



اندازه‌گیری ضخامت باقیمانده جدار لوله‌ها در هنگام کار به روش پرتونگاری گاما

کاوه عدالتی، ناصر راستخواه^{*}، ابوظالب کرمانی، مسعود سیدی، امیر موافقی، علی شیرزادیان
مرکز تکنولوژی حفاظت و ایمنی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۹۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: تعیین میزان خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت باقیمانده جدار لوله‌ها دو عامل مهم در برآورد مدت کارکرد آنها است. آزمون فراصوتی متداولترین روش اندازه‌گیری ضخامت دیواره لوله می‌باشد. این روش، با وجود سادگی و سریع بودن، یک نوع آزمون اندازه‌گیری نقطه‌ای است که نیاز به برداشتن عایق از سطح لوله و آماده‌سازی سطحی دارد. آزمونهای پرتونگاری (روش مماسی و روش تحلیل چگالی نوری فیلم) روش‌های مهم دیگری در بررسی ضخامت باقیمانده لوله‌ها می‌باشند. در این کار پژوهشی، تغییر ضخامت لوله‌هایی به قطر ۲۷۰ میلی‌متر و به ضخامت ۷/۴ تا ۲۸/۵ میلی‌متر به وسیله پرتونگاری گاما با چشمه Ir-192 بررسی شده است. برای این منظور، تغییرات چگالی نوری فیلم‌های پرتونگاری شده، با ضخامتها و مقادیر پرتودهی مختلف مطالعه و روابطی بر پایه اصول تئوری و اندازه‌گیریهای تجربی عرضه شده است. نتایج این بررسیها نشان می‌دهد که کاهش ضخامت‌هایی به میزان ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد در لوله‌های بدون عایق و عایق‌دار تهی، یا حامل گاز را می‌توان اندازه‌گیری کرد. در این روش علاوه بر تعیین عمق خوردگی، مساحت مناطق خورده شده و نوع خوردگی نیز به وضوح قابل برآورد است.

واژه‌های کلیدی: خوردگی، لوله، امواج فراصوتی، پرتونگاری گاما، کدری

On-Line Thickness Measurement in Pipes by Gamma Radiography

K. Edalati, N. Rastkhah^{*}, A. Kermani, M. Seiedi, A. Movafeghi, A. Shirzadiyan
Nuclear Safety and Radiation Protection Technological Center, AEOL, P.O. Box: 14155-1399, Tehran - Iran

Abstract: Corrosion in the pipes and remaining wall thickness measurements are the major concern in the piping service lifetime. Ultrasonic is the most common tool in measuring the wall thickness of the pipes. Although the test is relatively simple and fast, but this method is a local point determining method which requires removal of insulation and local surface preparation. Radiography methods (tangential and density evaluation) are other techniques for thickness loss evaluation. In this investigation, the thickness profile of pipes, with 270 mm in diameter and 7.4-28.5 mm in thickness was determined by the radiograph density measurements and the use of an Ir-192 gamma source. Some formulas were derived and suggested in this respect by considering the optical density of radiographs in different thicknesses and exposures. It was concluded that thickness loss of 10, 20 and 50 percent of wall thickness, corrosion area and corrosion type in insulated and non-insulated gas carrying pipes can be detected by this method. Area of corrosion zone and corrosion type can also be shown in this technique.

Keywords: corrosion, pipe, ultrasonic waves, gamma radiography, opacity

۱- مقدمه

براده برداری شد تا قطعه‌ای با هشت پله، هریک به عرض ۳۰ میلی‌متر و به ضخامت‌های ۷/۴، ۱۰/۲، ۱۳/۱، ۱۶/۴، ۱۹/۴، ۲۲/۲، ۲۵/۶ و ۲۸/۵ میلی‌متر مطابق شکل ۱ ساخته شود، سپس به وسیله ماشین کاری به روش جرقه‌زنی در جدار داخلی هر پله سه سری سوراخ با قطرهای برابر با ضخامت پله و به عمق‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد ضخامت پله ایجاد شد. همچنین یک پخ به عمق ۱/۷ میلی‌متر در سطح خارجی لوله و در راستای طول آن ایجاد شد. پرتونگاری به وسیله دوربین گاما و با چشمه رادیوآکتیو Ir-192 به قدرت ۲۵ کوری که قطر کانونی موثر آن ۳/۵ میلی‌متر بود، صورت گرفت. فیلم، چشمه و لوله نسبت به یکدیگر به صورت دو دیواره تک تصویری (DWSI)^(۱) قرار داده می‌شدند (شکل ۲). برای کاستن اثر تفرق و بازتابش، از یک دیافراگم پرتو گاما استفاده شد، علاوه بر این، یک صفحه سربی در زیر لوله قرار داده می‌شد. از کلیه پله‌ها در وضعیت‌های متفاوت و با پرتوهای مختلف، پرتونگاری شد. برای بررسی تأثیر وجود عایق بر دقت روش، ابتدا لایه‌ای از پشم شیشه به ضخامت ۱۰ میلی‌متر، و سپس لایه‌ای لاستیکی به ضخامت چهار میلی‌متر بر سطح بلوک اعمال و از پله‌های مختلف پرتونگاری شد.

فیلم بکار رفته در این آزمایشها فیلم Kodak: AA400 و دمای ظهور آن ۲۱ °C بود. در محدوده چگالی نوری ۰/۵ تا ۰/۷، این فیلم از لحاظ چگالی نوری دارای رفتار خطی است. چگالی نوری فیلم‌ها پس از ظهور، به وسیله چگالی‌سنج‌های نوری X-Rite (برای چگالی‌های کمتر از ۴) و Wogan-D (برای چگالی‌های بیشتر از ۴) با دقت مطلق ۰/۰۲ و تکرارپذیری ۰/۰۱ اندازه‌گیری می‌شد.



شکل ۱- قطعه استوانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق

لوله‌ها مطمئن‌ترین و اقتصادی‌ترین وسیله انتقال مایعات و گازها در صنعتند، بنابراین، لازم است که در ضمن کارکردن از لحاظ خوردگی مورد بررسی قرار گیرند. متداول‌ترین روش جهت تعیین میزان خوردگی لوله‌ها اندازه‌گیری ضخامت باقیمانده آنها به روش امواج فراصوتی است. در این روش ضخامت لوله در چند نقطه از خط لوله اندازه‌گیری می‌شود. دقت اندازه‌گیری در این روش بستگی به شکل و نحوه خوردگی لوله دارد. این روش قادر به تعیین نوع خوردگی، وسعت آن و عیب‌های به وجود آمده در خط لوله نیست، علاوه بر این ضرورت دارد که عایق از سطح لوله برداشته شود.

در دو دهه اخیر با توجه به مشکلات این روش سعی شده است جهت کنترل خوردگی لوله‌ها به روش پرتونگاری طریقه‌هایی ارائه گردد. مهمترین نتیجه حاصل از این تلاشها، ارائه روش پرتونگاری مماسی است [۱ تا ۵]. در این روش با پرتوهای کناره‌های لوله ضخامت آن به طریقه فیزیکی بر روی فیلم اندازه‌گیری می‌شود، و اطلاعات مفیدی از چگونگی عایق، سطح خارجی و داخلی لوله و رسوبها بدست می‌آید و نیازی به برداشتن عایق از سطح لوله نیست. این روش در مورد لوله‌های حامل مایعات نیز به خوبی قابل استفاده است. مشکل عمده روش مماسی، طولانی بودن زمان پرتودهی است.

یکی دیگر از روشهای عرضه شده در این زمینه، تعیین ضخامت لوله به وسیله اندازه‌گیری چگالی نوری فیلم است [۶ تا ۱۱]. ظاهراً، تحقیقات کافی در این زمینه صورت نگرفته است و با توجه به نتایج موجود، امکان استفاده از این روش در صنایع اندک است. این مشکل، به دلیل بستگی چگالی نوری فیلم به نوع و شرایط ظهور آن، ابعاد و ضخامت لوله، وجود عایق در سطح لوله، رسوبات و محتویات درون آن، روش پرتونگاری، مقدار پرتودهی، همچنین وضعیت نقطه مورد بررسی بر روی فیلم همواره وجود دارد [۱ و ۱۱]. در این کار پژوهشی، امکان به کارگیری روش مورد نظر به صورت یک مدل ریاضی بررسی شده است.

۲- روش تحقیق

لوله‌ای به قطر خارجی ۲۷۰ میلی‌متر و به ضخامت ۲۸/۵ میلی‌متر از جنس فولاد «St-37» تهیه و از جدار داخلی آن

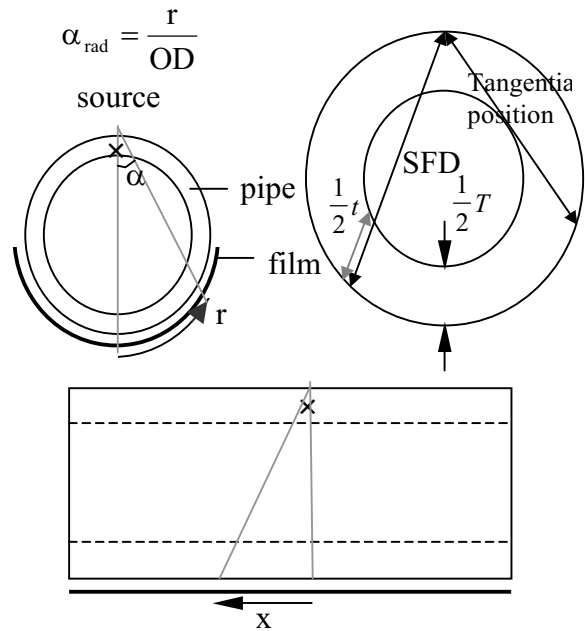
E_{eff} بر حسب کوری در دقیقه است. مقدار پرتودهی مؤثر در هر نقطه به وسیله رابطه (۳) با فاصله فیلم تا منبع (SFD) (۴) و ضریب انباشت B (۵) ارتباط دارد:

$$E_{eff} \propto E \cdot SFD^{-2} \cdot B \quad (3)$$

بنابراین، رابطه عمومی برای تعیین چگالی نوری فیلم‌های AA-400 در نقطه $x=0$ و $r=0$ (رجوع به شکل ۲) به صورت زیر است:

$$D = 900 \cdot E^{0.6692} \cdot SFD^{-1.3384} \cdot e^{-0.0320 \cdot t} \quad (4)$$

که در آن، ضخامت عبوری و SFD فاصله فیلم تا چشمه و برابر قطر لوله است. اثر ضریب انباشت هم در رابطه (۴) مستتر است (به مبنای محاسبات رجوع شود).



Double Wall Single Image Technique

شکل ۲- روند قرار گرفتن لوله، چشمه رادیوآکتیو و فیلم نسبت به یکدیگر و معرفی پارامترهای r و x و t و T و t_{max}

۳- بحث و نتیجه گیری

در شکل ۳ نمودارهای تغییرات چگالی نوری فیلم بر حسب ضخامت عبوری برای پرتودهی‌های مختلف ترسیم شده‌اند. چگالی نوری فیلم عبارتست از لگاریتم نسبت شدت نور وارد شده به فیلم به شدت نور خارج شده از آن و میزان پرتودهی برابر حاصلضرب فعالیت چشمه در مدت پرتودهی است. مشاهده می‌شود که چگالی نوری فیلم بر حسب ضخامت به صورت نمایی و بر اساس رابطه (۱) تغییر می‌کند:

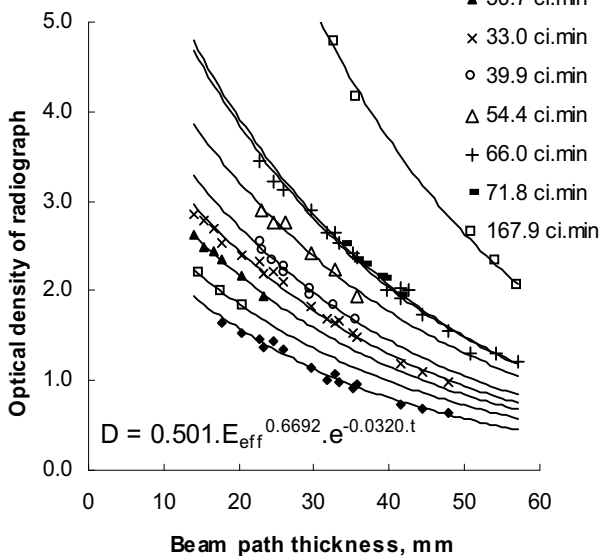
$$D = f(E) \cdot e^{-0.0320 t} \quad (1)$$

(جزئیات محاسبه در بخش مبنای محاسبات شرح داده شده است). در این رابطه D چگالی نوری فیلم در نقطه $r=0$ و $x=0$ ، مجموع ضخامت‌های دیواره بالایی و پایینی لوله بر حسب میلی‌متر و $f(E)$ تابعی وابسته به مقدار پرتودهی مؤثر در هر نقطه است.

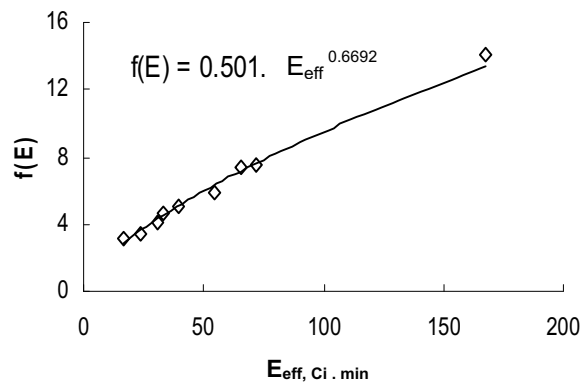
در شکل ۴ روند تغییرات پارامتر $f(E)$ بر حسب مقدار پرتودهی نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که رابطه (۲) در محدوده $f(E)$ و مقدار پرتودهی مؤثر (E_{eff}) برقرار است:

$$f(E) = 0.501 \cdot E_{eff}^{0.6692} \quad (2)$$

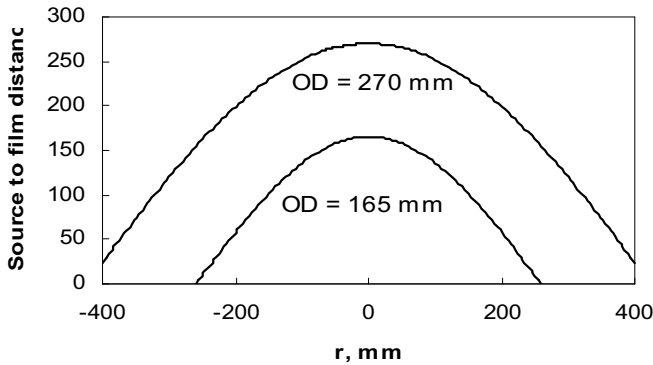
Subject: Pipe
Material: Steel St-37
Source: Ir-192
Film: AA-400
SFD=OD= 270 mm



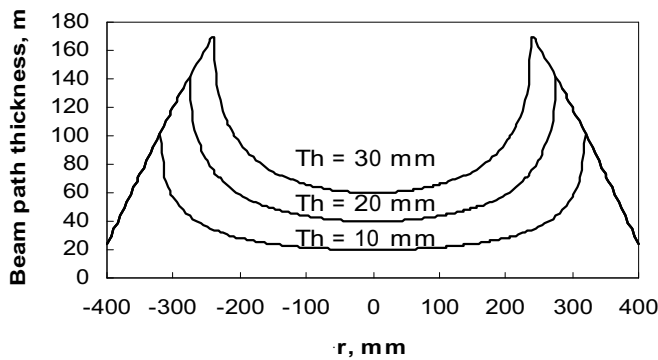
شکل ۳- نمودارهای تغییرات چگالی نوری فیلم بر حسب ضخامت عبوری در مقادیر مختلف پرتودهی



شکل ۴- نمودار تغییرات تابع $f(E)$ بر حسب شدت پرتودهی



شکل ۵- روند تغییرات فاصله فیلم تا منبع بر حسب r



شکل ۶- روند تغییرات ضخامت عبوری بر حسب r

که با وارد کردن یک ضریب کسینوسی در رابطه (۴) تأثیر این پارامتر تا حدودی تعدیل می‌شود. بنابراین رابطه کلی برای محاسبه چگالی فیلم‌های AA-400 به صورت زیر در خواهد آمد:

$$D = 900 \cdot \left(\cos\left(\frac{r}{OD}\right) \right)^{0.6692} \cdot E^{0.6692} \cdot SFD^{-1.3384} \cdot e^{-0.0320 \cdot t} \quad (7)$$

رابطه (۷) با جایگزین کردن SFD از رابطه (۵) به صورت زیر درمی‌آید:

$$D = 900 \cdot \left(\cos\left(\frac{r}{OD}\right) \right)^{-0.6692} \cdot E^{0.6692} \cdot OD^{-1.3384} \cdot e^{-0.0320 \cdot t} \quad (8)$$

بنابراین، می‌توان از رابطه (۸) ضخامت عبوری را حساب کرد و از رابطه (۶) ضخامت لوله را تعیین نمود. در مورد لوله‌های عایق‌دار، با در نظر گرفتن اندکی خطا، می‌توان از ضخامت عایق صرف‌نظر نمود و یا از ضخامت T حساب شده از رابطه (۶)، مقدار ضخامت معادل عایق را (در مقایسه با ضخامت فولاد) کم کرد. روابط به دست آمده را در مورد سایر منابع پرتوزا نیز می‌توان بکار برد، کفایت که در محاسبه میزان پرتوهای مؤثر، اثر فاکتور گاما (Γ)^(۷) در نظر گرفته شود.

در حالتیکه $r \neq 0$ و $x \neq 0$ باشد، $SFD \neq 0$ و $t \neq T$ خواهد بود. در این حالت، برای محاسبه چگالی نوری فیلم، باید مقادیر واقعی SFD و t حساب و در رابطه (۴) ملحوظ شوند. روند محاسبه SFD و t و روند اصلاح رابطه (۴) در ادامه مطلب شرح داده می‌شوند.

بر اساس نتایج این تحقیق، چنانچه فیلم به صورت پوسته‌ای به دور لوله پیچیده شود و عرض آن کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر باشد، تغییرات چگالی نوری آن بر حسب x قابل صرف‌نظر است ولی روند تغییرات سایر عوامل با تغییر r باید به صورتهای زیر در نظر گرفته شود:

الف- مقدار پرتودهی E برابر حاصلضرب فعالیت چشمه در مدت پرتودهی است و با تغییر r تغییر نمی‌کند.

ب- بر اساس محاسبات هندسی، فاصله فیلم تا چشمه (SFD) با افزایش r بر طبق رابطه (۵) افزایش می‌یابد:

$$SFD = OD \cdot \cos\left(\frac{r}{OD}\right) \quad (5)$$

که OD ^(۶) قطر خارجی لوله است، و در مورد لوله‌های عایق‌دار، باید ضخامت عایق دو طرف لوله در نظر گرفته شود. روند تغییرات فاصله فیلم تا منبع بر حسب r در شکل ۵ نشان داده شده است.

ج- بر اساس محاسبات هندسی، ضخامت عبوری t با افزایش r تا حد مماس، بر طبق رابطه (۶) افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر r ، مقدار آن کاهش می‌یابد، و این مطلب در شکل ۶ نشان داده شده است.

$$t = OD \cdot \cos\left(\frac{r}{OD}\right) - \sqrt{\left(OD \cdot \cos\left(\frac{r}{OD}\right)\right)^2 - 2 \cdot OD \cdot T + T^2} \quad (6)$$

در این رابطه، T مجموع ضخامتهای دیواره بالایی و پایینی لوله است. این رابطه تا جایی صادق است که محور مرکزی پرتو بر دیواره داخلی لوله مماس (زاویه مماسی) شود. در این حالت، ضخامت عبوری t برابر SFD است و از رابطه (۵) حساب می‌شود. نقاط برگشت در منحنی‌های شکل ۶ مبین زاویه مماسی می‌باشند. در مورد لوله‌های عایق‌پوش می‌توان به جای OD موجود در کمان، کسینوس قطر خارجی لوله عایق‌پوش را جایگزین و از سایر تغییرات صرف‌نظر کرد.

د- روند تغییرات ضریب انباشت B با تغییر مقدار r به آسانی قابل محاسبه نیست، ولی مشاهدات نویسندگان نشان می‌دهد

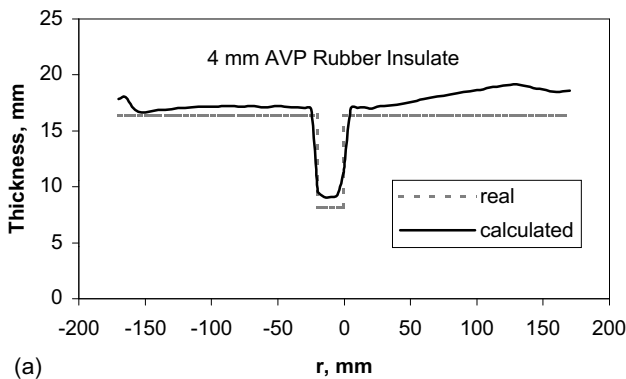


لازم به توضیح است که انجام چند بار عملیات پرتونگاری بر روی یک لوله ۲۰ اینچ (تقریباً ۵۱ سانتی متر) و با ضخامت ۱۰ میلی متر، بیانگر دقت مناسب رابطه (۸) درباره این لوله بود، ولی تعمیم این رابطه به لوله‌هایی با قطر بالاتر از ۱۰ اینچ نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

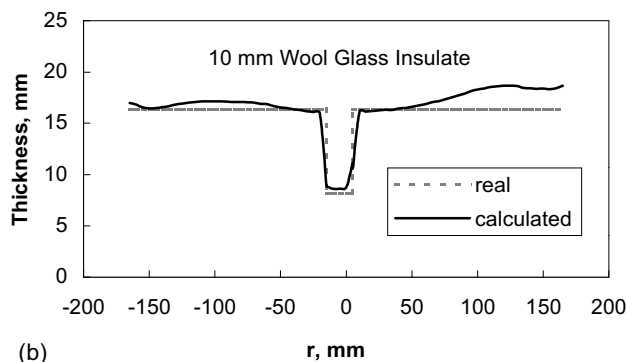
در شکل ۸ مقدار ضخامتهای حساب شده و واقعی در مورد لوله‌های عایق‌دار، بدون در نظر گرفتن ضخامت معادل عایق، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج، همخوانی خوبی با مقادیر واقعی به ویژه برای مقادیر پایین ۲ دارند؛ ولی مقدار واقعی کمتر از مقدار حساب شده است. با در نظر گرفتن ضخامت معادل عایق، این خطا تقلیل پذیر است.

۴- نتیجه گیری

در این کار پژوهشی، ضخامت باقیمانده و میزان خوردگی لوله‌های فولادی (با قطر خارجی ۲۷۰ میلی متر و ضخامت ۷/۴ تا ۲۸/۵ میلی متر) به وسیله تحلیل چگالی نوری فیلم‌های پرتونگاری بررسی شده است. برای این منظور، از گاما پرتونگاری (Ir-192) و روش دو جداره تک تصویری استفاده شده و روابط جدیدی در این زمینه عرضه شده است.



(a)

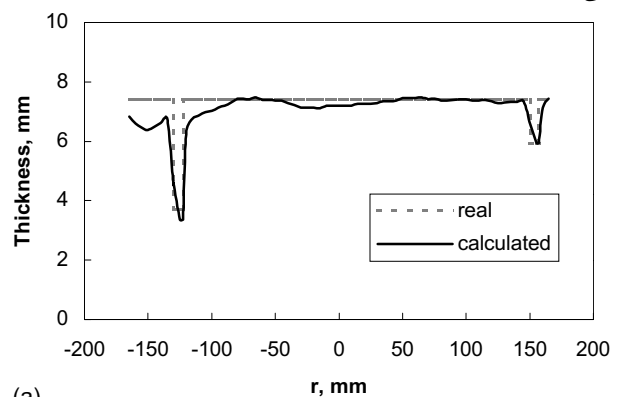


(b)

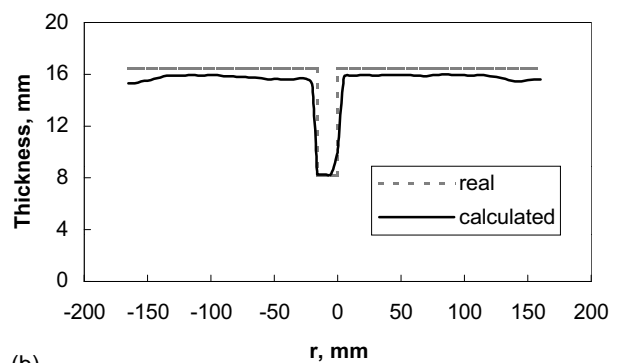
شکل ۸- ضخامتهای حساب شده در مقایسه با مقادیر واقعی در لوله‌های حاوی: (a) چهار میلی متر عایق لاستیکی از جنس AVP و (b) ۱۰ میلی متر عایق

پشم شیشه

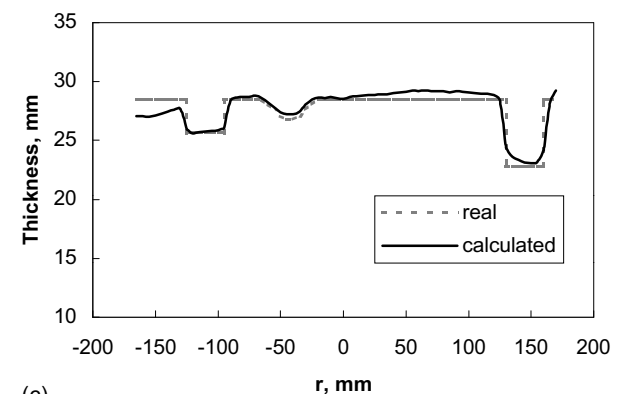
اندازه ضخامت پیش‌بینی شده با این مدل، در مقایسه با مقادیر واقعی برای لوله‌های بدون عایق در شکل ۷ نشان داده شده است، به طوری که ملاحظه می‌شود، تطابق قابل قبولی میان ضخامت واقعی و نتایج به دست آمده وجود دارد. قسمت عمده این تحقیق بر روی لوله‌هایی با قطر ۶ و ۱۰ اینچ انجام شده است، نتایج به دست آمده از ۱۰۰ فیلم پرتونگاری شده بیانگر حداکثر خطای دو میلی متر در اندازه‌گیری ضخامت می‌باشند. علاوه بر این، مشاهده شد که با افزایش ضخامت، خطای این روش نیز افزایش می‌یابد. در بررسی‌های دیگر نشان داده شد که با ایجاد چگالی نوری در حد ۱/۵ تا ۲/۵ در مرکز فیلم، دقیق‌ترین نتایج به دست می‌آیند.



(a)



(b)



(c)

شکل ۷- ضخامتهای حساب شده در مقایسه با مقادیر واقعی در لوله‌های بدون عایق



$$D \propto f(E) \propto E_{eff}^{\delta} \propto (E.SFD^{-2}.B.\Gamma)^{\delta}$$

E میزان پرتودهی، SFD فاصله فیلم تا منبع، B ضریب انباشت، Γ فاکتور گاما و δ نمای ثابتی است که از منحنی‌های مشخصه فیلم استخراج می‌شود. بنابراین رابطه چگالی نوری با عوامل پرتونگاری به این صورت است:

$$D \propto E^{\delta}.SFD^{-2.\delta}.B^{\delta}.\Gamma^{\delta}.e^{-\mu.t}$$

با توجه به آرایش پرتونگاری مورد استفاده در این تحقیق فرض شده است که:

$$B \propto \cos(\alpha).e^{n.t}$$

n ضریبی وابسته به مقدار انرژی پرتو و ضریب جذب جرمی ماده و α زاویه بین راستای پرتو و راستای تابش عمودی است. بنابراین رابطه کلی زیر برای محاسبه چگالی نوری فیلم به دست می‌آید:

$$D = k.E^{\delta} . (\cos(\alpha))^{\delta} . SFD^{-2.\delta} . \Gamma^{\delta} . e^{-(\mu-n\delta).t}$$

k ضریبی وابسته به حساسیت فیلم است. با توجه به این رابطه و نتایج تجربی به دست آمده در این تحقیق، روند تغییرات چگالی نوری فیلم بر حسب متغیرهای مورد مطالعه به وسیله درون‌یابی چند متغیره بررسی شد. بدین منظور از نرم افزار Origin استفاده شد و سه عامل k ، δ و n به روش درون‌یابی تعیین شدند.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و در قالب یک CRP با عنوان "تدوین پروتکلی جهت بررسی خوردگی و رسوبات در لوله‌های دارای قطر زیاد به وسیله پرتونگاری" [۵] انجام شده است؛ بدینوسیله از نهاد مذکور قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- DWSI: Double Wall Single Image
- ۲- D: Optical Density
- ۳- E_{eff} : Effective Exposure
- ۴- SFD: Source to Film Distance
- ۵- B: Build up Factor
- ۶- OD: Outside Diameter
- ۷- Γ : Gamma Factor

نتایج حاصل نشان می‌دهند که روابط به دست آمده دقت نسبتاً زیادی در تعیین ضخامت باقیمانده لوله‌های بدون عایق و عایق‌پوش دارند. این روش برای بازرسی لوله‌های حامل گازها قابل استفاده است و محدوده بازرسی آن در مقایسه با روش آزمون فراصوتی گسترده‌تر است. همچنین نوع خوردگی نیز در این روش قابل تشخیص است. محدودیت‌هایی نیز در این روش وجود دارند که عمده‌ترین آنها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- روابط به دست آمده برای لوله‌هایی با قطر خارجی ۶ تا ۱۰ اینچ دقت بالایی دارند ولی برای لوله‌هایی با قطرهای بیشتر ممکن است نیاز به اصلاح جزئی روابط داشته باشد. در لوله‌هایی که قطر خارجی آنها کمتر از ۶ اینچ است، این روش به علت ایجاد اثر نیم‌سایه قابل استفاده نیست.
- وجود مایع درون لوله، کیفیت فیلم را به شدت کاهش می‌دهد و به سبب جذب و تفرق پرتو در مایع، محاسبات را به طور قابل توجهی با اشکال مواجه می‌کند. لذا این روش در لوله‌های حامل مایعات قابل استفاده نیست.
- روابط به دست آمده، فقط در آرایش پرتونگاری بیان شده در این تحقیق (دو دیواره و تک تصویر) قابل استفاده هستند.
- اطلاعات به دست آمده از محاسبات، به مجموع ضخامت دیواره‌های بالا و پایین لوله مربوطند.

۵- مبنای محاسبات

شدت پرتو عبوری I از ماده‌ای به ضخامت t و ضریب جذب جرمی خطی μ به صورت رابطه زیر است:

$$I = I_0.e^{-\mu.t}$$

I_0 شدت اولیه پرتو است. در محدوده خطی فیلم‌های پرتونگاری صنعتی، چگالی نوری فیلم D متناسب با شدت پرتو دریافتی فیلم می‌باشد ($D \propto I$):

$$f(E) \propto I_0 \Rightarrow D = f(E).e^{-\mu.t}$$

$f(E)$ عبارتی متناسب با I_0 در نظر گرفته شده است. در نتیجه $f(E)$ با میزان پرتودهی مؤثر فیلم (E_{eff}) ارتباط دارد. با توجه به منحنی‌های مشخصه فیلم‌های پرتونگاری صنعتی می‌توان نوشت:



References:

1. S. Lee and Y. H. Kim, "Determination of pipe thickness using tangential radiography and film density-thickness correlation," IAEA Report, Syria (1999).
2. "Nondestructive Testing Handbook, Radiographic Testing," Vol.4, American Society for Nondestructive Testing Publication, USA (2002).
3. "Validation of protocols for corrosion and deposit evaluation in pipes by radiography," Draft Report of the First Co-Ordination Meeting, IAEA, Vienna, Austria, 4-8 Nov. (2002).
4. R. P. Krolicki, "Internal corrosion examination and wall thickness measurement of pipe by radiographic method," Materials Evaluation, **35(2)**, 32-33 (1997).
5. "Validation of protocols for corrosion and deposit evaluation in pipes by radiography," Internal Report of the second RCM of the CRP, IAEA, Istanbul, Turkey, 8-12 March (2004).
6. J. Rheinlander and H. Christiansen, "Using film density variations for determination of pipe thickness variation in gamma-ray radiography," Insight, **37(9)**, 691-694 (1995).
7. G. Kajiwara, "Examination of the X-ray piping diagnostic system using EGS4 (examination of the film and iron rust)," Proceedings of the Second International Workshop on EGS, Tsukuba, Japan, 199-208, 8-12 Aug. (2000).
8. P. Willems, B. Vaessen, W. Hueck, U. Ewert and U. Zsherpel, "Application of CR for corrosion and wall thickness measurements," Proceedings of the 7th ECNDT, Copenhagen, Denmark, 2774-2781 (1998).
9. Y. Onel, U. Ewert, P. Willems, "Radiographic wall thickness measurement of pipes by a new tomographic algorithm," Proceedings of the 15th WCNDT, Roma, Italy, paper No. **369**, (2000).
10. S. S. Lee, J. K. Lee and Y. H. Kim, "Study on quantitative thickness evaluation using film density variation in film radiography," Journal of Korean Society in Non-Destructive Testing, **19(5)**, 356-362 (1999).
11. S. S. Lee, "Thickness evaluation of pipes using density profile on radiographs," in 10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, Brisbane, Australia, 17-21 Sep. (2001).