

## طراحی مفهومی سیستم تشخیص الگوی انباشت و اندازه‌گیری ضخامت رسوب لوله‌های

## قطر جریان هیدروکربن

INC29-1214

رسمیه زینوی میان‌آبی<sup>۱</sup>، عطاءالله ربیعی<sup>۱</sup>، محسن شریف‌زاده<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، کد پستی ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز-ایران.

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کد پستی ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳، تهران-ایران.

## چکیده:

پیش‌بینی الگوی انباشت رسوب و اندازه‌گیری ضخامت تضمین جریان هم‌زمان، با نیاز روزافزون به برداشت نفت و گاز از مخازن، یکی از چالش‌های بزرگ است و در این بین انباشت رسوب درون خطوط لوله به‌عنوان مشکلی بزرگ وجود دارد. از آنجایی که تجمع این رسوبات در مدت‌زمانی کوتاه صورت می‌گیرد، نیاز به کنترل و پیش‌بینی آن درون خطوط لوله در کمترین زمان ممکن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای پیش‌بینی الگوی انباشت رسوب و اندازه‌گیری ضخامت آن از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که روش گامای عبوری یک روش غیر مخرب برای این کار است. رویکرد لازم در به‌کارگیری این تکنیک، چینش بهینه آشکارساز و چشمه حول لوله است به‌گونه‌ای که در مدت‌زمانی کوتاه با بیشینه دقت ممکن بتوان فرایند اندازه‌گیری را انجام داد. ملاحظات هزینه‌ای، قابلیت به‌کارگیری میتر در موقعیت‌های مختلف روی سکو و زیر دریا، و کاهش دز جذبی اپراتور به کمینه قابل حصول از دیگر پارامترهای مهم است که به‌واسطه چینش بهینه چشمه-آشکارساز پیرامون لوله قابل‌دستیابی است. در این مطالعه با استفاده از ابزار تحلیل هندسی نشان داده شد که چینشی بادبزی از آشکارسازها با فاصله مشخص حول لوله می‌تواند منجر به اندازه‌گیری مطلوب رژیم انباشت و ضخامت رسوب گردد.

کلیدواژه‌ها: رسوب‌سنجی، الگوی انباشت رسوب، تکنیک گاما، تحلیل هندسی، چینش بهینه، آشکارساز

### Conceptual design of deposition pattern detection and scale thickness measurement system for thick hydrocarbon flow pipes

R. Zeinavi Mianabi<sup>1</sup>, A. Rabee<sup>1</sup>, M. Sharifzadeh<sup>2\*</sup>

1. Department of nuclear Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.BOX:7193616548, Shiraz, Iran.

2. Radiations Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX:1439951113, Tehran, Iran.

**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 tool, it is shown that the fan-shaped arrangement of the detectors with a certain spacing around the pipe can lead to an optimal measurement of the deposition regime and the scale thickness.

**Keywords:** Scale thickness measurement, Scale deposition pattern, Gamma technique, Geometric analysis, Optimum arrangement, Detector.

## ۱. مقدمه

تشکیل رسوبات درون خطوط لوله جریان همواره به‌عنوان یکی از مشکلات رایج در صنعت نفت/گاز مطرح بوده است. این رسوبات جامد/معلق در سیال با حرکت درون لوله می‌توانند ته‌نشین و به سطح درونی لوله بچسبند [۱]. بر اساس بررسی‌هایی صورت گرفته توسط سازمان انرژی اتمی امریکا، رفع مشکلات ناشی از رسوب واکس در عمق ۴۰۰ متری زیر دریا هزینه‌ای برابر ۱ میلیون دلار در هر مایل در بر خواهد داشت [۲]. هزینه کنترل رسوب در میدان وسلیفریک<sup>۱</sup> نروژ برابر ۱/۱ میلیارد دلار برآورد شده است [۳]. شرکت نفت لاسمو انگلستان مجبور شد بعد از صرف هزینه بیش از ۱۰۰ میلیون دلار، یکی از سکوه‌های نفتی خود را به دلیل مشکلات ناشی از تشکیل پرتکرار رسوب پارافین رها کند [۴]. تکنیک گامای عبوری به دلیل استفاده از چشمه رادیواکتیو قابلیت استفاده برای لوله‌های عایق‌بندی شده را دارد و از دقتی بالا در تشخیص و اندازه‌گیری ضخامت رسوب برخوردار است. پس از مکان‌یابی مناسب آشکارسازهای پرتو حول لوله این امکان فراهم خواهد بود که برخلاف رویه مرسوم، اندازه‌گیری ضخامت در یک راستای منفرد داده‌های مربوط به خوانش پرتو عبوری از وترهای مختلف لوله به‌عنوان ورودی یک شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گیرد. متعاقباً شبکه آموزش داده‌شده مذکور قادر است علاوه بر اندازه‌گیری ضخامت رسوب در جهات مختلف امکان تشخیص مدل رسوب‌گذاری را نیز برای اپراتور در اتاق کنترل فراهم کند.

## ۲. روش کار

در انتخاب چینش مناسب آشکارسازها چند نکته مهم مورد لحاظ قرار گرفت:

۱. یافتن نواحی 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.
۲. تعریف مقدار خاصی از ضخامت رسوب به‌عنوان ضخامت بیشینه برای سیستم اندازه‌گیری
۳. بهره‌گیری از فرض عمدتاً صحیح تقارن زاویه‌ای در الگوی انباشت رسوب درون لوله
۴. 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. آنچه به‌عنوان زیربنای محاسبه تضعیف نسبی پرتو گامای عبوری از لوله مورد استفاده قرار گرفت، قانون بیر-لمبرت است که جهت دستیابی به تفکیک‌پذیری بیشتر به ازای دو وضعیت حضور و عدم حضور رسوب در مسیر پرتو عبوری اختلاف شمارش آشکارساز متناظر با هر کدام از این دو وضعیت باید بیشینه باشد لذا:

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

$I_2$  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. از طرفی بنا به معادله پخش خطا خواهیم داشت:

$$\sigma_f^2 = \left( -\frac{1}{x^2} \ln \frac{I_1}{I_2} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( -\frac{1}{xI_1} \right)^2 \sigma_{I_1}^2 + \left( \frac{1}{xI_2} \right)^2 \sigma_{I_2}^2 \quad (2)$$

<sup>1</sup> The Veslefrikk field

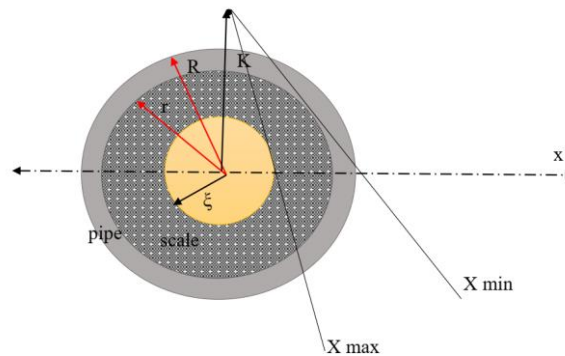
$$\sigma_f^2 = \left(-\frac{1}{x^2} \ln \frac{I_1}{I_2}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(-\frac{1}{xI_1}\right)^2 I_1 + \left(\frac{1}{xI_2}\right)^2 I_2$$

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

برای دستیابی به کمینه واریانس بایستی دو ترم سمت راست معادله ۳ را هر چه بیشتر به مقدار صفر نزدیک کرد. در مورد عبارت نخست بایستی اختلاف شمارش  $I_1$  و  $I_2$  کمینه شود و در مورد عبارت دوم به ازای شرایطی که مقادیر شمارشی فوق نزدیک به یکدیگر باشند این هدف با کمینه‌سازی معادله زیر به دست می‌آید:

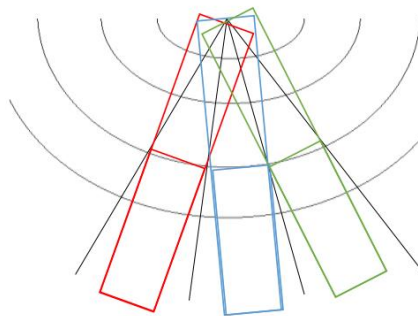
$$\sigma_f^2(\min) = \frac{2}{x^2 I} \quad (۳)$$

به عبارت دیگر، کاهش سهم عبارت دوم در انتشار خطا با مقادیر هرچه بزرگ‌تر  $x$  و  $I$  حاصل می‌شود. با توجه به شرایط فوق و خطوط ترسیمی در شکل ۱ بیشترین مسافتی که بیم مدادی از داخل رسوب حلقوی با ضخامت  $t$  طی می‌کند برای بیم مماس بر شعاع داخلی رسوب و کمترین مسافت برای بیم مماس بر شعاع خارجی رسوب اتفاق می‌افتد. بنابراین توزیع مناسب آشکارساز در چینش پله‌ای در حدفاصل این دو مماس و هرچه نزدیک‌تر به مماس داخلی خواهد بود.



شکل ۱. بازه چینش آشکارسازها.

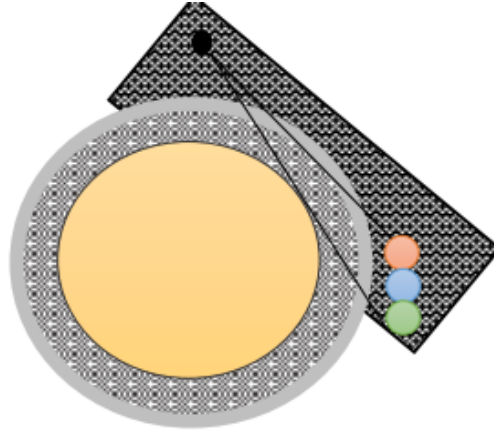
بعد از به دست آوردن زاویه مناسب چینش آشکارسازها، نیاز است مکان دقیق آشکارسازها را با در نظر گرفتن شدت بیم فوتونی به دست آورد. با توجه به معادله ۳ می‌دانیم که هرچه قدر شدت تابش بیشتر باشد، خطای اندازه‌گیری ضخامت کاهش می‌یابد. برای این کار نیز می‌توان یا از چشمه با اکتیویته زیاد استفاده کرد یا آشکارسازها به اندازه کافی به چشمه نزدیک باشند.



شکل ۲. مکان هندسی آشکارسازها.

همان‌گونه که در شکل ۲ قابل مشاهده است، آشکارسازها را نمی‌توان هم‌زمان به چشمه نزدیک کرد زیرا این کار باعث می‌شود سهمی از اطلاعات مربوط به باریکه تضعیف شده در امتداد هرکدام از آشکارسازها توسط آشکارسازهای مجاور خوانش شود یا با تضعیف توسط ماده سوسوزن آشکارساز مجاور از دست برود. بنابراین و به منظور جلوگیری از افزایش خطا نیاز است که آشکارسازها به صورت پلکانی چیده شوند.

در ادامه و با هدف استفاده از این چینش در شرایطی که هم از ورود پرتوهای پس‌زمینه به آشکارسازها جلوگیری شود و هم الزامات حفاظت پرتوی افراد در فرایند داده‌گیری تجربی رعایت شود حفاظ‌گذاری مطابق شکل ۳ انجام پذیرفت.



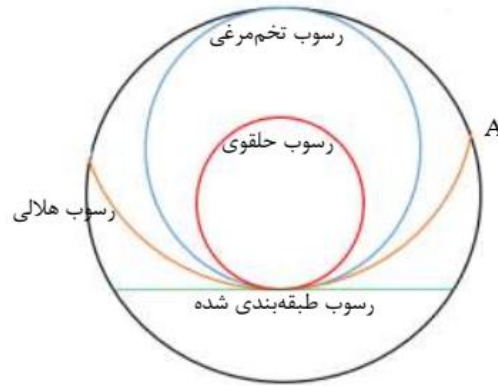
شکل ۳. شماتیک حفاظ‌گذاری مسئله.

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 به واسطه کاهش حجم در معرض پرتوهای عبوری هرکدام از سوسوزن‌ها از دست خواهند رفت و از بازده هندسی آشکارساز به صورت 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- به منظور تشخیص الگوی انباشت رسوب در این چینش نیاز به اسکن لوله وجود دارد که به دلیل نیاز به انجام داده‌گیری و چرخش توأمان ساختار مکانیکی موجود زمان زیادی صرف خواهد شد.

و اما در چینش دوم، آشکارسازها در اطراف لوله با یک فاصله مشخص از سطح آن نسبت به چشمه به صورت بادبزنی چیده می‌شوند. برای این چینش ما نیاز به انتخاب بهترین مکان برای آشکارسازها هستیم. راهکار ما در رسیدن به این هدف با استفاده از ۳ آشکارساز، به کارگیری 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 قرار داده شد. در این امتداد قادریم بیشینه ضخامت رسوب به عنوان یک پارامتر با اهمیت را اندازه‌گیری کنیم. موقعیت آشکارساز دوم جهت تشخیص الگوی انباشت رسوب در کمترین زاویه نسبت به چشمه و پیرامون لوله به گونه‌ای تنظیم شد که بتواند بین الگوهای انباشت چهارگانه مورد نظر حلقوی، بیضوی، هلالی و طبقه‌بندی تمایز ایجاد کند. با توجه به شکل ۴، 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.

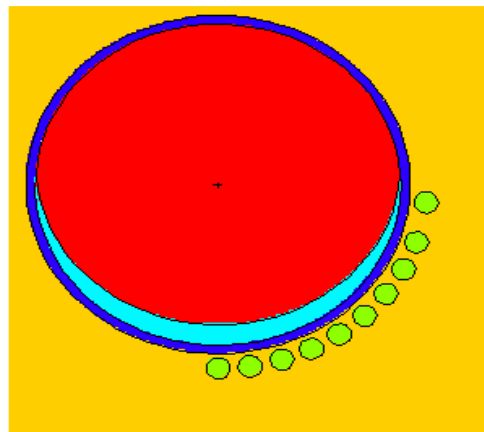
ویژگی بارز این نقطه برای تعبیه آشکارساز دوم آن است که مقدار شمارشی گامای عبوری از لوله به ازای دو رژیم هلالی و طبقه‌بندی برابر با مقادیر مربوط به حالت کالیبراسیون اولیه و با حضور لوله کاملاً تمییز و خالی از رسوب است درحالی‌که به ازای دو رژیم دیگر حلقوی و بیضوی همواره با مقادیر شمارشی کمتر ناشی از تضعیف سهمی از پرتوهای عبوری توسط رسوبات واقع در بالای این نقطه مواجه خواهیم بود.



شکل ۴. الگوی مختلف انباشت رسوب.

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 توانسته‌ایم ۴ الگوی انباشت رسوب را از هم تمییز دهیم، به‌کارگیری آشکارساز سوم (میانی) تنها در شرایطی لازم است که تفکیک انواع مختلف رسوب آلی و معدنی از یکدیگر نیز موردنظر باشد. درواقع به ازای ضرایب تضعیف متفاوت انواع مختلف رسوبات نیاز است که داده‌های تجمیع شده هر دو آشکارساز اول و سوم در کنار یکدیگر به‌منظور محاسبه صحیح ضخامت بیشینه رسوب در امتداد خط واصل چشمه و آشکارساز نخست مورد استفاده قرار گیرد.

در تعیین زاویه بهینه برای قرارگیری آشکارساز میانی می‌توان از کدهای محاسباتی مونت کارلو استفاده کرد. محاسبات در این محیط‌های نرم‌افزاری بر اساس تراپد پرتوهای گاما در ماده و با استفاده از روش‌های تصادفی صورت خواهد گرفت که درنهایت مقدار شمارشی این آشکارساز در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف را به دست می‌آورد. موقعیت زاویه‌ای بهینه جایی است که بیشترین تفکیک بین مقادیر شمارشی ناشی از انواع مختلف رسوب را به‌منظور محاسبه صحیح ضخامت بیشینه با استفاده از مقادیر خوانش شده توسط آشکارساز نخست فراهم کند.



شکل ۵. 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 پلکانی، معایب اساسی مربوط به چینش بادبزنی به‌طور قابل قبولی قابل‌رفع است. به‌عبارت‌دیگر، در شرایطی که از چینش بادبزنی استفاده کنیم قادر خواهیم بود صرفاً طی یک اندازه‌گیری و بدون نیاز به اسکن لوله و جابجایی مدام چشمه و آشکارسازها، نه‌تنها انواع مختلف رسوب، بلکه رژیم انباشت و ضخامت بیشینه را محاسبه و گزارش کنیم.

### ۳. نتیجه‌گیری

با توجه به سرعت زیاد پیشروی و شکل‌گیری رسوب در داخل لوله‌های انتقال سوخت، زمان یک پارامتر مهم در انتخاب تکنیک اندازه‌گیری و چینش آشکارسازها است. در این مقاله، با مقایسه چینش‌های مختلف آشکارسازها اطراف لوله به این نکته رسیدیم که چینش آشکارسازها به‌صورت بادبزنی می‌تواند در اندازه‌گیری ضخامت رسوب میزان دقت را بالا و در زمان صرفه‌جویی کرد. در این چینش می‌تواند در کمترین زمان ممکن و صرفاً با یک اندازه‌گیری، نوع، ضخامت و الگوی انباشت رسوب را با کمک اندازه‌گیری کرد. استفاده از هوش مصنوعی به‌منظور به‌کارگیری تعداد بیشتری از داده‌های مربوط به موقعیت‌های مختلف آشکارساز می‌تواند منجر به افزایش بیشتر دقت در اندازه‌گیری رسوب گردد که در ادامه تحقیقات به آن خواهیم پرداخت و نتایج آن را ارائه خواهیم کرد.

### ۶. مراجع

- [1] Almutairi, F. H., & Davies, D. R. (2008). *Detection of scale deposition using distributed temperature sensing*. Paper presented at the SPE International Oilfield Scale Conference.
- [۲] خوش بزم فریمانی، ص.، وفایی-صفتی، م.، & مسعودی، ش. (۲۰۱۴). مدل‌سازی رسوب واکس در خطوط لوله انتقال نفت با توجه به کینتیک رسوب واکس. پژوهش نفت، ۲۴(۷۷)، ۸۹-۹۹.
- [3] Tjomsland, T., Grotle, M., & Vikane, O. (2001). *Scale control strategy and economical consequences of scale at Veslefrikk*. Paper presented at the International Symposium on Oilfield Scale.
- [4] Bertrand, B., Ségéral, G., & Moksnes, P. O. (2001). *Detection and identification of scales using dual energy/venturi subsea or topside multiphase flow meters*. Paper presented at the Offshore Technology Conference.