

Non-destructive Evaluation of Corrosion Under Insulation in Oil and Gas Pipelines Using Gamma and X-ray Linear Profilers Using Monte Carlo Method

Mostafa Kabir¹  | Hossein Afarideh²  | Mitra Ghergherehchi³  | Jong-Seo Chai⁴ 

1. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. E-mail: m.kabir@aut.ac.ir
2. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. E-mail: hafarideh@aut.ac.ir
3. Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, South Korea. E-mail: mitragh@skku.edu
4. Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, South Korea. jschai@skku.edu

Article Information:

Research Article

Received 06 July 2024

Revised 26 Sep. 2024

Accepted 17 Oct. 2024

Keywords:

Non-destructive testing,
linear profiler,
X-ray and gamma ray,
Monte Carlo method,
Corrosion under
insulation (CUI),
pipelines.

ABSTRACT

A substantial volume of oil and gas pipelines, particularly in petrochemical industries, are insulated with various materials. In many cases, a small opening or leak can allow water and other corrosive liquids to penetrate, leading to corrosion under insulation (CUI). This type of corrosion is not detectable through conventional methods over the insulation. One of the most effective non-destructive methods for this purpose is the use of radiographic profiling devices. In this paper, using the Monte Carlo method, the common X-ray spectra for this technique at 70 kV and 90 kV were simulated. Industrial radioisotopes used, including Ir-192 and Co-60, were considered as sources. The pipeline phantoms implemented were made of 6mm thick carbon steel and 24mm thick polyethylene insulation. Artificial corrosion with a depth of 3mm was created on the pipeline wall. A single-energy linear detector made of CsI(Tl) with a thickness of 5mm and a pixel pitch of 1.6mm was implemented in the code, and the spatial signal was recorded on it. The transport of X-ray and gamma photons for the used sources was visually recorded for 20,000 photons, and the signal recorded on the detector, along with the accumulated energy in each detector pixel, was measured. By comparing defect-free and defective states and recording the spatial distribution of detected photons, a quantifiable metric was obtained for distinguishing between states with and without defects. The results, demonstrated through the operational and practical representation of output signal contrast, indicate the effective performance of the implemented system in locating and detecting corrosion defects beneath insulation.

Cite this article: Kabir, M., Afarideh, H., Ghergherehchi, M., Chai, J. (2024). Non-destructive Evaluation of Corrosion Under Insulation in Oil and Gas Pipelines Using Gamma and X-ray Linear Profilers Using Monte Carlo Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 60-67.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.472007.1148>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی غیرمخرب خوردگی زیر عایق خط لوله نفت و گاز با استفاده از پروفایلگیر خطی پرتوی گاما و ایکس به روش مونت کارلو

مصطفی کبیر^۱ | حسین آفریده^۲ | میترا قرقره‌چی^۳ | جانگ سئو-چای^۴

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، رایانامه: m.kabir@aut.ac.ir
۲. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، رایانامه: hafarided@aut.ac.ir
۳. کالج مهندسی اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه SKKU، سوون-سی، کره جنوبی، رایانامه: mitragh@skku.edu
۴. کالج مهندسی اطلاعات و ارتباطات، دانشگاه SKKU، سوون-سی، کره جنوبی، رایانامه: jschai@skku.edu

چکیده:

حجم زیادی از خطوط لوله‌ی نفت و گاز و بخصوص در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله دارای عایق‌هایی از جنس‌های مختلف است. در بسیاری از موارد یک روزنه یا نشتی کوچک می‌تواند مسیر را برای نفوذ آب و سایر مایعات خورنده باز نماید و خوردگی زیر عایق (CUI) ایجاد شود. این خوردگی به هیچ وجه با روش‌های مرسوم و از روی عایق قابل تشخیص نیستند. یکی از موثرترین روش‌های غیرمخرب برای این منظور استفاده از دستگاه‌های پروفایلگیر پرتویی هستند. در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو ابتدا طیف اشعه ایکس متداول برای این روش 70kV و 90 kV شبیه‌سازی شد و رادیو ایزوتوپ‌های صنعتی مورد استفاده شامل Ir-192 و Co-60 نیز به عنوان چشمه در نظر گرفته شده‌اند. فانتوم‌های خط لوله پیاده‌سازی شده از جنس فولاد کربنی به ضخامت 6mm و عایق پلی‌اتیلنی به ضخامت 24mm هستند. خوردگی مصنوعی به عمق 3 mm روی دیواره خط لوله ایجاد شد. آشکارساز خطی تک انرژی از جنس CsI(Tl) به ضخامت 5mm و با گام پیکسلی 1.6 mm در کد پیاده‌سازی شد و سیگنال مکانی روی آن به ثبت رسید. ترابرد فوتون‌های ایکس و گاما برای چشمه‌های مورد استفاده به صورت بصری برای ۲۰۰۰۰ فوتون ثبت شد و سیگنال ثبت شده روی آشکارساز به همراه انرژی انباشت شده در هر پیکسل از آشکارساز اندازه‌گیری شد. با مقایسه حالات بدون عیب و با عیب و ثبت مکانی فوتون‌های آشکارسازی شده معیار کمی قابل اندازه‌گیری برای تفکیک حالت‌های با وجود و بدون وجود عیوب به دست آمد. نتایج با نمایش تفکیک (کنتراست) میزان سیگنال خروجی به صورت عملیاتی و کاربردی نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سیستم پیاده شده در مکان‌یابی و تشخیص عیوب خوردگی زیر عایق می‌باشد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۱۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

کلیدواژگان:

آزمون‌های غیرمخرب، پروفایلگیر خطی، پرتوی ایکس و گاما، روش مونت کارلو، خوردگی زیر عایق

استناد: کبیر، مصطفی؛ قرقره‌چی، میترا و سئو-چای، جانگ. (۱۴۰۲). ارزیابی غیرمخرب خوردگی زیر عایق خط لوله نفت و گاز با استفاده از پروفایلگیر خطی پرتوی گاما و ایکس به روش مونت کارلو. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۶۷-۶۰.

© نویسندگان

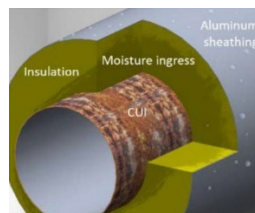
ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران



DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.472007.1148>

۱- مقدمه

یکی از علل اصلی خوردگی زیر عایق، نفوذ آب به زیر عایق‌ها است. عایق‌ها ممکن است به مرور زمان ترک بردارند یا به دلیل نصب نامناسب یا خرابی‌های مکانیکی، رطوبت به زیر آنها نفوذ کند. همچنین، در شرایطی که خطوط لوله سردتر از دمای محیط هستند، تعریق رخ می‌دهد و آب تشکیل شده به زیر عایق نفوذ می‌کند. محیط خورنده نیز نقش مهمی در تسریع این نوع خوردگی دارد. وجود نمک‌ها یا مواد شیمیایی در آب نفوذ کرده می‌تواند خوردگی را تسریع کند. همچنین گازهای اسیدی مانند H_2S یا CO_2 که در فرآیندهای نفت و گاز تولید می‌شوند، می‌توانند با آب واکنش دهند و اسیدهای خورنده تشکیل دهند. عوامل حرارتی نیز می‌توانند تاثیر گذار باشند؛ تغییرات دمایی می‌توانند سبب انقباض و انبساط عایق‌ها شده و فرصتهایی برای نفوذ آب فراهم کنند [۱]، [۲].

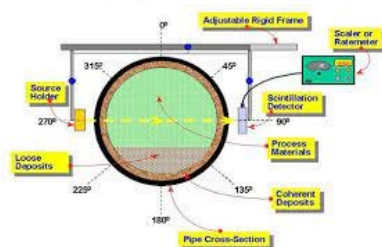
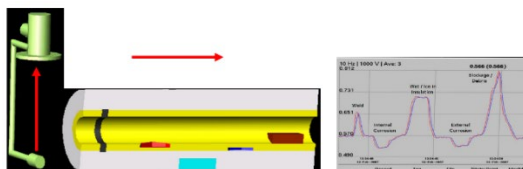


شکل (۱) خوردگی زیر عایق (CUI)

خوردگی زیر عایق می‌تواند تاثیرات مختلفی بر خطوط لوله داشته باشد (شکل ۱). کاهش ضخامت دیواره لوله یکی از نتایج این نوع خوردگی است که می‌تواند به تدریج مقاومت مکانیکی لوله را کاهش دهد و در موارد شدیدتر، باعث ایجاد سوراخ و نشتی شود. این موضوع می‌تواند به آلودگی محیط زیست و خطرات ایمنی جدی منجر شود. همچنین، هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز افزایش می‌یابد. نیاز به بازرسی‌های مکرر و تعمیرات پیشگیرانه برای جلوگیری از نشتی و خرابی‌های بیشتر از جمله هزینه‌های مرتبط با خوردگی زیر عایق است. در صورت بروز خرابی‌های ناگهانی، هزینه‌های تعمیرات اضطراری و توقف تولید بسیار

بالا خواهد بود. علاوه بر این، خطرات ایمنی نیز افزایش می‌یابد. نشتی گاز یا نفت می‌تواند به انفجار و آتش‌سوزی منجر شود که خطرات جانی و مالی بزرگی به همراه دارد. آلودگی محیط زیست نیز از دیگر پیامدهای منفی این نوع خوردگی است [۳].

برای پیشگیری و کنترل خوردگی زیر عایق، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. انتخاب مناسب مواد عایق و استفاده از عایق‌های ضد آب می‌تواند تا حد زیادی از نفوذ آب جلوگیری کند. همچنین استفاده از پوشش‌ها و رنگ‌های ضد خوردگی بر روی لوله‌ها قبل از نصب عایق نیز موثر است. بازرسی و نگهداری منظم خطوط لوله نیز یکی از استراتژی‌های مهم در مدیریت خوردگی زیر عایق است. بازرسی‌های دوره‌ای برای شناسایی زود هنگام مشکلات خوردگی و انجام تعمیرات دوره‌ای برای جلوگیری از پیشرفت خوردگی ضروری است. استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند تکنیک‌های آزمون غیرمخرب (NDT) رادیوگرافی یا پروفایلگیری پرتویی و سیستم‌های پایش آنلاین نیز می‌تواند در تشخیص زود هنگام و نظارت مستمر بر وضعیت خطوط لوله و عایق‌ها کمک کند [۴]، [۵]. پروفایلگیرهای پرتویی گاما و ایکس (شکل ۲) ابزارهایی هستند که با استفاده از تضعیف پرتوها در عبور از خط لوله و عایق و با ثبت میران پرتوهای رسیده به آشکارساز معیاری از وجود یا عدم وجود آسیب‌ها در آن را نشان می‌دهد [۶].



شکل (۲) پروفایلگیر خطی پرتویی

طراحی مناسب سیستم عایق‌بندی و اطمینان از نصب صحیح عایق‌ها و استفاده از مواد آب‌بند مناسب در محل‌های اتصال نیز از دیگر اقدامات موثر در پیشگیری از خوردگی زیر عایق است. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش مونت کارلو

چشمه های رادیوایزوتوپی صنعتی ^{60}Co و ^{192}Ir نیز در این پژوهش مورد بررسی واقع شدند. در جدول ۱ مشخصات چشمه‌های مورد استفاده نشان داده شده‌اند.

جدول ۱) مشخصه‌های چشمه‌های گسیلنده گاما در پروفایلمتری

| Radioisotope Source | Effective γ Energy (keV) | Emittance Probability (%) | Half-life (Years) |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------|
| ^{60}Co | 1173 | 100% | 5.27 |
| | 1333 | 100% | |
| | 296 | 28.7% | |
| ^{192}Ir | 308 | 29.7% | 0.20 |
| | 317 | 82.7% | |
| | 468 | 47.8% | |
| | 589 | 4.5% | |
| | 604 | 8.2% | |
| | 612 | 5.3% | |
| | 66.4 | 7.3% | |

۲-۳ آشکارساز و بازدهی آشکارسازی

احتمال اندرکنش فوتون‌های ایکس و گاما با آشکارساز یکی از مهمترین مواردی است که در هر محاسبات مونت کارلو می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. برای یک آشکارساز ضخامت آن - که معیاری از طول موثر گذر پرتوهای ایکس یا گاما از آن است - عدد اتمی و چگالی آن و انرژی فوتون‌های ایکس و گامای برخوردی به آن. در جدول ۲ مشخصات آشکارساز مورد استفاده در این پژوهش که آشکارساز خطی بدور سزیم است، نشان داده شده است.

جدول ۲) مشخصات آشکارساز

| Detector Name | Detector Type | Components | Atomic Number | Atom Fraction | Density (g/cm^3) | Thickness (mm) |
|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|------------------------------------|----------------|
| Cesium Iodide | CsI(Tl) | Cs | 55 | 0.50 | 4.51 | 5.0 |
| | | I | 53 | 0.50 | | |

به منظور تعیین میزان بازدهی یا راندمان آشکارسازی که معیاری از جذب انرژی در بازه‌های انرژی متفاوت است، در بازه انرژی ۰ تا ۱۵۰۰ کیلو الکترون ولت، با احتمال واحد فوتون‌ها به سلول آشکارساز تابیده شده و سپس روی آن میزان شار پرتوی ثبت شده در بازه‌های انرژی تعیین شده ثبت می‌گردد.

۲-۴ سیگنال ثبت شده روی آشکارساز

در این پژوهش از مولد پرتوی ایکس بهره گرفته می‌شود که منبع تولید پرتوی با طیف پیوسته است. بنابراین برای

به پیاده سازی چینش پروفایلیگری پرتوی ایکس و گاما پرداخته شد. علت استفاده از انرژی‌های ۷۰ و ۹۰ keV برای تیوب ایکس موجود بودن تیوب پرتابل با سایز کوچک در این مقیاس است. ترابرد پرتوها از خط لوله آزمون انجام شد و نتایج روی دتکتورها به ثبت رسید.

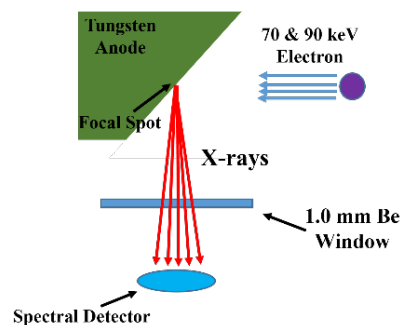
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ روش مونت کارلو

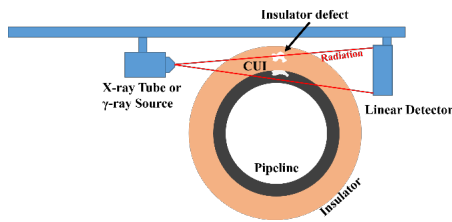
روش مونت کارلو در محاسبات ترابرد پرتوهای ایکس و گاما کاربرد گسترده‌ای دارد و به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی تعاملات پیچیده این پرتوها با مواد مختلف شناخته می‌شود. این روش بر اساس تولید نمونه‌های تصادفی از مسیرهای پرتوها و بررسی رفتار آنها در برخورد با اتم‌ها و مولکول‌های مواد هدف، به شبیه‌سازی دقیق پراکندگی، جذب و تولید پرتوهای ثانویه می‌پردازد. به کمک الگوریتم‌های مونت کارلو، می‌توان تأثیر عوامل مختلفی مانند انرژی پرتو، نوع ماده و ساختار هندسی سیستم را بر روی ترابرد و توزیع نهایی پرتوها مورد مطالعه قرار داد [۷]. این قابلیت‌ها به ویژه در کاربردهای پزشکی، صنعتی و تحقیقات علمی اهمیت دارد، چرا که امکان بهینه‌سازی طراحی تجهیزات و بهبود دقت تشخیص و ارزیابی را فراهم می‌سازد. در این پژوهش از کد مونت کارلوی MCNPX به منظور ترابرد فوتون‌های ایکس و گاما بهره برده شده است [۸].

۲-۲ چشمه های پرتویی و محاسبات طیف اشعه ایکس

طیف توزیع انرژی فوتون‌های پرتوی ایکس خروجی از تیوب‌های ایکس یکی از ویژگی‌های مهم هر تیوب ایکس بوده که خواص فیزیکی و برآورد اندرکنش‌ها با ماده به آن وابسته است [۹]. هندسه مونت کارلویی تولید طیف توزیع انرژی پرتوی ایکس در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳) هندسه تولید طیف اشعه ایکس در کد مونت کارلو



شکل ۴) شماتیک کلی اجزای سیستم پروفایلگیری با آشکارساز خطی

شدت پرتوهای ثبت شده در آشکارساز خواهیم داشت [۱۰]:

$$I = \int_{E_{min}}^{E_{max}} I_0(E) e^{-\frac{\mu(Z,E)}{\rho} \times (\rho x)} dE \quad (1)$$

که در آن E_{max} و E_{min} حد پایین و بالای انرژی طیف پرتوی ایکس است.

سیگنالی که از پرتوهای رسیده به آشکارساز پس از عبور از ماده روی دکتور ثبت می شود (S) مطابق رابطه ۲ تعریف می گردد [۱۱]:

$$S = \int_{E_{min}}^{E_{max}} I_0(E) e^{-\frac{\mu(Z,E)}{\rho} \times (\rho x)} D(E) dE \quad (2)$$

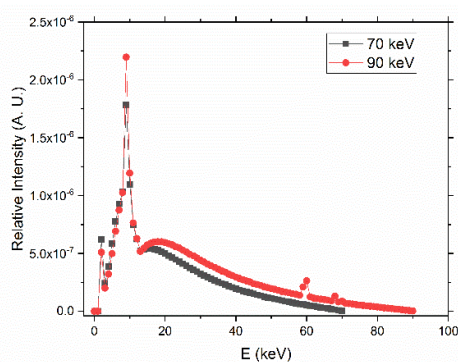
که در آن سیگنال ثبت شده روی آشکارساز S و $D(E)$ تابع پاسخ انرژی آشکارساز مورد استفاده است. در شبیه سازی مونت کارلویی بعلت استفاده از تالی خاص که میزات انباشت انرژی در هر پیکسل (المان) از آشکارساز را بعنوان خروجی می دهد، تابع $D(E)$ به صورت اتوماتیک در محاسبات در نظر گرفته می شود. سیگنال ثبت شده روی آشکارساز برای سورس های رادیوایزوتوپی گسیلنده گاما که دارای تعدادی انرژی های گسسته $E \in E_0, E_1, \dots, E_n$ هستند در معادله ۳ داده شده اند.

$$S = \sum_{i=0}^n I_0(E_i) e^{-\frac{\mu(Z,E_i)}{\rho} \times Const.} D(E_i) |_{Detector} \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث روی نتایج

۳-۱ طیف اشعه ایکس

طیف انرژی محاسبه شده به روش مونت کارلو برای قرار دادن بعنوان توزیع انرژی چشمه گسیلنده پرتوی ایکس به صورت ذیل می باشد.



شکل ۵) طیف توزیع انرژی پرتوهای ایکس نوعی تولید شده توسط تیوب های ایکس 90 keV و 70 keV

۲-۵ فانتوم خط لوله

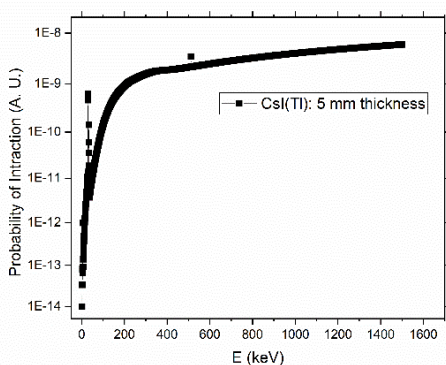
فانتوم تست در این پژوهش شامل یک خط لوله فولادی و یک عایق پلی اتیلنی است که مشخصات آن ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳) مشخصات اجزای فانتوم نمونه خط لوله به همراه

عایق آن

| Component | Material | Chemical Formula | Density (g/cm ³) | Thickness (mm) |
|-----------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|
| Insulator | Polyethylene (PE) | C ₂ H ₄ | 0.93 | 24 |
| Pipeline | Carbon Steel | Fe, C | 7.82 | 6 |

در شکل ۴ شماتیک هندسه پروفایلگیر پیاده سازی شد در این پژوهش نشان داد شده است.

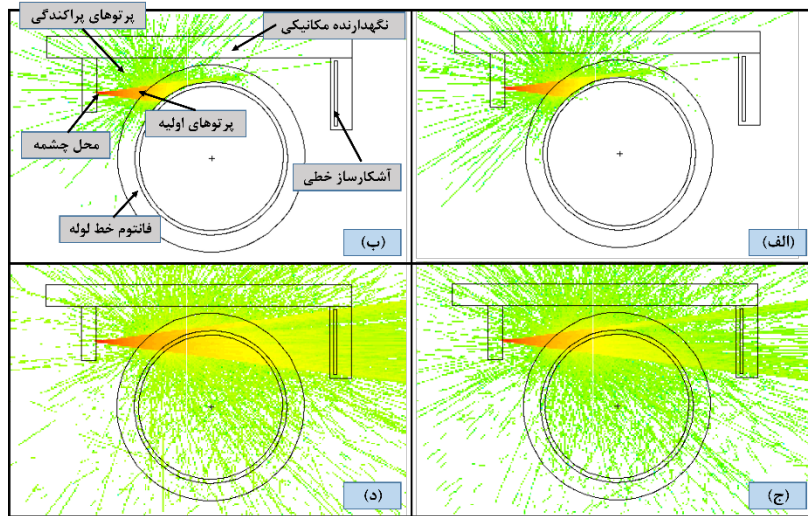


شکل ۶) بازدهی انرژی آشکارساز بر حسب انرژی فوتون های پرتوهای رسیده.

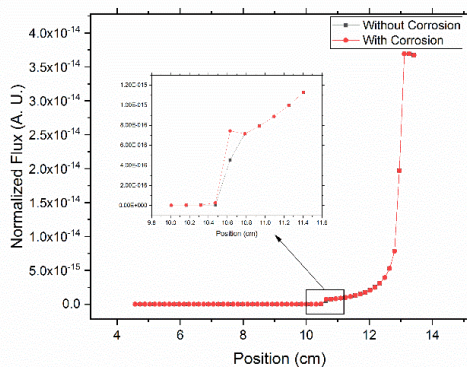
فوتون‌های پرتوی ایکس و گاما به صورت ویژوال درآمد. در شکل ۷ ترابرد ۲۰۰۰۰ از پرتوهای گسیل شده از چشمه‌های گوناگون از فانتوم مورد تست نشان داده شده است.

۳-۳ ترابرد فوتون‌های پرتوی ایکس و گاما

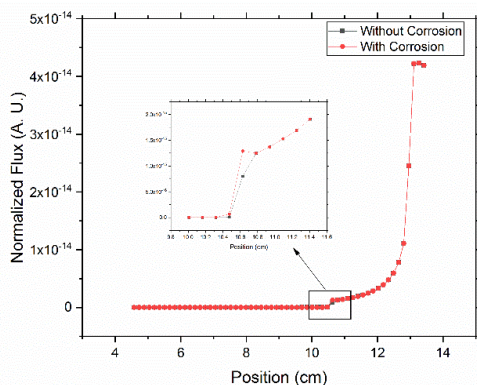
با استفاده از نرم افزار Xming بعنوان یک واسطه گرافیکی و با اعمال مش تالی روی سطوح مورد نظر، ترابرد



شکل ۷) ترابرد فوتون‌های پرتوی ایکس و گاما. الف) پرتوی ایکس 90 kV، ب) پرتوی ایکس 70 kV، ج) پرتوی گاما Ir-192، د) پرتوی گاما Co-60



شکل ۸) پروفایل خطی ثبت شده روی آشکارساز: پرتوی ایکس 70kV



شکل ۹) پروفایل خطی ثبت شده روی آشکارساز: پرتوی ایکس 90kV

همانگونه که از شکل ۷ استنتاج می‌شود، میزان فوتون‌های رسید به آشکارساز برای زمانی که از پرتوی ایکس با انرژی‌های پایین (زیر 100 kVp) استفاده شود به مراتب کمتر است. این انرژی‌ها برای بازرسی خود عایق بسیار مناسباند اما بعلت نفوذ کم در فلز دیواره خط لوله، نمی‌توانند کیفیت بالایی را برای مواد سنگین‌تر از خود نشان دهند. درحالی که برای پرتوی‌های گامای گسیل شده از رادیونوکلئیدهای ایریدیوم-192 و کبالت-60 به علت میانگین انرژی بالاتر، می‌توان مطابق انتظار مشاهده نمود که میزان فوتون‌های رسید به آشکارساز بسیار بیشتر می‌شوند. پراکندگی پرتوهای ایکس کم‌انرژی در عایق پلی‌اتیلن نیز همانطور که در شکل ۷ نشان داده می‌شود، قابل توجه است.

۳-۴ پروفایل ثبت شده روی آشکارساز

با عبور پرتوها از عایق و خط لوله در محدوده زاویه دید دکتور، فوتون‌ها روی آشکارسازها ثبت می‌گردند. در شکل‌های ۸ تا ۱۱ پروفایل خطی روی آشکارساز خطی برای زمانی که هیچ گونه خوردگی یا عیبی در خط لوله وجود ندارد در مقایسه با حالتی که در آن دیواره خط لوله به واسطه خوردگی نازک شده به ثبت رسیده است.

۴- نتیجه گیری

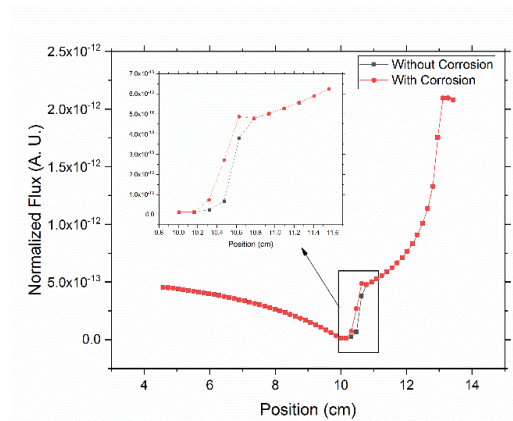
خوردگی زیر عایق یک چالش جدی در صنایع نفت و گاز است که نیاز به مدیریت دقیق و استفاده از روش‌های پیشرفته برای تشخیص، پیشگیری و کنترل دارد. با اتخاذ استراتژی‌های مناسب و استفاده از تکنولوژی‌های مدرن، می‌توان تأثیرات منفی این نوع خوردگی را به حداقل رساند و ایمنی و بهره‌وری خطوط لوله را افزایش داد. این نوع خوردگی می‌تواند تأثیرات عمده‌ای بر روی ایمنی، بهره‌وری و هزینه‌های عملیاتی داشته باشد. در این مقاله در ابتدا با استفاده از روش محاسباتی مونت کارلو در ترابرد پرتوهای یونیزان ایکس و گاما، میزان عبور پرتوها از ماده و ثبت آن روی آشکارسازها مورد مطالعه قرار گرفت. حد تفکیک ۵٪ برای حالات با و بدون عیوب خوردگی تعیین شد. همانگونه که مشاهده شد، برای فانتوم تست خط لوله فولادی با ضخامت ۶ میلی متر، پرتوهای ایکس ۷۰ و ۹۰ کیلوالکترون‌ولت نفوذ و در نتیجه کنتراست کمی را از خود نشان می‌دهند. پرتوی گامای کبالت-۶۰ به نسبت ایریدیوم-۱۹۲ کنتراست و تشخیص بهینه‌ای برای خوردگی زیر عایق از خود نشان داد. نتایج از عملکرد مناسب ارزیابی مونت کارلو در بهینه‌سازی انرژی و جنس مواد مورد ارزیابی غیرمخرب از خود نشان داد. پژوهش‌های آتی می‌تواند حول بررسی انواع آشکارسازهای مورد استفاده، استفاده از رادیوایزوتوپ‌های دیگر و میدان دیدهای مختلف را مورد بررسی قرار داد.

۵- تعارض منافع

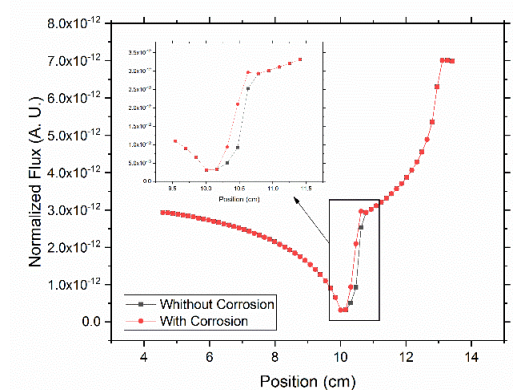
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع

- [1] Liao, K., Qin, M., Wang, M., Zhang, S., Wu, L., & Yang, N. (2023). Probing pipe flow impact corrosion monitoring effectiveness under corrosion monitor coupons conditions. *Fuel*, 353, 129288. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129288>.
- [2] Eltai, E. O., Musharavati, F., & Mahdi, E. (2019). Severity of corrosion under insulation (CUI) to structures and strategies to detect it. *Corrosion Reviews*, 37(6), 553–564. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0102>.



شکل ۱۰) پروفایل خطی ثبت شده روی آشکارساز: پرتوی گامای Ir-192



شکل ۱۱) پروفایل خطی ثبت شده روی آشکارساز: پرتوی گامای Co-60

ضابطه‌ای که برای صحت عملکرد سیستم در نظر گرفته شد، شامل حد تفکیک حداقل ۵٪ از سیگنال حالت مقایسه بین زمانی که خوردگی وجود دارد با زمانی که حالت پایه یا بدون خوردگی در دیواره خط لوله یا عایق آن در نظر گرفته شده است. همانگونه که از نمودارهای تصاویر شکل ۸ تا ۱۱ برمی‌آید، با مقایسه حالت‌های بدون عیوب سطحی خوردگی با حالت دارای خوردگی، برای پرتوهای ایکس ۷۰ kV و ۹۰ kV عملاً تفکیک بین حالات بدون خوردگی و با خوردگی بر روی پروفایل خطی امکانپذیر نیست. این به دلیل عدم ثبت تعداد فوتون‌های کافی به منظور ایجاد میزان سیگنال-به-نویز مناسب می‌باشد. همچنین بین چشمه‌های پرتویی گامای ایریدیوم-۱۹۲ و کبالت-۶۰، چشمه کبالت-۶۰ عملکرد بهتری را از خود در پروفایلگیری نشان می‌دهد.

- [3] Cao, Q., et al. (2022). A review of corrosion under insulation: A critical issue in the oil and gas industry. *Metals (Basel)*, 12(4), 561. <https://doi.org/10.3390/met12040561>.
- [4] Johansen, G. A., & Jackson, P. (2004). *Radioisotope gauges for industrial process measurements*. John Wiley & Sons.
- [5] Ewert, U., et al. (2016). Corrosion monitoring with tangential radiography and limited view computed tomography. *AIP Conference Proceedings*, 110003. <https://doi.org/10.1063/1.4940574>.
- [6] Oliveira, D. F., Nascimento, J. R., Marinho, C. A., & Lopes, R. T. (2015). Gamma transmission system for detection of scale in oil exploration pipelines. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 784, 616–620. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.030>.
- [7] Vassiliev, O. N. (2017). *Monte Carlo methods for radiation transport: Fundamentals and advanced topics*.
- [8] Waters, L. S., et al. (2007). The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code. In *AIP Conference Proceedings* (pp. 81–90). <https://doi.org/10.1063/1.2720459>.
- [9] Ay, M. R., Shahriari, M., Sarkar, S., Adib, M., & Zaidi, H. (2004). Monte Carlo simulation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C. *Phys Med Biol**, 49(21), 4897–4917. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/21/004>.
- [10] Cantatore, A., & Müller, P. (2011). *Introduction to computed tomography*. DTU Mechanical Engineering.
- [11] Kwong, J., & Langeveld, W. G. J. (2016). A noise spectroscopy detector array for non-intrusive cargo inspection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63(2), 516–523. <https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2527659>.