

پایش میزان خوردگی در لوله‌های نفت و گاز با روش جریان گردابی پالسی با استفاده از کویل برگیر

رضا جوهری تیموری^۱، مهرداد کاشفی تربتی^۲، مصطفی میرجلیلی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد؛ Johary.reza@gmail.com

^۲ استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد؛ m-kashefi@um.ac.ir

^۳ دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد؛ mirjalili@um.ac.ir

چکیده:

اندازه‌گیری ضخامت دیواره‌ی داخلی در لوله‌های انتقال نفت و گاز جزو جدایی ناپذیر پایش خوردگی در این صنایع حساس و استراتژیک محسوب می‌شوند. از این رو چندین روش غیر مخرب برای اندازه‌گیری ضخامت لوله‌ها امروزه در این صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از میان این روش‌ها روش ادی‌کارنت به دلیل مزایای فراوانی که دارد در دنیا مورد توجه زیادی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی قابلیت روش جریان‌های گردابی پالسی به منظور پایش ضخامت لوله‌های انتقال نفت و گاز می‌باشد. در اکثر پژوهش‌های انجام شده‌ی پیشین در مورد ضخامت‌سنجی با روش پالس ادی‌کارنت، کاهش ضخامت در لوله‌ها با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری شبیه‌سازی شده است که اثرات زبری سطح و نیز تشکیل محصولات خوردگی و وجود اکسیدها بر روی جداره در این حالت مشخص نمی‌گردد، اما در این پژوهش کاهش ضخامت در لوله‌ها با روش پتانسیواستاتیک آندی انجام می‌پذیرد که اثرات زبری سطح و نیز تجمع محصولات خوردگی بر روی جداره‌ی لوله بر نتایج تاثیرگذار خواهد بود و کیفیت ضخامت‌سنجی در این حالت به واقعیت نزدیکتر خواهد بود.

کلمات کلیدی

پایش خوردگی، ضخامت‌سنجی، جریان گردابی، موج پالسی، غیر مخرب، نفت و گاز، لوله

Pulsed eddy current corrosion monitoring in oil and gas pipeline via cylindrical coil

Reza johari teymoori, Mehrdad kashefi., Mostafa mirjalili

ABSTRACT

Corrosion monitoring is one of the most important testing in oil and gas industries and NDT techniques play an important role in this field. Eddy current technique is one of the most reliable and cost saving techniques in this case. Wall loss testing with pulsed eddy current technique has been one of the most significant and important fields in NDT researching groups. In previous researches in the world, researchers calibrate the wall loss in corrosion with machining process but in our research we want to find out that if the roughness of the surface, originated from corrosion reaction and the accumulation of corrosion products have some effects on our testing or not. In our research, corrosion simulated with anodic polarization technique.

KEYWORDS

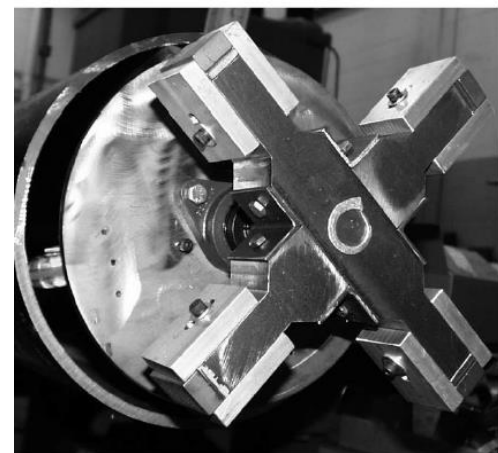
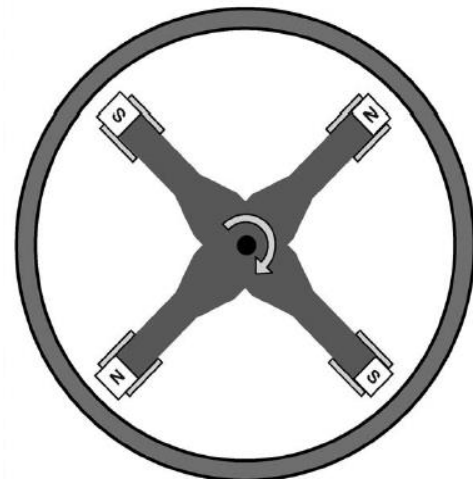
Corrosion, pipeline, Pulsed eddy current, wall thickness measurement, non-destructive testing

^۱ رضا جوهری تیموری، مشهد بلوار شهید صادقی، صادقی ۲، پلاک ۵، تلفن: ۰۹۱۵۳۲۱۱۹۴۷

ایمیل: Johary.reza@gmail.com

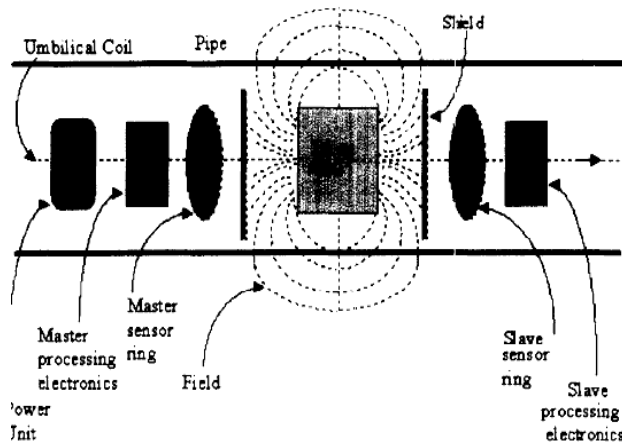
۱- مقدمه

خوردگی لوله‌ها و تاسیسات صنعتی همواره هزینه‌ی هنگفتی را در دنیا امروز به زیرساخت کشورها تحمیل می‌کند، لذا میزان تخریب این زیر ساخت‌ها و تاسیسات همواره باید مورد توجه، پایش و تست قرار بگیرد. در زمینه‌ی تست و بازرسی قطعات و تاسیسات صنعتی، تست‌های غیر مخرب نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این میان روش ادی‌کارنت همواره مورد توجه، تحقیق و بررسی قرار گرفته است. قابلیت استفاده از این روش در لوله‌های انتقال سیال به دلیل توانایی این روش در سنجش مشخصه‌های مختلف از روی پوشش و عدم نیاز آن به تماس فیزیکی با جداره‌ی لوله‌ها مزیت بسیار مهمی است که باعث محبوبیت هرچه بیشتر این روش شده است. از طرف دیگر استفاده از این روش تنها به تست کردن از روی لوله و از روی پوشش ختم نشده و از این روش برای عیب یابی در داخل لوله‌ها هم استفاده می‌گردد. شکل ۱ شمای انجام این تست به منظور عیب یابی از داخل لوله را نشان می‌دهد.



شکل (۱) انجام تست ادی کارنت در داخل لوله [۱]

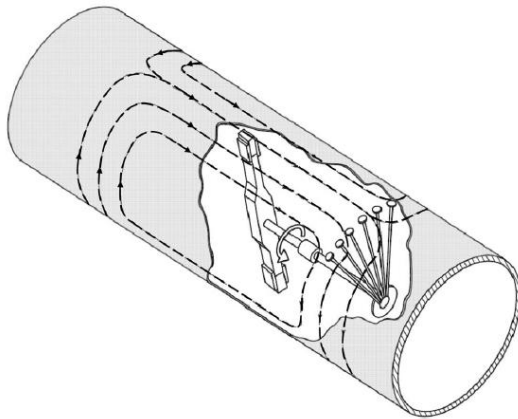
اساس روش جریان‌های گردابی به این صورت است که اگر از یک رسانای الکتریکی جریان متناوبی را عبور دهیم، میدان مغناطیسی در داخل و اطراف آن رسانا ایجاد می‌شود. میدان به وجود آمده در این حالت به میزان فرکانس جریان و پتانسیل عبور کرده از داخل سیم-پیچ مربوط خواهد بود و متناسب با آن این میدان مغناطیسی نیز تغییر خواهد کرد. اگر یک هادی دیگری این میدان را قطع نماید، جریان متناوبی در آن القا می‌گردد که به جریان گردابی موسوم است. این جریان، میدان مغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کند که با میدان اولیه مولد جریان گردابی مقابله می‌نماید. این پروسه، اساس کار تست ادی‌کارنت می‌باشد. میزان مقابله با میدان به وجود آمده در سیم‌پیچ اولیه مستقیماً با امپدانس و اندوکتانس سیم پیچ ثانویه در ارتباط است، در واقع با هر تغییر در قطعه همچون تغییر ریز ساختار، ضخامت، ترکیب شیمیایی، تنش موجود در قطعه و غیره، مشخصات امپدانس و اندوکتانس سیم پیچ ثانویه تغییر کرده و لذا مقدار القای ثانویه تغییر می‌کند. با بررسی و تحلیل بر روی این القای به وجود آمده که توسط سیم پیچ ثانویه دریافت می‌گردد می‌توان به ویژه‌گی‌های قطعه‌ی مورد نظر پی‌برد. شکل ۲ طریقه‌ی القای میدان در داخل یک لوله و نیز سنس کردن میدان ثانویه‌ی تولیدی در این حالت را نشان می‌دهد. [۲]



شکل (۲) طریقه‌ی القای میدان در داخل یک لوله و نیز سنس کردن میدان ثانویه‌ی تولیدی [۳]

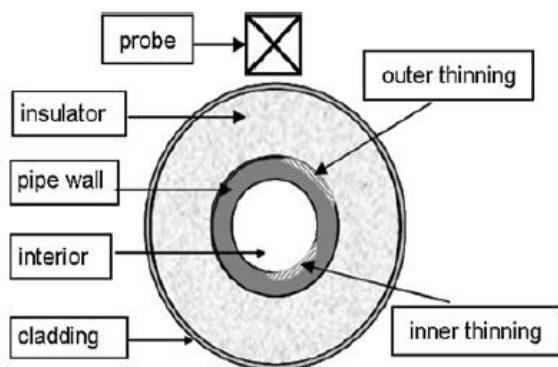
مقدار بیشینه و یا پیک ولتاژ، زمان رسیدن تا پیک ولتاژ و زمان رسیدن ولتاژ تا صفر سه پارامتر مهم در سنجش به روش جریان‌های گردابی می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده‌ی این پارامترها بر روی نمودار ولتاژ بر حسب زمان این تست است. [۴]

همکارانش^۲ با فرستادن یک آهنربای چرخان به داخل لوله و ایجاد میدان مغناطیسی با استفاده از این آهنربا و نیز اندازه گیری میدان تولیدی ثانویه در داخل جداره ی لوله، توانستند میزان خوردگی و عیوب به وجود آمده ناشی از سایش را در لوله ها اندازه گیری و ثبت کنند. شکل ۵ شمای انجام تست را برای نمونه های لوله ای شکل نشان می دهند .

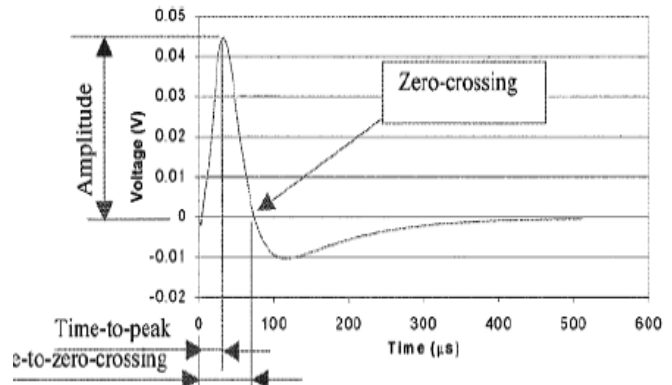


شکل (۵) طریقه ی اندازه گیری خوردگی و عیب سنجی برای نمونه های لوله ای شکل [۱]

و یا چنگ^۳ با استفاده از کوپل مدادی، مقدار ضخامت لوله های فولادی و نیز میزان ضخامت از دست رفته به واسطه ی خوردگی را از روی پوشش و لایه ی ایزوله با استفاده از روش ادی کارنت پالسی اندازه گیری کرده است. شمای اندازه گیری در این حالت در شکل ۶ آورده شده است.

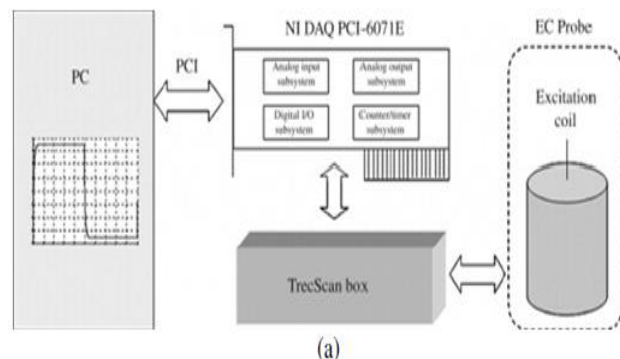


شکل (۶) شمای اندازه گیری ضخامت با کوپل مدادی برای لوله های دارای پوشش [۶]



شکل (۳) پارامتر های مهم در تست جریان گردابی با استفاده از نمودار ولتاژ بر حسب زمان

در روش ادی کارنت، ولتاژ به صورت یک موج مورد استفاده قرار می گیرد و توسط سیم پیچ اولیه وارد قطعه می شود، بنابراین شکل این موج بسیار دارای اهمیت می باشد. استفاده از موج سینوسی در روش ادی کارنت بسیار مرسوم بوده و محققان زیادی نمونه های خود را با استفاده از این موج مورد تست و بررسی قرار داده اند. استفاده از این موج بسیار کارآمد می باشد اما عمق نفوذ آن در داخل قطعات کم و در حد تست های زیر سطحی می باشد. اما جدیدترین تحقیقات در جهان بر روی ادی کارنت با پالس مربعی انجام گرفته است. استفاده از موج مربعی به دلیل داشتن توان نفوذ بالاتر این امکان را به روش ادی کارنت می دهد که بتواند عمق های بیشتری را در قطعات مورد تست و بازرسی قرار دهد. برای مثال در زمینه ی سنجش خوردگی در ورق ها، آلومین و همکارانش^۱ با استفاده از این روش و ایجاد خوردگی در ورق های فولاد ساده ی کربنی با پوشش های مختلف توانستند مقدار تخریب پوشش و نیز میزان خوردگی در نمونه های بدون پوشش را مورد بررسی قرار دهند. شکل ۴ چیدمان دستگاه اندازه گیری خوردگی با روش ادی کارنت پالسی مورد استفاده توسط این محقق را نشان می دهد.



شکل (۴) ستاپ دستگاه اندازه گیری خوردگی ورق با استفاده از روش پالسی مربعی [۵]

۱- Mohammed Alamin, Gui Yun Tian, Adrian Andrews, and Paul Jackson
 ۲- J. Bruce Nestleroth, Richard J. Davis
 ۳- Weiyang Cheng

اما در زمینه ی سنجش میزان خوردگی در داخل و یا خارج لوله ها تحقیقات کمتری صورت گرفته است در این میان نستلروس و

یکی در داخل کویل قرار داده و از فاکنکشن ژنراتور جهت تولید پالس مربعی استفاده می‌کنیم، سیگنال‌های تحریک جهت القاء مغناطیسی وارد سیم پیچ اولیه می‌گردد و در نهایت سیگنال القا شده به یکی از کانال‌های کارت اسکوپ داده می‌شود و با اتصال کارت اسکوپ به کامپیوتر می‌توان سیگنال تولیدی را ذخیره و در مراحل بعدی، فرآیند تحلیل سیگنالی را انجام داد [۷]. شکل ۷ نمونه‌های تولید شده برای کالیبراسیون ادی‌کارنت را نشان می‌دهد. فرکانس کاری در این تست مقدار ۳۳۴ HZ و مقدار پتانسیل تحریک اعمالی به سیم پیچ اولیه ۱،۳۷ می‌باشد.



شکل (۷) نمونه‌های تولید شده برای کالیبراسون ادی‌کارنت

۳. بحث و نتیجه‌گیری:

پس از قرار دادن تمام نمونه‌ها در داخل سیم‌پیچ و انجام تست بر روی آن‌ها و رسم نمودار ولتاژ بر حسب زمان، مقادیر پیک ولتاژ، زمان تا رسیدن به پیک و نیز زمان تا صفر شدن ولتاژ، به صورت جدول ۱ از داده‌های حاصله از سیم‌پیچ ثانویه استخراج گردید.

جدول (۱) پارامترهای مغناطیسی مهم استخراج شده از نمودارهای ولتاژ بر حسب زمان

عنوان	نمونه با ضخامت ۴/۵۰ میلی‌متر	نمونه با ضخامت ۳/۷۵ میلی‌متر	نمونه با ضخامت ۳/۵۰ میلی‌متر	نمونه با ضخامت ۲/۷۵ میلی‌متر	نمونه با ضخامت ۲ میلی‌متر
مقدار پیک ولتاژ (mv)	۱۹۸۲۶	۱۹۸۲۶	۱۹۸۲۶	۱۹۸۲۶	۱۹۸۲۶
زمان تا پیک ولتاژ (μs)	۳۵۶۳۰	۲۲۰۳۰	۱۵۵۸۰	۲۸۷۵۰	۱۷۸۵
زمان تا صفر شدن ولتاژ (μs)	۳۷۳۴۰	۲۳۵۸۰	۱۷۲۱۰	۳۰۴۳۰	۱۸۷۰

معنادار در رابطه با ضخامت سنجی با این ستاپ آزمایشگاهی رسید. شکل ۸ نشان دهنده‌ی این دو نمودار می‌باشد.

استفاده از کویل‌های مدادی به واسطه‌ی داشتن سطح کم و سنجش در یک مساحت ناچیز نسبت به کل دیواره‌ی لوله، سنجشی به صورت موضعی بوده و نمی‌تواند نماینده‌ی کل ضخامت لوله باشد. اما در روش پیش‌رو استفاده از کویل برگیر باعث خواهد شد، کویل تمام نمونه را در خود گرفته و سنجش انجام می‌گردد و نیز روش جریان گردابی پالسی برای اندازه‌گیری میزان خوردگی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این حالت به دلیل اینکه کویل کاملاً مطابق با شکل لوله می‌باشد، خطای روش پیشین مشاهده نخواهد شد و از طرف دیگر مزایای کامل روش جریان گردابی پالسی در این حالت کاملاً وجود دارد. نکته‌ی دیگری که در این پژوهش به دنبال آن هستیم این است که آیا وجود محصولات خوردگی و نیز زبری سطحی حاصل از خوردگی، تأثیری در خروجی روش ادی‌کارنت ایفا می‌کند و یا تأثیر چندانی ندارد که در ادامه به این موضوع هم پرداخته خواهد شد.

۲. روش تحقیق:

به منظور سنجش میزان خوردگی ایجاد شده در نمونه $\frac{7}{8}$ های لوله‌ای شکل، ابتدا باید تست ادی‌کارنت کالیبره گردد. برای این منظور یک لوله با قطر اینچ با گرید نفت و گاز تهیه گردید و نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطرهای داخلی ۲/۷۵، ۳/۲۵، ۳/۵۰، ۴ و ۴/۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر تهیه گردید و یک کویل برگیر نیز با قطر داخلی منطبق بر قطر خارجی نمونه‌ها، بر روی یک دوک از جنس ABS طراحی و سوار شد. پس از تهیه‌ی نمونه‌ها و طراحی و ساخت کویل، نمونه‌ها را یکی

با توجه به جدول ۱، پارامتر مقدار پیک ولتاژ در تمام تست‌ها یکسان بوده و تفاوتی نکرده است، اما پارامترهای زمان تا رسیدن به پیک و زمان تا صفر شدن ولتاژ در تست‌ها تغییرات معناداری را نشان می‌دهد. با رسم نمودار زمان تا پیک ولتاژ و یا زمان تا صفر شدن ولتاژ بر حسب ضخامت نمونه‌ها می‌توان به یک رابطه‌ی ریاضی

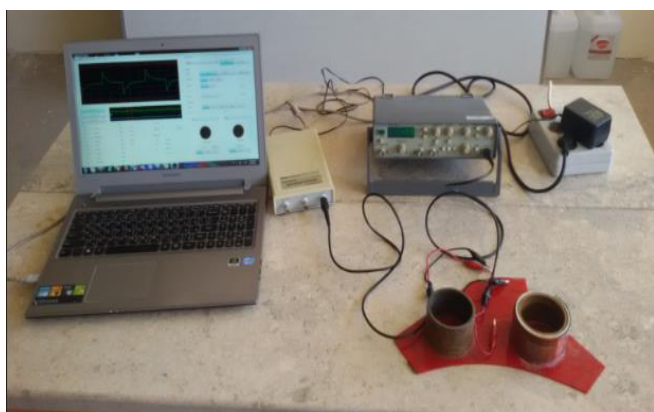
دومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، ۲۷ آذر ماه ۱۳۹۳، تهران، ایران

۰/۰۲ میلی‌متر انجام گرفته است). شکل ۹ نشان دهنده‌ی این دو نمونه بعد از خوردگی می باشد. وجود محصولات خوردگی در این نمونه‌ها مشهود می‌باشد.



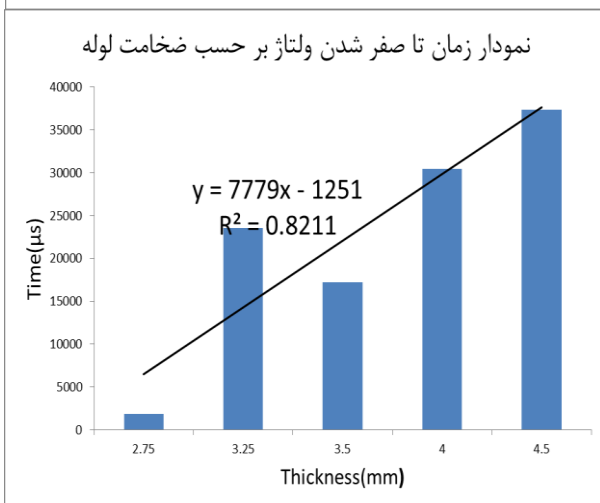
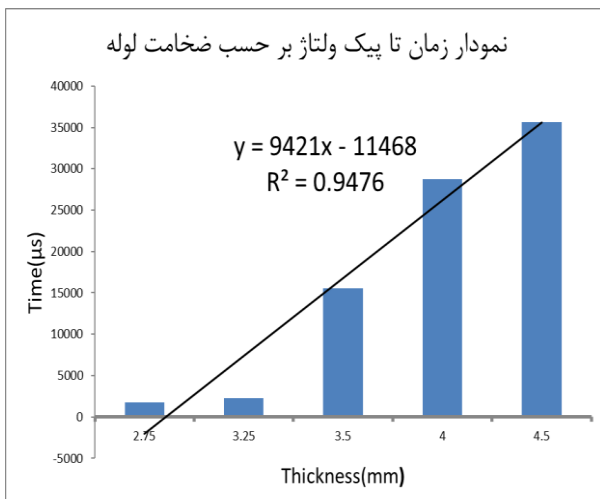
شکل (۹) دو نمونه‌ی لوله‌ای بعد از اعمال خوردگی توسط روش پتانسیواستاتیک آندی

این نمونه‌ها سپس در داخل کویل قرار گرفت و دیتاهای مورد نیاز با بهره‌گیری از ستاپ شکل ۱۰ از سیم‌پیچ ثانویه جمع‌آوری شد.



شکل ۱۰ ستاپ تست ادی کارنت برای اندازه‌گیری میزان خوردگی در نمونه‌های لوله‌ای شکل

با رسم داده‌های به دست آمده از این روش و مشخص شدن مقدار زمان تا رسیدن به مقدار پیک ولتاژ و نیز با قرار دادن مقدار زمان تا پیک ولتاژ برای این دو نمونه در رابطه‌ی ریاضی حاصل شده از جداول شکل ۸، مقدار ضخامت جداره‌ی لوله‌ها پس از خوردگی، تخمین زده شد. جدول ۲ مقادیر استخراج شده از نمودار ولتاژ بر حسب زمان و نیز مقادیر دقیق و تخمین زده شده با روش ادی کارنت را نشان می‌دهد.



شکل (۸) نمودارهای زمان تا پیک ولتاژ و زمان تا صفر شدن ولتاژ بر حسب ضخامت تست شده

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود پارامتر زمان رسیدن به پیک ولتاژ، پارامتر دقیق تری در زمینه‌ی سنجش ضخامت لوله‌ها می‌باشد بنابراین برای سنجش میزان خوردگی در لوله‌ها نهایتاً از این پارامتر استفاده خواهد شد.

پس از کالیبره کردن سیستم تست ادی کارنت با استفاده از نمونه‌های تهیه شده نوبت به سنجش میزان خوردگی در لوله‌ها می‌رسد. در این قدم از انجام این پژوهش، دو نمونه با ضخامت ۴/۵۰ میلی‌متر را تهیه کرده و این دو نمونه را با استفاده از روش پتانسیواستاتیک آندی به میزان ۲ ولت و جریان ۸ آمپر در محلول ۲ مولار HCl دچار خوردگی می‌کنیم. در محلول ۲ مولار HCl به دلیل وجود یون Cl^- در داخل محلول لایه‌ی پسیو به وجود آمده ناشی از خوردگی پایدار نبوده و دچار شکستگی می‌گردد و هیچ لایه‌ی اکسید محافظت کننده بر روی نمونه تشکیل نشده لذا در این حالت نمونه به صورت اکتیو شروع به خوردگی شدید می‌کند [۸]. یکی از این دو نمونه تا ضخامت دیواره‌ی ۴/۳۰ و نمونه‌ی دیگر تا ضخامت ۴/۱۰ دچار خوردگی شدند (اندازه‌گیری ضخامت به وسیله‌ی کولیس با دقت

جدول (۲) مقایسه‌ی اعداد واقعی و تخمینی با روش جریان گردابی پالسی

عنوان	زمان تا پیک ولتاژ (μ s)	ضخامت تخمینی حاصل شده از پارامتر زمان تا پیک ولتاژ (mm)	ضخامت واقعی (mm)
نمونه‌ی خورده شده تا ضخامت ۴/۱۰ میلی‌متر	۲۹۷۸۰	۴/۳۰	۴/۱۰
نمونه‌ی خورده شده تا ضخامت ۴/۳۰ میلی‌متر	۳۸۹۱۰	۵/۳۰	۴/۳۰

نتیجه گیری:

- ۱- روش جریان‌های گردابی پالسی یک روش ساده و در عین حال قابل اطمینان برای سنجش میزان کاهش ضخامت لوله‌ها ناشی از خوردگی و سایش می‌باشد.
- ۲- وجود محصولات خوردگی بر روی سطح لوله به واسطه مغناطیسی بودن بعضی از این محصولات و نیز زبری سطح ناشی از بروز خوردگی باعث به وجود آمدن خطا در نتایج تست ادی کارنت پالسی می‌گردد. برای حل این مشکل استفاده از یک ضریب تصحیح ۰/۸۷ در نتایج به دست آمده از تست ادی کارنت برای کاهش خطا توصیه می‌گردد.
- ۳- استفاده از روش ماشین کاری برای شبیه سازی خوردگی در لوله‌ها باعث بروز خطا در تست خواهد شد.
- ۴- در روش جریان گردابی پالسی زمان تا پیک ولتاژ و زمان تا صفر شدن ولتاژ با تغییر ضخامت، تغییرات منطقی را دنبال کرده و لذا می‌تواند به عنوان یک پارامتر برای تشخیص ضخامت لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

۴. مراجع:

۱. J.Bruce Nestleroth, R.J.D., *Application of eddy currents induced by permanent magnets for pipeline inspection*. NDT&E International, ۲۰۰۷. ۴۰: p. ۸.
۲. مهدی فتحی، کاوه عدالتی، ضخامت سنجی با استفاده از آزمون غیر مخرب جریان‌های گردابی و مقایسه با نتایج حاصل از روش‌های التراسونیک و رادیوگرافی-اولین کنفرانس بین المللی بازرسی فنی و تست‌های غیر مخرب آبان ۱۳۸۶
۳. Declan Robinson, B.T., Loughborough LEI I ۳GR, UK, *Identification and sizing of defects in metallic pipes by remote field eddy current inspection*. Trenchless Technol. Res, ۱۹۹۸. ۱۳: p. ۱۱.
۴. M. S. Safizadeh, M.H., *Gas Pipeline Corrosion Mapping Using Pulsed Eddy Current Technique*. Advanced Design and Manufacturing Technology, ۲۰۱۱. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
۵. Mohammed Alamin, G.Y.T., Adrian Andrews, and Paul Jackson, *Principal Component Analysis of Pulsed Eddy Current Response from Corrosion in Mild Steel*. IEEE SENSORS JOURNAL, ۲۰۱۲. ۱۲: p. ۶.
۶. Cheng, W., *Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes wall-thinning Through Insulation and Cladding*. J Nondestruct Eval, ۲۰۱۲: p. ۱۰.
۷. حسینیان، کاربرد آزمون جریان گردابی گذرا جهت تست ضخامت سنجی مقاطع. دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۸۸.
۸. M.F. Montemor, A.M.P.S., M.G.S. Ferreira, *Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques*. Cement & Concrete Composites, ۲۰۱۳. ۲۵: p. ۱۲.

دومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، ۲۷ آذر ماه ۱۳۹۳، تهران، ایران