



Semnan University



## Research Article

# Optimum Geometric Position of Detectors Around Thick Hydrocarbon Pipes for Deposition Pattern Detection and Scale Thickness Measurement

Rasmieh Zeinavi Mianabi <sup>a</sup>, Ataollah Rabee <sup>b</sup>, Mohsen Sharifzadeh <sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> MSc, Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

<sup>c</sup> Assistant Professor, Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 09 June 2023

Revised: 10 December 2023

Accepted: 23 December 2023

### Keywords:

Scale deposition pattern, Transmission gamma, Technique, Scale thickness, Measurement, Fan-shaped arrangement, Stepped arrangement, Propagation error.

## ABSTRACT

Ensuring flow with the increasing need to extract oil and gas from reservoirs is known as a big challenge, and in the meantime, scale deposition in pipelines is a major problem. Since scale deposition occurs in a short time, it is especially important to control and predict it in pipelines as soon as possible. There are several methods for predicting the deposition pattern and measuring its thickness. The gamma transmission method is a non-destructive method for this task. The application of this technique requires optimal placement of the detectors and radioactive source around the pipe so that the measurement can be made with maximum accuracy in a short time. The cost, the ability to deploy the instrument at various positions on the platform and underwater, and minimization of absorbed dose to the operator are other important goals that should be considered. In this study, using the geometric analysis and Monte Carlo simulation, it is shown that the fan-shaped arrangement of the detectors with certain spacing around the pipe can lead to an optimal measurement of the deposition regime and the scale thickness.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30736.2466>

© 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: [mssharifzadeh@aeoi.org.ir](mailto:mssharifzadeh@aeoi.org.ir)

## How to cite this article:

Zeinavi Mianabi, R., Rabee, A., & Sharifzadeh, M. (2024). Optimum geometric position of detectors around thick hydrocarbon pipes for deposition pattern detection and scale thickness measurement. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77), 69-78. doi: 10.22075/jme.2023.30736.2466

# مکان یابی بهینه هندسی آشکارسازها در اطراف لوله های قطور هیدروکربنی برای تشخیص الگوی انباشت و اندازه گیری ضخامت رسوب با استفاده از روش گامای عبوری

رسمیه زینوی میان آبی<sup>۱</sup>، عطاءالله ربیعی<sup>۲</sup> و محسن شریفزاده<sup>۳\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۹	تضمین جریان همزمان با نیاز روزافزون به برداشت نفت و گاز از مخازن، یکی از چالش های بزرگ است و در این بین انباشت رسوب درون خطوط لوله به-عنوان مشکلی بزرگ وجود دارد. از آنجایی که تجمع این رسوبات در مدت زمانی کوتاه صورت می گیرد نیاز به کنترل و پیش بینی آن درون خطوط لوله در کمترین زمان ممکن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای پیش بینی الگوی انباشت رسوب و اندازه گیری ضخامت آن از روش های مختلفی استفاده می شود که روش گامای عبوری یک روش غیرمخرب برای این کار است. رویکرد لازم در بکارگیری این روش، چینش بهینه آشکارساز و چشمه حول لوله است به گونه ای که در مدت زمانی کوتاه با بیشینه دقت ممکن بتوان فرایند اندازه گیری را انجام داد. ملاحظات هزینه ای، قابلیت بکارگیری سنجشگر در موقعیت های مختلف روی سکو و زیر دریا، و کاهش دز جذبی اپراتور به زیر آستانه از دیگر پارامترهای مهم است که به واسطه چینش بهینه چشمه-آشکارساز پیرامون لوله قابل دستیابی است. در این مطالعه با استفاده از ابزار تحلیل هندسی و شبیه سازی مونت کارلو نشان داده شد که بادبزی از آشکارسازها با فاصله مشخص حول لوله می تواند منجر به اندازه گیری مطلوب رژیم انباشت و ضخامت رسوب گردد.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
الگوی انباشت رسوب، روش گامای عبوری، اندازه گیری ضخامت رسوب، چینش بادبزی، چینش پله ای، خطای انتشار.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30736.2466>

© 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/>)

تولید، خاموشی اضطراری، افزایش هزینه تعمیر، تعویض یا رها کردن خطوط و کاهش بازده تولید می شوند [۱]. برای جلوگیری از کاهش بازده تولید نیاز به پاک سازی رسوب به صورت هفتگی است [۲]. براساس بررسی هایی صورت گرفته توسط سازمان انرژی اتمی امریکا رفع مشکلات ناشی از رسوب مواد آلی در عمق ۴۰۰ متری زیر دریا هزینه ای برابر ۱ میلیون دلار در هر مایل در بر خواهد داشت [۳]. شرکت نفت لاسمو<sup>۲</sup> انگلستان مجبور گردید پس از صرف هزینه بیش از ۱۰۰ میلیون دلار، یکی از سکوهای نفتی خود را به

## ۱-مقدمه<sup>۱</sup>

تشکیل رسوبات درون خطوط لوله جریان هیدروکربن همواره به عنوان یکی از مشکلات رایج مطرح در صنعت نفت/گاز است. این رسوبات جامد/معلق در سیال با حرکت درون لوله می توانند ته نشین و به سطح درونی لوله بچسبند. چنانچه کنترل مناسبی بر آنها صورت نگیرد رسوبات با گذشت زمان به طور چشمگیری افزایش می یابد و با چسبیدن به پمپها، خطوط لوله، مخازن و سایر تجهیزات استخراج و حمل و نقل نفت/گاز باعث خرابی تجهیزات

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [mssharifzadeh@acoil.org.ir](mailto:mssharifzadeh@acoil.org.ir)

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران،

ایران

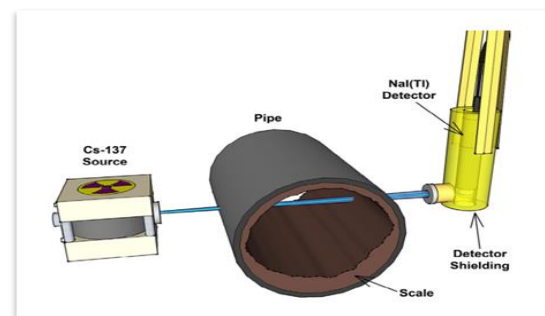
استناد به این مقاله:

زینوی میان آبی، رسمیه، ربیعی، عطاءالله، و شریف زاده، محسن. (۱۴۰۳). مکانیابی بهینه هندسی آشکارسازها در اطراف لوله های قطور هیدروکربنی برای تشخیص الگوی انباشت و اندازه گیری ضخامت رسوب با استفاده از روش گامای عبوری. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۷)، ۶۹-۷۸. doi: 10.22075/jme.2023.30736.2466

<sup>2</sup> Lasmo

بیورنستاد و همکاران در سال ۲۰۰۶ با طراحی یک مدل آزمایشگاهی، امکان استفاده از روش گامای عبوری جهت اندازه‌گیری ضخامت رسوب کلسیم‌کربنات در لوله‌های آلومینیومی با قطر کم را تحقیق کردند و در این کار، از چشمه  $Ba^{133}$  و یک آشکارساز جهت اسکن لوله استفاده شد که امکان اندازه‌گیری ضخامت رسوب در حد ۳۰ میکرومتر را تأیید می‌کرد [۷]. سانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ یک نرم‌افزار طراحی کردند که با کمک روش گامای عبوری، ضخامت رسوب قیرمانده ته‌نشین شده در خطوط لوله‌های تولید فولاد را اندازه بگیرند. برای اینکار از سیستم متشکل از چشمه  $Cs^{137}$  و یک آشکارساز که به دو صورت یکی متحرک برای اسکن کل سطح مقطع لوله‌های بزرگ و دیگری ثابت فقط تغییرات شدت گاما-های عبوری از ناحیه مرکزی لوله‌های با قطر کوچک را ثبت می‌کند استفاده کردند. آن‌ها توانسته‌اند نرخ انباشتگی رسوب را در لوله‌ها با اندازه مختلف را با دقت بالای ۹۰٪ اندازه بگیرند [۸]. هارارا در سال ۲۰۰۸ امکان استفاده از پرتونگاری مماسی جهت اندازه‌گیری ضخامت رسوب با چگالی کم و متوسط برای لوله‌هایی با ضخامت مختلف بررسی کرد. در این کار از چشمه‌های  $Ir^{192}$  و  $Co^{60}$  و فیلم با سرعت متوسط استفاده کرد [۹]. کندیس و همکاران در سال ۲۰۱۴ از روش پرتونگاری محاسباتی برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب تشکیل شده داخل لوله استفاده کردند و همچنین با استفاده از روش SRμXRF ترکیبات رسوب را بدست آوردند [۱۰]. اولیویرا و همکاران در سال ۲۰۱۵ امکان استفاده از گامای عبوری برای رسوب‌سنجی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روش برای تشخیص و تخمین ضخامت رسوب در داخل لوله کارآمد و به ویژه از نظر حفاظت پرتویی نسبت به دیگر روش‌ها سودمند است [۶]. تکشیرا و همکاران در سال ۲۰۱۷ روش گامای عبوری را برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب باریم سولفات با ضخامت از محدوده ۵ تا ۸۰ میلی‌متر استفاده کردند. الگوی رسوب حلقوی و رژیم تک فاز نفت در لوله را با کمک MCNPX شبیه‌سازی کردند. چشمه و آشکارساز به صورت مدادی، و با گام ثابت سطح مقطع لوله را اسکن کردند و توانستند ضخامت رسوب را با خطای نسبی ۱/۴۴٪ اندازه بگیرند [۱۱]. تکشیرا و همکاران بار دیگر در

دلیل مشکلات ناشی از تشکیل پرتکرار رسوب پارافین رها کند و یا اینکه در یکی از چاه‌های دریای شمال در میدان میلر به دلیل ایجاد انسداد در لوله‌های انتقال که فقط در عرض بازه زمانی ۲۴ ساعت، رخ داده بود منجر به کاهش تولید نفت خام از ۳۰ هزار بشکه به صفر شد و همچنین طبق گزارش‌های ارائه شده از میدان اسکات<sup>۳</sup>، شاخص بهره‌دهی<sup>۴</sup> چاه طی ۱۱ ماه از مقدار ۱۸ b/d/psi به ۲ b/d/psi کاهش یافته است [۴]. مشکلات ناشی از رسوبات به حدی شدید است که برای مدیریت موثر آن در سیستم حمل و نقل نفت/گاز نیازمند به کنترل و پیش‌بینی ضخامت رسوب و مدل‌سازی برای به حداقل رساندن تعمیرات و هزینه‌ها بدون نیاز به خاموشی تاسیسات است. از آنجا که تجمع رسوب بسیار سریع صورت می‌گیرد تشخیص زود هنگام تشکیل رسوب باعث می‌شود که در زمان مناسب از افزودنی‌های شیمیایی<sup>۵</sup> جهت کاهش سرعت رسوب‌گیری یا جلوگیری از آن استفاده شود و همچنین با اندازه‌گیری ضخامت رسوب، میزان تزریق این افزودنی‌های شیمیایی جهت حذف رسوب معین می‌گردد. در این راستا، مطالعات زیادی برای تعیین ضخامت رسوب و پیش‌بینی آن از جمله روش فراصوتی<sup>۶</sup>، استفاده از حسگرهای<sup>۷</sup> روش‌های الکتروشیمیایی، پرتونگاری<sup>۸</sup>، مقطع‌نگاری<sup>۹</sup> و نیز روش‌های رادیوایزوتوپی صورت گرفته است [۵]. روش گامای عبوری به دلیل استفاده از چشمه رادیواکتیو قابلیت استفاده برای لوله‌های عایق بندی شده را دارد و از دقتی بالا در تشخیص نوع و رژیم انباشت و نیز اندازه‌گیری برخط ضخامت رسوب برخوردار است و از این رو به‌عنوان روشی غیرمخرب در فرایند رسوب‌سنجی همواره مطرح بوده است. در این روش از گامای عبوری تک انرژی، دوانرژی، و سه انرژی و یا پراکندگی گاما استفاده می‌شود.



شکل ۱- روش گامای عبوری [۶]

<sup>6</sup> Sensor

<sup>7</sup> Radiography

<sup>8</sup> Tomography

<sup>3</sup> Scott field

<sup>4</sup> Productivity Index

<sup>5</sup> Chemical inhibitors

تشخیص مدل رسوب‌گذاری را نیز برای اپراتور در اتاق کنترل فراهم کند.

## ۲- روش انجام تحقیق

قبل از انتخاب چینش مناسب آشکارسازها چند نکته مهم برای رسیدن به چینش نهایی و بهینه مورد لحاظ قرار گرفت:

- انتخاب ناحیه خاص که در آن ناحیه تضعیف ناشی از الگوهای مختلف انباشت رسوب با هم دیگر متفاوت بوده و بتوان از این ویژگی برای تشخیص نوع الگو استفاده کرد.
- تعریف مقدار خاصی از ضخامت رسوب به عنوان ضخامت بیشینه که مقرر است چینش آشکارسازها حول لوله برای سیستم اندازه‌گیری پیشنهادی به‌ازای مقادیر ضخامت رسوب کوچکتر از این مقدار بهینه‌سازی شود.
- بهره‌گیری از فرض عمدتاً صحیح تقارن زاویه‌ای در الگوی انباشت رسوب درون لوله که امکان بازسازی پروفایل رسوب‌گذاری را در یک سمت با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری ناشی از آشکارسازهای سمت مقابل فراهم خواهد کرد.

- بهره‌گیری از امکان چرخش ۹۰ درجه مجموعه چشمه و آشکارسازها حول لوله برای اسکن کل رسوب به دلیل تقارن الگوهای مختلف انباشت فراهم است.

در این مطالعه، دو چینش پله‌ای و بادبزی برای قرارگیری آشکارسازها حول لوله در نظر گرفته شد و با مقایسه نتایج تحلیل هندسی و نیز محاسباتی بهترین چینش پیشنهاد گردید.

## ۲-۱- چینش پله‌ای آشکارسازها

آنچه به‌عنوان زیربنای محاسبه تضعیف نسبی پرتو گامای عبوری از لوله مورد استفاده قرار گرفت قانون بیر-لمبرت است [۱۷]:

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

$\mu$  و  $x$  به ترتیب ضخامت و ضریب تضعیف خطی جاذب هستند که منجر به کاهش شدت از مقدار اولیه  $I_0$  بدون حضور جاذب به مقدار ثانویه  $I$  پس از قرارگیری جاذب در مسیر پرتوهای عبوری می‌شود. فرض اساسی در شروع روند محاسبات، این است که دستیابی به تفکیک‌پذیری بیشتر به‌ازای دو وضعیت حضور و عدم حضور رسوب در مسیر پرتو عبوری در شرایطی ممکن است که اختلاف شمارش

سال ۲۰۱۸ از روش گامای عبوری به همراه شبکه عصبی مصنوعی برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب باریم-سولفات استفاده کردند. آن‌ها هندسه‌ای مانند کار قبلی طراحی و ضخامت رسوب از ۰ تا ۷ سانتی‌متر با گام ۰/۵ سانتی‌متر و لوله با قطر داخلی مختلف از ۱۵ تا ۲۷ سانتی‌متر با گام ۴ سانتی‌متر را با کمک کد MCNPX شبیه‌سازی و نتایج را برای آموزش شبکه عصبی استفاده کردند و توانستند ضخامت را با خطای کمتر از ۱/۴۴٪ اندازه بگیرند [۱۲].

چنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ روش گامای عبوری را برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب واکس در سطح آزمایشگاه بررسی کردند و کار خود را با کد MCNP<sup>9</sup> شبیه‌سازی و ضخامت رسوب را با خطای نسبی ۸٪ اندازه گرفتند [۱۳].

عسکری و همکارانش در سال ۲۰۱۹ یک مدل مقطع‌نگاری جدید مبتنی بر آشکارساز CsI(Na) و چشمه Cs<sup>137</sup> برای اندازه‌گیری ضخامت واکس پیشنهاد دادند. آن‌ها در محیط آزمایشگاه از لوله‌های پلی‌اتیلن با ضخامت مختلف استفاده و پس از اسکن نمونه، تصویر سطح مقطعی بدست آمده را با کمک الگوریتم MLEM بازسازی کردند. آن‌ها توانستند ضخامت رسوب را با میانگین خطای ۶/۲٪ تخمین بزنند [۱۴].

سالگالو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ از شبیه‌سازی MCNP6 و شبکه عصبی مصنوعی و روش گامای عبوری برای اندازه‌گیری ضخامت رسوب باریم-سولفات در لوله فولادی استفاده کرده‌اند. آن‌ها توانستند ضخامت رسوب حلقوی را با خطای ۵٪ اندازه بگیرند و از شبکه فقط برای پیش‌بینی وجود و عدم وجود رسوب استفاده کردند [۱۵].

تکشیرا و همکاران در سال ۲۰۲۰ با کمک روش گامای عبوری و شبکه عصبی مصنوعی ضخامت رسوب باریم-سولفات با الگوی خارج از مرکز را مورد بررسی قرار دادند. سیستم طراحی آن متشکل از یک چشمه Cs<sup>137</sup> و ۳ آشکارساز در موقعیت ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به مرکز لوله، در اطراف آن چیده شده‌اند است [۱۶].

پس از مکان‌یابی مناسب آشکارسازهای پرتو حول لوله این امکان فراهم خواهد بود که در ادامه تحقیقات برخلاف رویه مرسوم اندازه‌گیری ضخامت در یک راستای منفرد داده مربوط به خوانش پرتو عبوری از وترهای مختلف لوله به‌عنوان ورودی یک شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد. متعاقباً شبکه آموزش‌داده شده مذکور قادر است علاوه بر اندازه‌گیری ضخامت رسوب در جهات مختلف امکان

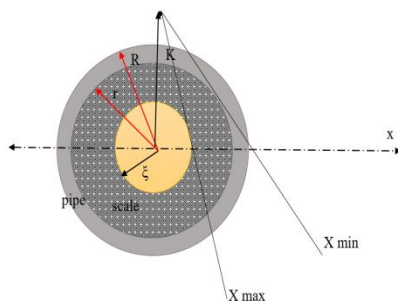
<sup>9</sup> Monte Carlo N-Particle

در مورد جمله نخست بایستی اختلاف شمارش  $I_2$  و  $I_1$  کمینه شود و در مورد جمله دوم به‌ازای شرایطی که مقادیر شمارشی فوق نزدیک به یکدیگر باشند این هدف با کمینه-سازی معادله زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_f^2(\min) = \frac{2}{x^2 I} \quad (6)$$

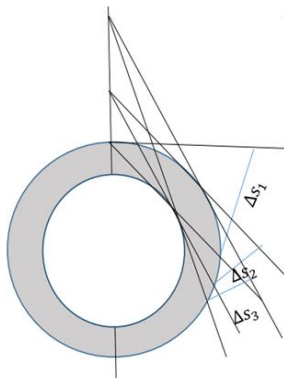
به عبارت دیگر، کاهش سهم جمله دوم در انتشار خطا با مقادیر هرچه بزرگتر  $x$  و  $I$  حاصل می‌شود.

با توجه به شرایط فوق و خطوط ترسیمی در شکل (۲) بیشترین مسافتی که باریکه مدادی از داخل رسوب حلقوی با ضخامت  $t$  طی می‌کند برای باریکه مماس بر شعاع داخلی رسوب و کمترین مسافت برای باریکه مماس بر شعاع خارجی رسوب اتفاق می‌افتد. بنابراین توزیع مناسب آشکارساز در چینش پله‌ای در حد فاصل این دو مماس و هرچه نزدیکتر به مماس داخلی خواهد بود.



شکل ۲- بازه چینش آشکارسازها.

این بازه چینش آشکارسازها را می‌توان با جابجایی چشمه در راستای محور  $y$  کم و زیاد کرد.



شکل ۳- تغییر بازه چینش آشکارسازها با جابجایی مکان چشمه.

و همچنین، با توجه به نکاتی که در ابتدا گفته شده است می‌توان با یک چرخش ۹۰ درجه‌ای کل رسوب را به دلیل تقارن اسکن کرد.

آشکارساز متناظر با هر کدام از این دو وضعیت بیشینه باشد. براساس رابطه ۱ ضریب تضعیف خطی جاذب به این صورت محاسبه می‌گردد:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

اختلاف ضرایب تضعیف خطی در شرایطی که صرفاً ضخامت فولادی لوله در مسیر پرتوهای عبوری قرار دارد با وضعیتی که علاوه بر این ضخامت، رسوب چسبیده به جداره داخلی لوله نیز منجر به تضعیف بیشتر پرتوهای عبوری می‌شود با معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$f = \Delta\mu = \frac{1}{x} \left( \ln \frac{I_0}{I_2} - \ln \frac{I_0}{I_1} \right) = \frac{1}{x} \ln \frac{I_1}{I_2} \quad (3)$$

$I_2$  و  $I_1$  به ترتیب شدت پرتو عبوری در محیط بدون حضور رسوب و با حضور رسوب و  $x$  نیز ضخامت میانگین این جاذب‌ها در مسیر پرتو است. با توجه به اینکه  $\mu$  یک ویژگی ذاتی جاذب است بنابراین در شرایطی که بتوان اختلاف در مقادیر اندازه‌گیری شده ضرایب تضعیف خطی را با دقت بالاتری ثبت کرد متعاقباً فرایند رسوب‌سنجی دقیق تری متصور خواهد بود.

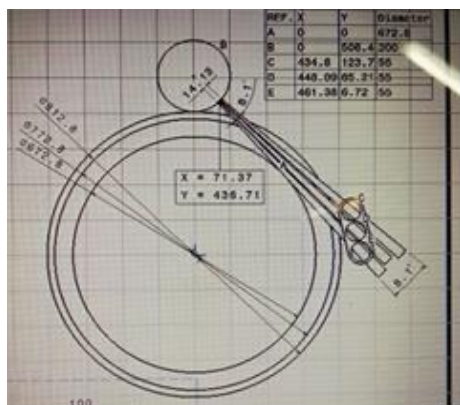
مطابق با معادله پخش خطا معادله زیر برقرار است:

$$\sigma_f^2 = \left( -\frac{1}{x^2} \ln \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( -\frac{1}{x I_1} \right)^2 \sigma_{I_1}^2 + \left( \frac{1}{x I_2} \right)^2 \sigma_{I_2}^2 \quad (4)$$

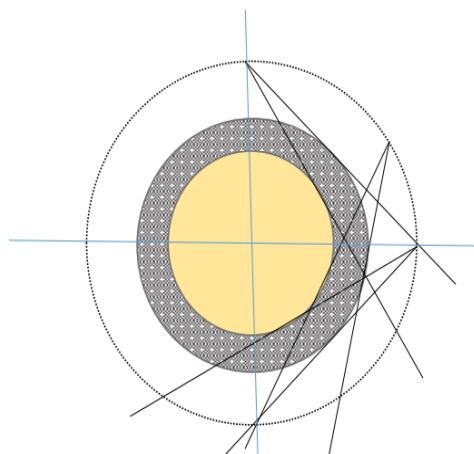
از آنجا که مقادیر شمارشی  $I_2$  و  $I_1$  از توزیعی گاوسین تبعیت می‌کنند لذا مقادیر واریانس این توابع برابرند با  $\sigma_I^2 = I$ . با توجه به اینکه مقدار واریانس  $x$  ثابت و برابر دقت اندازه‌گیری این ضخامت است پس معادله ۴ به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\sigma_f^2 = \left( -\frac{1}{x^2} \ln \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( -\frac{1}{x I_1} \right)^2 I_1 + \left( \frac{1}{x I_2} \right)^2 I_2 = \left( -\frac{1}{x^2} \ln \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \sigma_x^2 + \frac{1}{x^2} \left( \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} \right) \quad (5)$$

برای دستیابی به کمینه واریانس بایستی دو جمله سمت راست معادله ۵ را هر چه بیشتر به مقدار صفر نزدیک کرد.

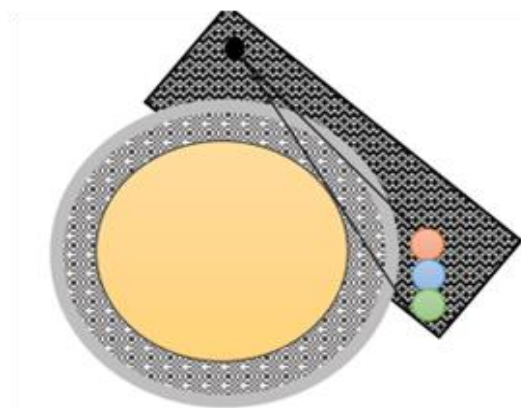


شکل ۶-چیدمان پلکانی آشکارسازها.



شکل ۴- اسکن کل لوله در چرخشی ۹۰ درجه با بهره‌گیری از نقارن در الگوی انباشت رسوب.

بعد از بدست آوردن زاویه مناسب چینش آشکارسازها، نیاز است مکان دقیق آشکارسازها را با در نظر گرفتن شدت باریکه فوتونی بدست آورد. با توجه به معادله ۶ هر چقدر شدت تابش بیشتر باشد خطای اندازه‌گیری ضخامت کاهش می‌یابد. برای این کار می‌توان یا از چشمه با اکتیویته زیاد استفاده کرد یا آشکارسازها به اندازه کافی به چشمه نزدیک باشند.



شکل ۷- حفاظ سازی.

در پایان و با رسیدن به طراحی نهایی چشمه و آشکارسازها برای چینش پلکانی مورد اشاره معایب اساسی زیر قابل برداشت خواهد بود:

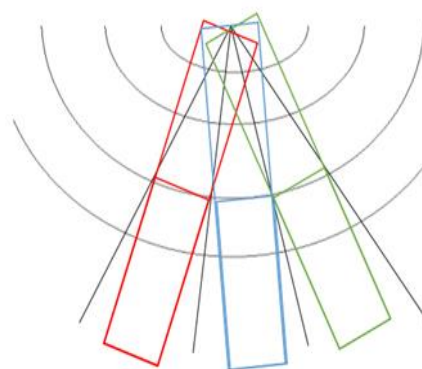
۱- با نزدیک کردن آشکارسازها به لوله جهت افزایش شدت فوتونها، اطلاعات مفید به‌واسطه کاهش حجم در معرض پرتوهای عبوری هر کدام از سوسوزنها از دست خواهند رفت و از بازده هندسی آشکارساز بصورت تأثیرگذاری کاسته می‌شود.

۲- در این چینش تشخیص نوع، ضخامت و الگوی انباشت رسوب با توجه به ساختار مکانیکی حفاظ چشمه و آشکارسازها سخت است.

۳- به‌منظور تشخیص الگوی انباشت رسوب در این چینش نیاز به اسکن لوله وجود دارد که به دلیل داده‌گیری و چرخش توأمان ساختار مکانیکی موجود زمان زیادی صرف خواهد شد.

## ۲-۲- چینش بادبزی آشکارسازها

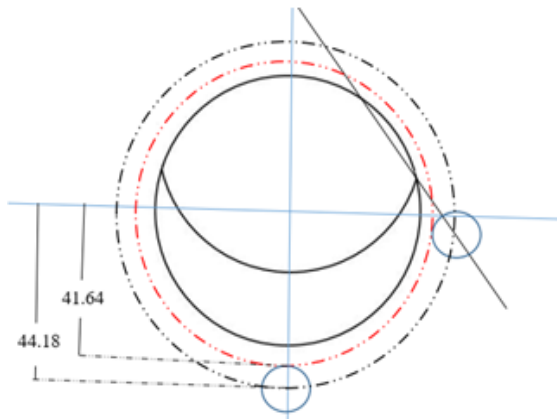
در این چینش، آشکارسازها در اطراف لوله با یک فاصله



شکل ۵- مکان هندسی آشکارسازها.

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود آشکارسازها را نمی‌توان همزمان به چشمه نزدیک کرد زیرا این کار باعث می‌شود سهمی از اطلاعات مربوط به باریکه تضعیف‌شده در امتداد هر کدام از آشکارسازها توسط آشکارسازهای مجاور خوانش شود یا با تضعیف توسط ماده سوسوزن آشکارساز مجاور از دست برود. بنابراین و به‌منظور جلوگیری از افزایش خطا نیاز است که آشکارسازها به صورت پلکانی چیده شوند. با کمک گرفتن از محیط نرم افزار طراحی جامداتی CATIA مناسب‌ترین چینش پلکانی برای ۳ آشکارساز نمونه به صورت زیر بدست آمد [۱۸].

با شعاعی برابر با شعاع داخلی لوله ولی غیرهم‌مرکز با آن استفاده شده است که از تقاطع آن با سطح داخلی لوله موقعیت زاویه‌ای آشکارساز دوم بدست می‌آید. راهکار مورد استفاده در طراحی الگوی انباشت حلقوی تعریف استوانه‌هم‌مرکز با لوله و با شعاع کوچکتر است به گونه‌ای که اختلاف این دو مقدار برابر با ضخامت رسوب شود. چنانچه استوانه فوق در امتداد خط واصل چشمه و آشکارساز نخست جایجا شود قادر خواهد بود که رژیم انباشت تخم‌مرغی را تولید کند. در انتها و برای تعریف رژیم انباشت بصورت طبقه‌بندی کافیسیت از صفحه تخت و البته عمود بر خط واصل چشمه و آشکارساز نخست و با فاصله برابر با مقدار بیشینه ضخامت رسوب از کف لوله استفاده گردد.

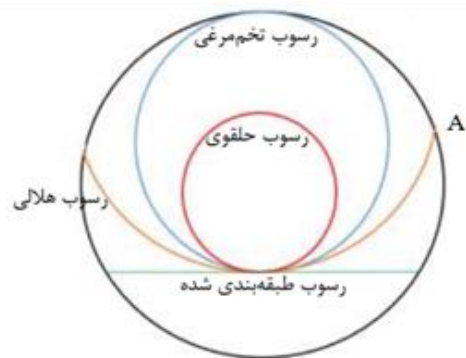


شکل ۹- بازه چینش آشکارسازها.

آشکارساز سوم نیز در فضایی بین دو آشکارساز اول و دوم قرار داده می‌شود. اساساً و در شرایطی که با استفاده از آشکارسازهای اول و دوم ۲ مجموعه الگوی انباشت هلالی-طبقه‌بندی و حلقوی-تخم‌مرغی از هم تمییز داده می‌شوند، بکارگیری آشکارساز سوم (میانی) برای تفکیک هر کدام از مجموعه‌های دوگانه فوق ضروری است. در واقع به سبب اختلاف آهنگ تغییر ضخامت رسوب در حدفاصل آشکارسازی اول و دوم به‌ازای هر کدام از رژیم‌های هلالی و طبقه‌بندی و یا حلقوی و تخم‌مرغی، امکان تمییز این رژیم‌های دوگانه نیز در ادامه وجود خواهد داشت.

در تعیین زاویه بهینه برای قرارگیری آشکارساز میانی می‌توان از کدهای محاسباتی مونت‌کارلو نظیر آنچه توسط شریف‌زاده و همکاران ارائه شده است استفاده کرد [۱۹]. در این کد که در محیط نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است ترابرد پرتوهای گاما در محدوده انرژی یک کیلو الکترون‌ولت تا ده مگا الکترون‌ولت قابل انجام است. سعی گردیده تا در الگوریتم‌های مورد استفاده تا حد امکان از به‌کارگیری

مشخص از سطح آن نسبت به چشمه به صورت بادبزنی چیده می‌شوند. برای این چینش نیاز به انتخاب بهترین مکان برای آشکارسازها وجود دارد. راهکار قابل ارائه در رسیدن به این هدف با استفاده از ۳ آشکارساز، بکارگیری یکی از آنها جهت اندازه‌گیری ضخامت بیشینه رسوب، دیگری برای تشخیص الگوی انباشت رسوب و سومی برای تعیین نوع رسوب است. آشکارساز نخست در امتداد قطر لوله (کف لوله به‌ازای جهت‌گیری افقی لوله و روبروی چشمه به‌ازای جهت‌گیری عمودی آن) قرار داده شد. در این امتداد می‌توان بیشینه ضخامت رسوب به‌عنوان یک پارامتر با اهمیت را اندازه‌گیری کرد. موقعیت آشکارساز دوم جهت تشخیص الگوی انباشت رسوب در کمترین زاویه نسبت به چشمه و پیرامون لوله به‌گونه‌ای تنظیم شد که بتواند بین الگوهای انباشت چهارگانه مورد نظر حلقوی، تخم‌مرغی، هلالی و طبقه‌بندی تمییز ایجاد کرد. با توجه به شکل (۸)، در نقطه فرضی A این توانایی وجود دارد. در سیستم ارائه شده و با این فرض که اندازه‌گیری رسوب تا یک مقدار بیشینه انتظاری مورد نظر باشد، مکان فوق جایی است که گوشه‌های لایه رسوبی در الگوی انباشت هلالی قرار دارند. ویژگی بارز این نقطه برای تعبیه آشکارساز دوم آن است که مقدار شمارشی گامای عبوری از لوله به‌ازای دو رژیم هلالی و طبقه‌بندی برابر با مقادیر مربوط به حالت کالیبراسیون اولیه و با حضور لوله کاملاً تمییز و خالی از رسوب است در حالیکه به‌ازای دو رژیم دیگر حلقوی و تخم‌مرغی همواره مقادیر شمارشی کمتر ناشی از تضعیف سهمی از پرتوهای عبوری توسط رسوبات واقع در بالای این نقطه می‌باشد.



شکل ۸- الگوی مختلف انباشت رسوب.

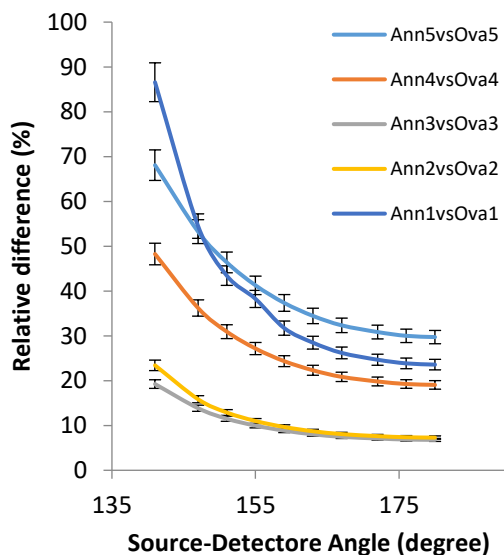
محاسبات لازم جهت تعریف مجموعه‌ای از سطوح هندسی که قادر به تولید ۴ رژیم انباشت مورد نظر است به‌ازای ضخامت بیشینه رسوب ۵ سانتی‌متر در شکل (۹) قابل مشاهده است. در طراحی الگوی انباشت هلالی از استوانه‌ای

۱- ثابت کردن آشکارسازها در موقعیت بهینه و چرخش یکسوساز حاوی چشمه پرتوزا به گونه‌ای که هر بار امکان همراستا شدن باریکه گسیلی با یکی از آشکارسازهای سه گانه مورد نظر به منظور انجام فرایند داده‌گیری فراهم شود.

۲- طراحی یکسوسازی با سه باریکه گسیلی همزمان به گونه‌ای که بدون نیاز به چرخش آن بتواند داده مربوط به هر ۳ آشکارساز را بصورت همزمان و بدون نیاز به صرف زمان مورد نیاز در روش اول فراهم کند.

### ۲-۲-۱- چینش بهینه آشکارساز میانی

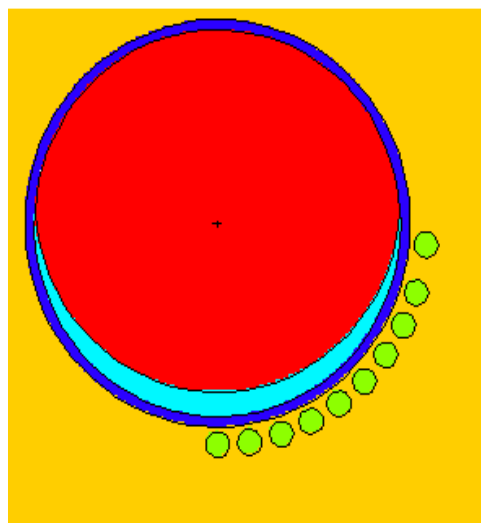
برای رسیدن به چینش زاویه‌ای بهینه آشکارساز میانی با استفاده از کد مونت کارلو به‌ازای دو نوع رسوب آلی (پارافین) و معدنی (کربنات کلسیم) نرخ شمارش گامای ناشی از چشمه سزیوم-۱۳۷ توسط سوسوزن یدور سدیم ۲ اینچ واقع در زوایای مختلف مطابق با شکل (۱۰) محاسبه و ثبت گردید. در این شبیه‌سازی‌ها براساس ضخامت بیشینه رسوب در کف لوله مدل‌های مختلف انباشت رسوب با رژیم‌های چهارگانه حلقوی، تخم‌مرغی، هلالی و طبقه‌بندی شده ایجاد و به‌منظور محاسبه بیشینه تفکیک‌پذیری بین رژیم‌های دوگانه حلقوی تخم‌مرغی و هلالی طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در اشکال (۱۱) و (۱۲) ذکر گردید.



شکل ۱۱- تغییرات زاویه‌ای درصد اختلاف نسبی شمارش رژیم‌های حلقوی تخم‌مرغی به‌ازای مقادیر بیشینه رسوب یکسان ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتیمتر در کف لوله

همان‌گونه که از نمودار فوق مشاهده می‌شود با افزایش زاویه

فرمولاسیون مشخص جهت محاسبه سطوح مقطع برهم‌کنش اجتناب و این پارامترهای مهم در شبیه‌سازی با استفاده از درون‌یابی داده استخراجی از کتابخانه ENDF/B-VII به‌دست آورده و برای محاسبه توابع توزیع احتمال و توابع توزیع تجمعی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تولید اعداد تصادفی در بازه صفر تا یک نیز از تابع rand در محیط MATLAB استفاده گردید. محاسبات در این محیط‌های نرم‌افزاری براساس تراپرد پرتوهای گاما در ماده و با استفاده از روش‌های تصادفی صورت خواهد گرفت که در نهایت مقدار شمارشی این آشکارساز در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف را بدست می‌آورد. بدین‌منظور از خروجی شمارش به‌ازای تک فوتون گسیلی از چشمه برای ارائه نتایج و بازای ۱۰۸ فوتون تولیدی با مکانیزم تولیدی اعداد تصادفی در محیط MATLAB استفاده شد. موقعیت زاویه‌ای بهینه جایی است که بیشترین تفکیک بین مقادیر شمارشی ناشی از رژیم‌های دوگانه هلالی طبقه‌بندی و یا حلقوی تخم‌مرغی را فراهم کند.



شکل ۱۰- مکان‌های چینش آشکارساز اول (پایین)، دوم (بالا) و سوم (همه موقعیت‌های زاویه‌ای میانی قابل استفاده).

با رسیدن به طراحی نهایی چشمه و آشکارسازها برای چینش بادبزی معایب اساسی مربوط به چینش پلکانی به‌طور قابل قبولی قابل رفع است. به عبارت دیگر، در شرایطی که از چینش بادبزی استفاده شود طی یک اندازه‌گیری و بدون نیاز به اسکن لوله و جابجایی مدام چشمه و آشکارسازها رژیم انباشت و ضخامت بیشینه رسوب قابل محاسبه و گزارش است. برای انجام این کار از یکی از دو روش زیر استفاده خواهد شد:



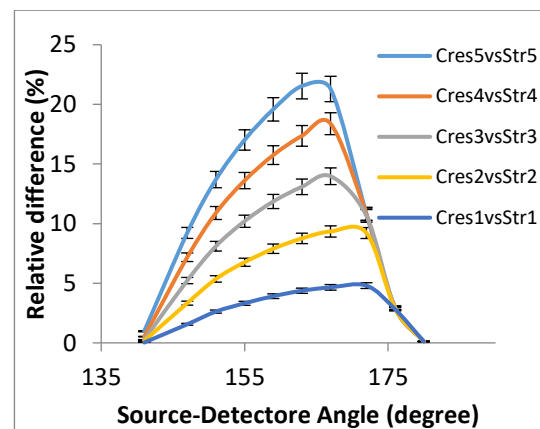
اشاره بلکه روند افزایشی تغییرات توان تفکیک نیز در این زوایا مورد انتظار است. مقادیر درصد اختلاف نسبی رژیم-های انباشت هلالی و طبقه‌بندی با افزایش ضخامت رسوب همواره روندی افزایشی را نشان می‌دهد. در هر صورت توان تفکیک در زوایای بزرگتر مورد اشاره مقادیر بهتری را به خود اختصاص می‌دهد و این پارامتر با افزایش ضخامت رسوب نیز افزایش خواهد داشت.

### ۳- نتیجه‌گیری

با توجه به سرعت زیاد پیش‌روی و شکل‌گیری رسوب در داخل لوله‌های انتقال جریان، زمان یک پارامتر مهم در انتخاب روش اندازه‌گیری و چینش آشکارسازها است. برای پیش‌بینی الگوی انباشت رسوب و اندازه‌گیری ضخامت آن از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که روش گامای عبوری یک روش غیرمخرب برای این کار است. در انتخاب چینش بهینه آشکارسازها کمینه بودن خطای اندازه‌گیری، زمان اسکن، مقرون به صرفه بودن این روش از لحاظ اقتصادی، قابل‌تعمیم دادن این روش برای لوله‌های زیر دریا و خشکی و پایین آوردن دز کاربران پارامترهای مهم در انتخاب چینش مناسب آشکارسازها باید در نظر گرفته شوند. در این مقاله با مقایسه چینش‌های مختلف آشکارسازها اطراف لوله مشخص گردید با چینش آشکارسازها به صورت بادبزی و با فاصله مشخص از لوله می‌توان در اندازه‌گیری ضخامت رسوب میزان دقت را بالا و در زمان صرفه جویی کرد. در این چینش می‌توان در کمترین زمان ممکن و با یک اندازه‌گیری ضخامت و الگوی انباشت رسوب را با اندازه‌گیری کرد. در یک وضعیت بهینه مورد اشاره می‌توان ضخامت بیشینه رسوب کف لوله را با کمک آشکارساز نخست با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به چشمه گامازا اندازه‌گیری کرد. با استفاده از آشکارساز دوم امکان تمییز دو مجموعه رژیم انباشت رسوب حلقوی تخم‌مرغی و هلالی طبقه‌بندی فراهم است. در نهایت و با استفاده از محاسبات شبیه‌سازی با کد مونت‌کارلو ارائه شده توسط شریفزاده و همکاران، موقعیت بهینه استقرار آشکارساز سوم به منظور حصول بیشینه توان تفکیک رژیم‌های حلقوی و تخم‌مرغی از یک سو و هلالی و طبقه‌بندی از سوی دیگر بدست آمد. زوایای کوچکتر و نزدیک به موقعیت آشکارساز دوم در تفکیک رژیم‌های حلقوی تخم‌مرغی و زوایای بزرگتر نزدیک به موقعیت آشکارساز نخست در تفکیک رژیم‌های هلالی طبقه‌بندی، توان تفکیک بالاتری را

بین چشمه و آشکارساز، درصد اختلاف نسبی روندی کاهشی را از خود نشان می‌دهد. با کاهش مقدار ضخامت رسوب کف لوله در ابتدا یک روند کاهشی در درصد اختلاف نسبی شمارش‌ها بین دو رژیم حلقوی و تخم‌مرغی مشاهده می‌شود که با کاهش بیشتر ضخامت این روند معکوس شده و درصد اختلاف نسبی شمارش‌ها روندی افزایشی را نشان می‌دهد.

شیب نمودار فوق نیز با کاهش ضخامت رسوب روندی کاهشی و در ادامه روندی افزایشی را نشان می‌دهد؛ به عبارتی دیگر، به‌ازای زوایای کوچکتر نه تنها تفکیک بهتر بین دو رژیم مورد اشاره ایجاد می‌گردد بلکه تغییرات توان تفکیک نیز روند کاهشی شدیدی با افزایش زاویه چشمه و آشکارساز خواهد داشت. در هر صورت توان تفکیک در زوایای کوچکتر مقادیر بهتری را به خود اختصاص می‌دهد و این پارامتر در ضخامت‌های رسوب بالا و پایین بیشتر از ضخامت‌های میانی خودنمایی می‌کند.



شکل ۱۲- تغییرات زاویه‌ای درصد اختلاف نسبی شمارش رژیم-های هلالی طبقه‌بندی به‌ازای مقادیر بیشینه رسوب یکسان ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتیمتر در کف لوله

آنچه در ادامه و از نمودار فوق مشاهده می‌شود با افزایش زاویه بین چشمه و آشکارساز، درصد اختلاف نسبی شمارش بین دو رژیم هلالی و طبقه‌بندی در ابتدا روندی افزایشی را از خود نشان می‌دهد که در ادامه نزولی خواهد شد.

شیب تغییرات در نمودار فوق نیز در ابتدا روندی کاهشی و سپس افزایشی را نشان می‌دهد. شیب تغییرات با کاهش ضخامت رسوب روندی کاهشی را از خود نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر، به‌ازای زوایای بزرگتر و البته نزدیک به ۱۸۰ درجه (زاویه ۱۶۷ درجه برای ضخامت‌های ۴، ۵ و ۳ سانتیمتری رسوب و زاویه ۱۷۲ درجه برای ضخامت‌های ۲، ۱ و ۲ سانتیمتری) نه تنها تفکیک بهتر بین دو رژیم مورد

ارائه خواهند داد. استفاده از هوش مصنوعی به منظور  
 بکارگیری تعداد بیشتری از داده مربوط به موقعیت‌های  
 مختلف آشکارساز میانی احتمالاً می‌تواند منجر به افزایش  
 بیشتر دقت در اندازه‌گیری رسوب گردد که در ادامه  
 تحقیقات به آن پرداخته خواهد شد و نتایج آن ارائه می-  
 گردد.

#### ۴-مراجع

- [1] B. Bertrand, G. Ségéral, and P.O. Moksnes. "Detection and identification of scales using dual energy/venturi subsea or topside multiphase flow meters." *In Offshore Technology Conference*, pp. OTC-13152. OTC, 2001.
- [2] F.H. Almutairi, and D.R. Davies. "Detection of scale deposition using distributed temperature sensing." *In SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition*, pp. SPE-113595. SPE, 2008.
- [3] S. Farimani Khoshbazzm, M. Vafaie Sefti, and S. Masoudi. "Wax Deposition Modeling in Oil Pipelines Combined with the Wax Precipitation Kinetics." *Journal of Petroleum Research* 24, no. 77 (2014): 89-99.
- [4] B. Bertrand, G. Ségéral, and P.O. Moksnes. "Detection and identification of scales using dual energy/venturi subsea or topside multiphase flow meters." *In Offshore Technology Conference*, pp. OTC-13152. OTC, 2001.
- [5] P. Rostron. "Critical review of pipeline scale measurement technologies." *Indian Journal of Science and Technology* 11, no. 17 (2018): 1-18.
- [6] D.F. Oliveira, J.R. Nascimento, C.A. Marinho, and R.T. Lopes. "Gamma transmission system for detection of scale in oil exploration pipelines." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 784 (2015): 616-620.
- [7] T. Bjørnstad, and E. Stamatakis. "Scaling studies with gamma transmission technique." (2006).
- [8] W.J. Song, S.H. Lee, and H.D. Jeong. "DEVELOPMENT OF DEPOSIT DETECTION SYSTEM IN PIPELINES OF THE STEELWORKS USING CS-137 GAMMA-RAY." In AIP Conference Proceedings, vol. 975, no. 1, pp. 1374-1380. American Institute of Physics, 2008.
- [9] W. Harara. "Deposit thickness measurement in pipes by tangential radiography using gamma ray sources." *Russian Journal of Nondestructive Testing* 44, no. 11 (2008): 796-802.
- [10] J.P. Candeias, D.F.D. Oliveira, M.J.D. Anjos, and R.T. Lopes. "Scale analysis using X-ray microfluorescence and computed radiography." *Radiation Physics and Chemistry* 95 (2014): 408-411.
- [11] C.M. Salgado, and T. Teixeira. "Use of transmission gamma for study of calculation of incrustation thickness in oil pipelines." (2017).
- [12] T.P. Teixeira, C.M. Salgado, R.S.D.F. Dam, and W.L. Salgado. "Inorganic scale thickness prediction in oil pipelines by gamma-ray attenuation and artificial neural network." *Applied Radiation and Isotopes* 141 (2018): 44-50.
- [13] C. Cheng, W.B. Jia, D.Q. Hei, S.Q. Geng, H.T. Wang, and L.T. Xing. "Determination of thickness of wax deposition in oil pipelines using gamma-ray transmission method." *Nuclear Science and Techniques* 29, no. 8 (2018): 109.
- [14] Mo. Askari, A. Taheri, M. Mojtahedzadeh Larijani, A. Movafeghi, and H. Faripour. "A gamma-ray tomography system to determine wax deposition distribution in oil pipelines." *Review of Scientific Instruments* 90, no. 7 (2019).
- [15] W.L. Salgado, R.S.D.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.
- [16] T.P. Teixeira, M.C. Santos, C.M. Barbosa, W.L. Salgado, R.S.F. Dam, C.M. Salgado, R. Schirru, and R. Lopes. "Determination of eccentric deposition thickness on offshore horizontal pipes by gamma-ray densitometry and artificial intelligence technique." *Applied Radiation and Isotopes* 165 (2020): 109221.
- [17] D.F. Swinehart. "The beer-lambert law." *Journal of chemical education* 39, no. 7 (1962): 333.
- [18] CATIA V5 Fundamentals, www. <http://handbook5.com/c/catia-v5-fundamentals-w3524.html>.
- [19] M. Sharifzadeh, H. Afarideh, H. Khalafi, and R. Gholipour. "A Matlab-based Monte Carlo algorithm for transport of gamma-rays in matter." *Monte Carlo Methods and Applications* 21, no. 1 (2015): 77-90.