه لوله قرار داده شد. در این چیدمان با توجه به شکل چشمه در موقعیت A قرار گرفت و همانگونه که بیان گردید زاویه تابش و خروج پرتوها از محل چشمه به سمت چیدمان به گونه‌ای در نظر گرفته شد که تمام ناحیه حضور شبکه و آشکارساز را پوشش دهد.

در شکل ۳ گسیل ذرات از چشمه با و بدون حضور ماده برای این چیدمان نشان داده شده است. حضور ماده در مسیر عبور پرتوها از درون لوله منجر به ایجاد پراکندگی می‌شود.



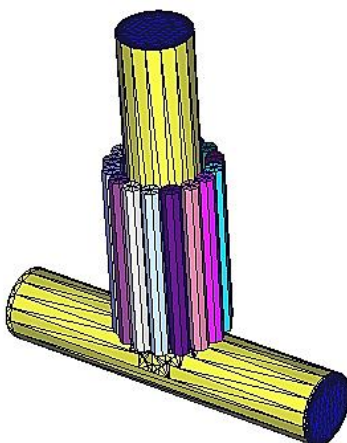
ب



الف

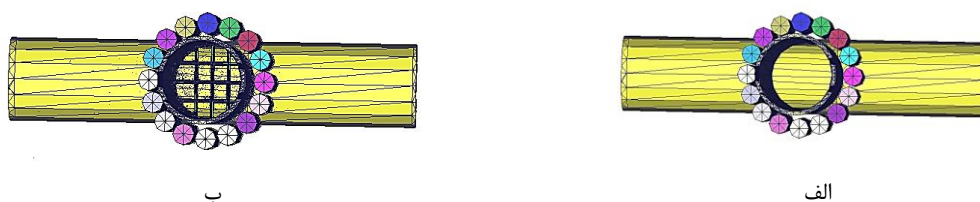
شکل ۳: گسیل ذرات گاما از چشمه به سمت آشکارسازها در چیدمان نخست، الف) بدون حضور سیال درون لوله و بدون پراکندگی ب) با حضور سیال درون لوله و پراکندگی

در ادامه و برای اینکه تغییرات شمارش و میزان حضور ذرات گسیل شده از چشمه در نواحی مختلف اطراف لوله نشان داده شود دسته‌ای از آشکارسازها در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف پیرامون لوله عمودی قرار داده شدند که با پوشش کل فضای پیرامونی لوله، موقعیت زاویه‌ای بهینه در چیدمان نخست را بتوان تخمین زد. در شکل ۴ نمای سه‌بعدی از این آشکارسازها نشان داده شده است.



شکل ۴: طرح سه بعدی مدل از لوله و آشکارسازهای مستقر در زوایای مختلف پیرامونی در چیدمان نخست.

در شکل ۵ چیدمان فوق از نمای بالا در دو حالت با و بدون حضور شبکه فلزی نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای بالایی چیدمان نخست در دو حالت با و بدون حضور شبکه فلزی. طرح سه بعدی مدل از لوله و آشکارسازهای مستقر در زوایای مختلف پیرامونی.

### ۲-۲-۲ چیدمان دوم

در این چیدمان همانگونه که در شکل ۲ نیز مشخص شده است مکان قرارگیری چشمه تغییر و در موقعیت B قرار می‌گیرد. در این موقعیت آشکارسازهای پیرامونی لوله قادرند در شرایطی متقارن پرتوهای عبوری از درون لوله را در دو حالت کلی با و بدون حضور شبکه فلزی برای وضعیت‌های مختلف پرشدگی لوله از هوا و یا سیال نفتی آشکارسازی و ثبت کنند. در این چیدمان نیز دقت شده است که زاویه تابش و خروج پرتوها از محل چشمه به سمت لوله به گونه‌ای باشد که تمام ناحیه حضور شبکه و آشکارساز را پوشش دهد.

در شکل ۶ گسیل ذرات از چشمه با و بدون حضور ماده برای این چیدمان نشان داده شده است.

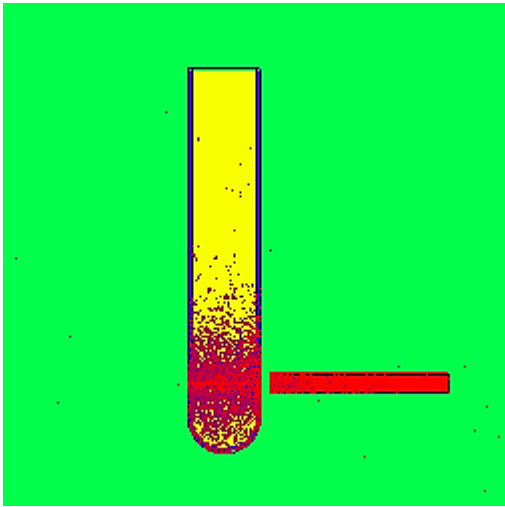


شکل ۶: گسیل ذرات گاما از چشمه به سمت آشکارسازها در چیدمان دوم، الف) بدون حضور سیال درون لوله و بدون پراکندگی، ب) با حضور سیال درون لوله و پراکندگی

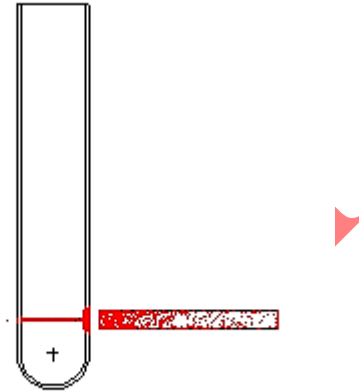
### ۲-۲-۳ چیدمان سوم

در چیدمان سوم محل قرارگیری چشمه همانگونه که در شکل ۲ مشخص شده است به موقعیت C تغییر یافت. هدف از این تغییر در واقع حذف لوله افقی از مسیر پرتوهای ورودی به لوله و کمک به افزایش شدت پرتوهای خوانشی توسط آشکارساز روبرو

است. با این اقدام انتظار می‌رود که شرایط برای افزایش حساسیت شمارش و در ادامه تمایز دو حالت با و بدون حضور شبکه فلزی در محل انشعاب فرعی فراهم گردد. شکل ۷ نمایی از چیدمان مذکور را در این دو حالت نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۷: گسیل ذرات گاما از چشمه به سمت آشکارسازها در چیدمان سوم، الف) بدون حضور سیال درون لوله و بدون پراکندگی، ب) با حضور سیال درون لوله و پراکندگی

### ۲-۳ اعتبارسنجی

در ارتباط با اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو 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 با داده‌های تجربی مربوط به یکسوساز مشابه موجود در آزمایشگاه، روند تغییرات شمارش برحسب چگالی محلول آب-نمک به‌عنوان معیار اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. در این فرایند از چشمه کبالت- $^{60}\text{Co}$  با فعالیت پرتوزایی  $5\text{ mCi}$  واقع در عمق  $7\text{ cm}$  یکسوساز و با گشودگی دهانه مستطیلی که منجر به تابش پرتوها به صورت نازک مدادی شکل به لوله حاوی سیال می‌شود استفاده گردید. نمایی از ساختار تجربی موجود در آزمایشگاه در شکل ۸ نشان داده شده است.



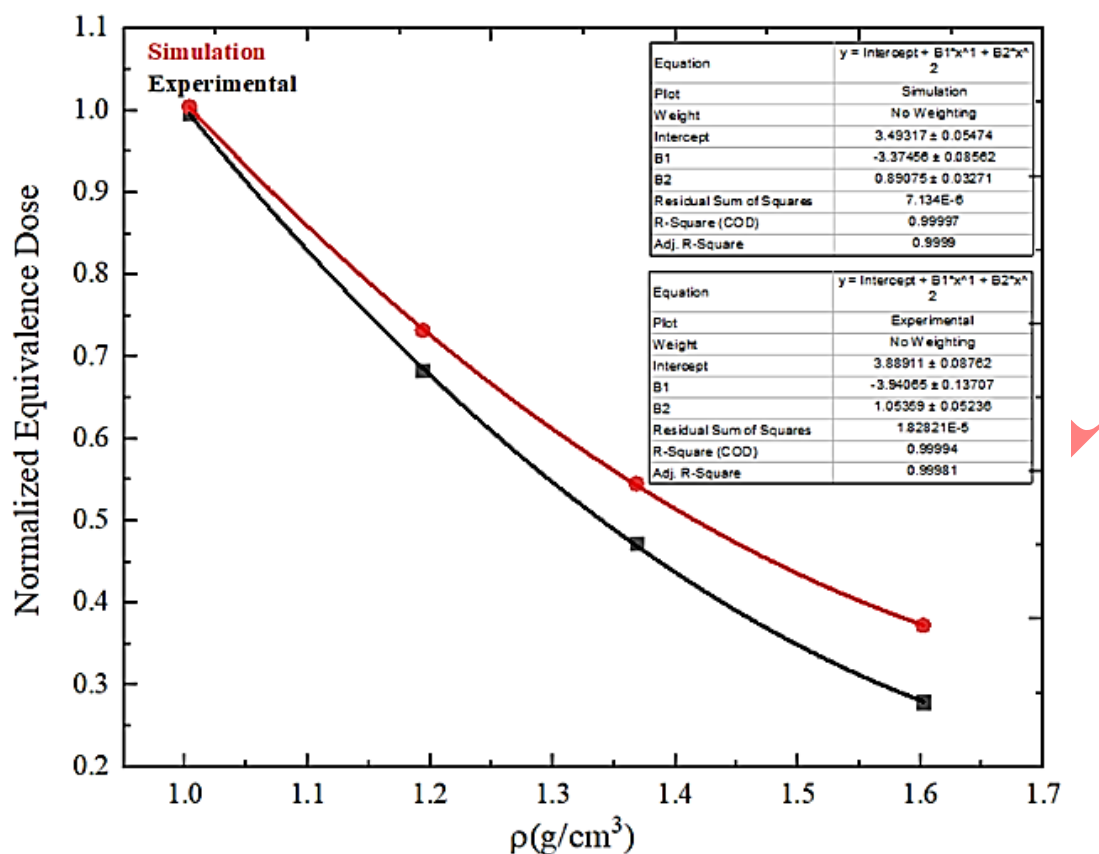


شکل ۸: نمایی از سیستم داده‌گیری تجربی، اندازه‌گیری چگالی محلول آب-نمک موجود در آزمایشگاه. سیستم غلظت‌سنج هسته‌ای مشتمل بر (۱) بدنه حاوی آب شور، (۲) محفظه آشکارسازی، (۳) یکسوساز چشمه، و (۴) جعبه حاوی صفحه نمایشگر.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱ نتایج اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در ارتباط با ابعاد و هندسه یکسوساز و فعالیت پرتوزایی چشمه در دسترس در آزمایشگاه، روند کلی تغییرات شمارش نرمالیزه شده برحسب چگالی برای دو وضعیت مشابه تجربی و شبیه‌سازی مورد استناد قرار گرفت. همانگونه که پیش از این بیان شد این مقایسه برای قرارگیری چشمه کبالت-۶۰ درون یکسوساز و در عمق ۷ cm و با گشودگی دهانه مستطیلی که منجر به تابش پرتوها به صورت نازک مدادی شکل به لوله حاوی سیال می‌شود، انجام گرفت. تالی مورد استفاده در شبیه‌سازی، F8، جهت محاسبه آهنگ شمارش 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 آب شور انجام شد. نتایج مقایسه در شکل ۹ نشان داده شده است.

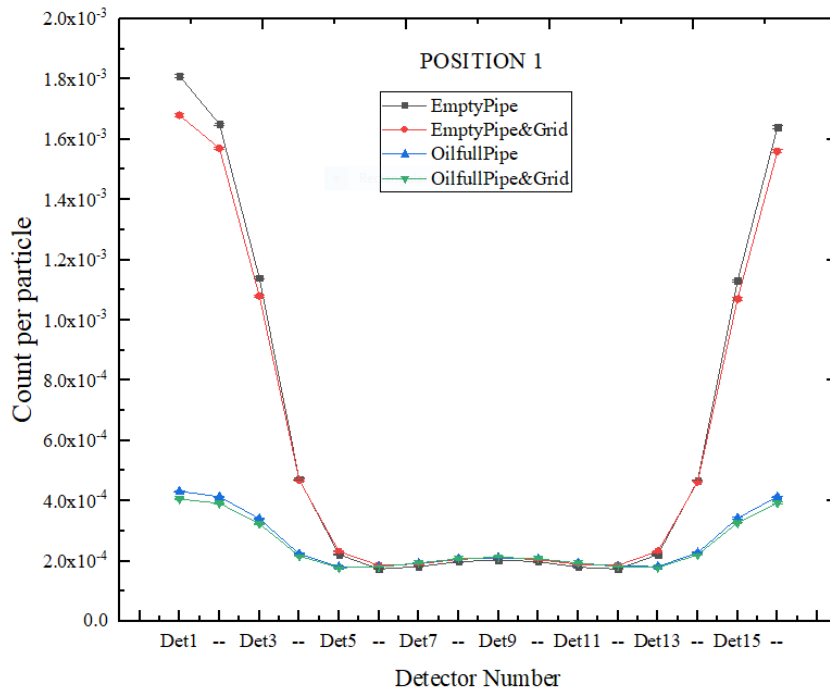


شکل ۹: تغییرات شمارش نرمالیزه برحسب چگالی آب-نمک برای وضعیت چشمه درون یکسوساز با گشودگی مدادی در دو حالت تجربی و شبیه‌سازی.

### ۳-۲ نتایج مدل سازی

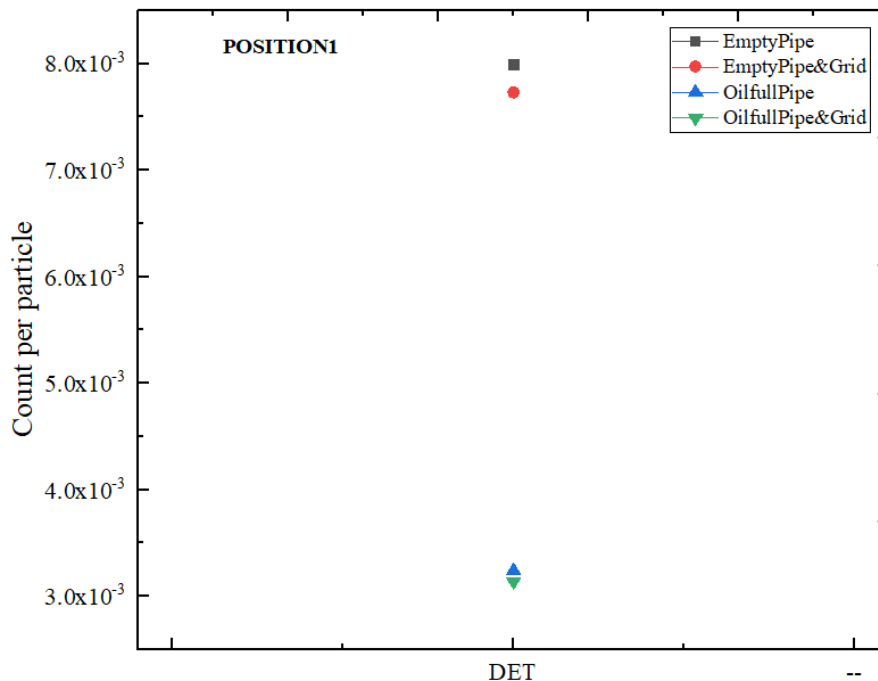
#### ۳-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی چیدمان نخست

نتایج مربوط به تغییرات شمارش آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان نخست در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تغییرات شمارش آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان نخست در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی.

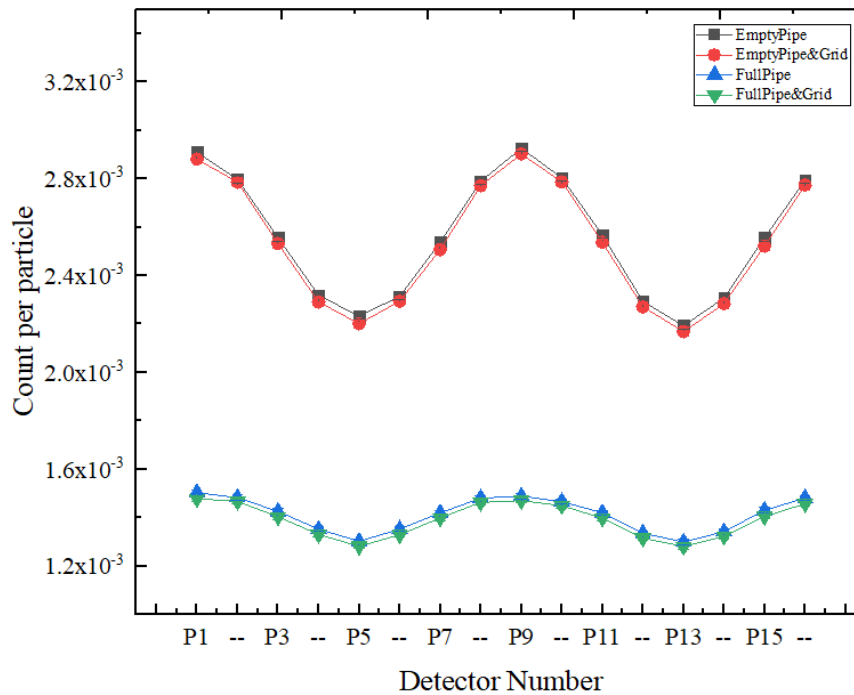
نتایج مربوط به تغییرات شمارش مجموع آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان نخست در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: تغییرات شمارش مجموع آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان نخست در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی.

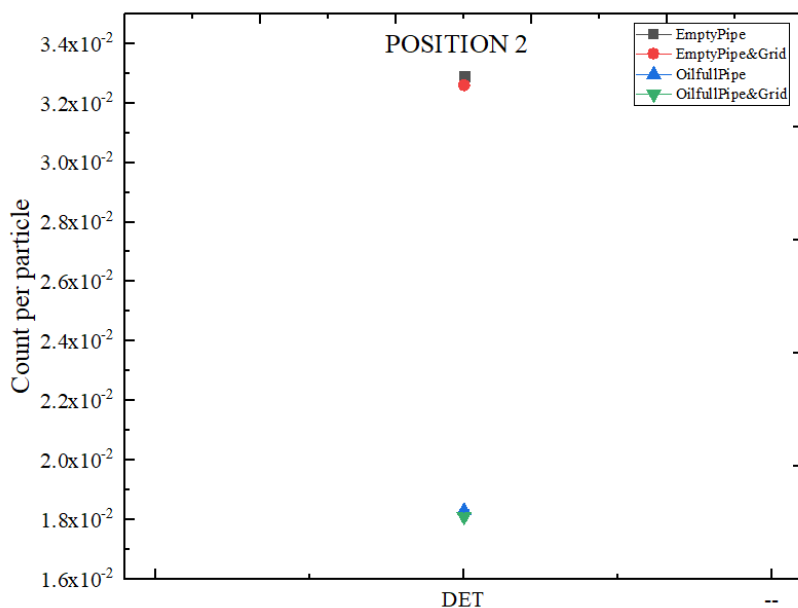
### ۳-۲-۲ نتایج شبیه‌سازی چیدمان دوم

نتایج مربوط به تغییرات شمارش آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان دوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: تغییرات شمارش آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان دوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی.

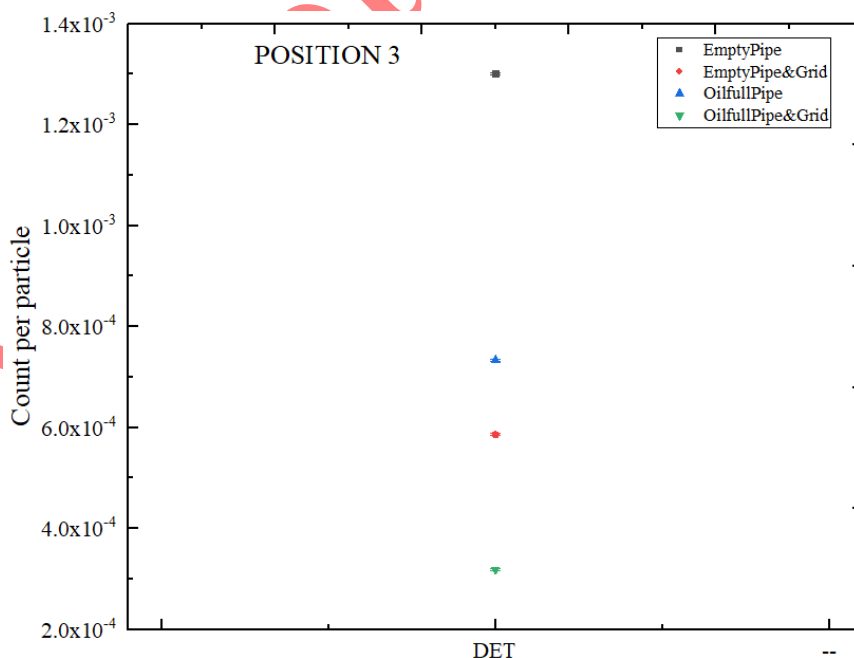
نتایج مربوط به تغییرات شمارش مجموع آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان دوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: تغییرات شمارش مجموع آشکارسازهای پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان دوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی.

### ۳-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی چیدمان سوم

نتایج مربوط به تغییرات شمارش آشکارساز پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان سوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: تغییرات شمارش آشکارساز پیرامون انشعاب فرعی در چیدمان سوم در حالات چهارگانه لوله پر از هوا-با شبکه فلزی، لوله پر از نفت-با شبکه فلزی، لوله پر از هوا-بدون شبکه فلزی، لوله پر از نفت-بدون شبکه فلزی.

#### ۴- نتیجه گیری

در ارتباط با اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو با نتایج داده‌گیری تجربی، مقایسه روند تغییرات شمارش نرمالیزه‌شده برحسب چگالی محلول آب-نمک از همخوانی مناسب بین داده تجربی و شبیه‌سازی حکایت می‌کند. این دستاورد به عنوان مبنایی برای تایید صحت شبیه‌سازی در ادامه در نظر گرفته شد.

آنچه معیار تشخیص حضور و یا عدم حضور صفحه مشبک فلزی در ابتدای انشعاب فرعی است در واقع توانایی تمییز شدت‌های شمارشی آشکارسازهای منفرد و یا مجموع برای حالت‌های دوگانه پرشدگی لوله توسط هوا و یا نفت است که هرچه اختلاف در شمارش به‌ازای حضور و عدم حضور صفحه فلزی بیشتر باشد، مشروط به اینکه مطابق با اصل تفکیک رایلی<sup>۲</sup> این اختلاف بزرگتر از نصف حاصل جمع انحراف معیار دو شمارش مورد نظر باشد، توان تمییز دو وضعیت حضور و یا عدم حضور صفحه بیشتر خواهد بود [۱۳].

آنچه از نمودارهای مربوط به چیدمان نخست مشخص می‌گردد آن است که آشکارسازهای واقع در صفحه تخت فرضی حاوی چشمه عمود بر محور انشعاب فرعی دارای بیشترین توان تفکیک حضور و عدم حضور صفحه مشبک فلزی هستند. البته این قابلیت در حالتی که لوله پر از نفت باشد به‌سبب تضعیف بیشتر پرتوها در محیط‌های چگال و کاهش شمارش ثبت‌شده توسط آشکارساز نسبت به حالت پر از هوا تقلیل می‌یابد. در مورد آشکارسازهای واقع در صفحه مذکور افزایش شمارش به‌سبب کاهش ضخامت فولادی لوله در مسیر پرتوهای عبوری اتفاق می‌افتد. در ادامه و با تجمیع شمارش آشکارسازهای پیرامونی حساسیت خوانش و در نتیجه توان تفکیک ارتقاء می‌یابد.

آنچه از نمودارهای مربوط به چیدمان دوم مشاهده می‌شود کاهش توان تفکیک حضور و عدم حضور صفحه مشبک فلزی در هر دو وضعیت پرشدگی لوله با هوا و نفت نسبت به چیدمان نخست است. این کاهش توان تفکیک در هر دو حالت بهره‌گیری از آشکارسازهای پیرامونی انشعاب فرعی به‌صورت منفرد و مجموع قابل مشاهده است. در این چیدمان برخلاف مورد نخست و به‌دلیل تقارن بین موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف، اختلاف توان تفکیک برای آشکارسازهای واقع در این موقعیت‌ها کمتر خواهد شد. در حالتی که لوله پر از نفت باشد نیز به‌مانند چیدمان نخست به‌سبب تضعیف بیشتر پرتوها در این محیط چگال، کاهش شمارش ثبت‌شده توسط آشکارساز نسبت به حالت پر از هوا و بالتبع کاهش توان تفکیک مورد انتظار است. در این چیدمان سه آشکارساز واقع در موقعیت‌های ۱، ۹ و ۱۶ دارای بیشترین مقدار خوانش و بالتبع بیشترین توان تفکیک هستند و دو آشکارساز واقع در موقعیت‌های ۵ و ۱۳ کمترین مقدار خوانش و بالتبع کمترین توان تفکیک را خواهند داشت. در ادامه و با تجمیع شمارش آشکارسازهای پیرامونی حساسیت خوانش و در نتیجه توان تفکیک ارتقاء خواهد یافت.

در مورد نمودارهای مربوط به چیدمان سوم آنچه از نمودار تغییرات شمارش مشخص می‌شود افزایش چشمگیر قابلیت تفکیک دو حالت با و بدون حضور شبکه فلزی در هر دو وضعیت پرشدگی لوله از هوا و نفت نسبت به چیدمان‌های اول و دوم است. در واقع با کاستن از مقدار ماده جاذب فلزی مربوط به خط لوله افقی جریان اصلی و بالتبع محتوای سیالاتی آن نه تنها بر حساسیت شمارشی آشکارساز روبرو افزوده شده است بلکه اختلاف زیادی در داده‌های شمارشی مربوط به حالات با و بدون حضور شبکه فلزی ایجاد گردیده است.

- [1] Barbosa, Caroline M., et al. "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.
- [2] Johansen, G. A., and P. Jackson. "Salinity independent measurement of gas volume fraction in oil/gas/water pipe flows." *Applied Radiation and Isotopes* 53.4-5 (2000): 595-601.
- [3] Holstad, Marie Bueie. *Gamma-ray scatter methods applied to industrial measurement systems*. No. NEI-NO--1551. Bergen Univ.(Norway). Dept. of Physics and Technology, 2004.
- [4] Sætre, C., G. A. Johansen, and S. A. Tjugum. "Salinity and flow regime independent multiphase flow measurements." *Flow Measurement and Instrumentation* 21.4 (2010): 454-461.
- [5] Salgado, César M., et al. "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.
- [6] Farid, Omar, et al. "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* 281 (2023): 119032.
- [7] Salgado, William L., et al. "Application of artificial intelligence in scale thickness prediction on offshore petroleum using a gamma-ray densitometer." *Radiation Physics and Chemistry* 168 (2020): 108549.
- [8] de Freitas Dam, Roos Sophia, et al. "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.
- [9] Swinehart, Donald F. "The beer-lambert law." *Journal of chemical education* 39, no. 7 (1962): 333.
- [10] Cember, Herman. "Introduction to health physics." (1969): xi+-422.
- [11] Sinha, Rajarishi, Christiaan JJ Paredis, Vei-Chung Liang, and Pradeep K. Khosla. "Modeling and simulation methods for design of engineering systems." *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 1, no. 1 (2001): 84-91.
- [12] Waters, Laurie S., et al. "The MCNPX Monte Carlo radiation transport code." *AIP conference Proceedings*. Vol. 896. No. 1. American Institute of Physics, 2007.
- [13] Temple, George. "The theory of Rayleigh's principle as applied to continuous systems." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 119.782 (1928): 276-293.