

شبیه‌سازی مکانیزم آزمایش خوردگی، تعیین و تشخیص میزان خوردگی لوله‌های گاز از روی عایق با به کارگیری آزمون غیر مخرب جریان گردابی گذرا

میرسعید صفی‌زاده و مسعود حسینیان*

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مکانیک

Hasanian82@gmail.com

پژوهش‌نفت

سال بیستم

شماره ۶۳

صفحه ۱۱-۳، ۱۳۸۹

چکیده

صنایع نفت و گاز به دلیل پدیده خوردگی در سیستم‌های مکانیکی خود، متحمل هزینه‌های زیادی می‌شوند. یافتن روش‌هایی برای تعیین زمان خوردگی، می‌تواند در سه بعد اقتصادی، ایمنی و کاهش ضایعات تأثیرگذار باشد. در این تحقیق روش آزمون جریان گردابی گذرا به عنوان یک روش آزمایش غیر مخرب خوردگی لوله‌های گاز غیر مدفون پیشنهاد شده و قابلیت‌های این روش در تعیین و تشخیص خوردگی در لوله‌های گاز، بدون نیاز به جدا کردن عایق از روی لوله نشان داده شده است. لذا با توجه به اصول اولیه آزمون جریان گردابی گذرا، آزمایش جریان گردابی گذرا بر روی لوله به همراه مکانیزم تست، توسط نرم‌افزار Maxwell شبیه‌سازی شد. نتایج آزمایش تعیین خوردگی بر روی لوله گاز عایق‌دار حاکی از قابلیت آزمون جریان گردابی گذرا در تشخیص خوردگی لوله‌های گاز می‌باشد. در صورت به کاربردن پروب‌هایی با توانایی دریافت ولتاژ بیشتر، میزان خطا تا حدود ۳ الی ۴ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خوردگی لوله، آزمون غیر مخرب جریان

گردابی گذرا، تحلیل سیگنالی، نرم‌افزار ماکسول

مقدمه

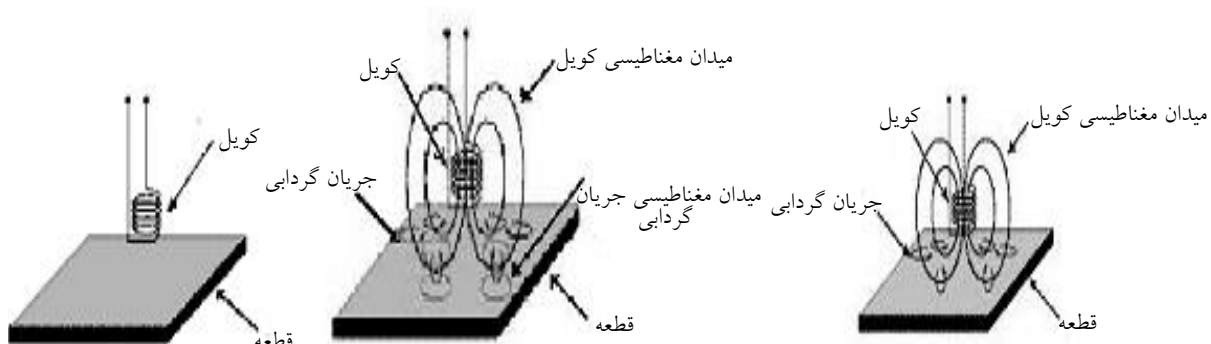
آزمون غیر مخرب^۱، به کارگیری علم و تکنولوژی است که بدون بر هم زدن شرایط موجود اجزای سازه‌ای، امکان آزمایش و بررسی آنها را فراهم می‌کند.

معایبی که به شکست منجر می‌شوند، ممکن است قبل از ساخت قطعات و اجزا در مواد خام وجود داشته باشند. هم چنین در طول فرایندهای تولید مثل شکل‌دهی، خمش، ایجاد سوراخ، ماشین‌کاری و عملیات حرارتی ممکن است این معایب در قطعه ایجاد شوند. یکی از اهداف آزمون‌های غیر مخرب، شناسایی نقایص در محل اولیه تولید، کار و سرویس‌دهی است. آزمون‌های غیر مخربی که در مراحل مختلف تولید انجام می‌شود معمولاً نگرانی

استفاده در سیستم PEC نسبت به ET بالاتر است. همچنین میزان نفوذ در PEC نسبت به ET حدود ده برابر می باشد و به فرکانس های پایین تری نیاز است که حداکثر آن باید ۱۰۰ Hz باشد [۳]. اساس این روش براساس ایستایی جریان های گردابی (ادی) در اجسام هادی که توسط یک کویل به وجود می آید استوار است. بعد از قطع این جریان، تغییرات بزرگ الکترو مغناطیسی در قطعه به وجود می آید. این تغییرات، میدان جریان ادی را در میدان با رسانایی غیر صفر تولید می کند. براساس قانون لنز، جهت جریان های ادی مخالف جهت تغییرات میدان است. میدان جریان های ادی باید شبیه میدانی باشد که توسط جریان اولیه ایجاد شده است. میدان ایجاد شده توسط جریان، مشابه میدان تولید شده با کویل خواهد بود. به دلیل عدم وجود منبع تغذیه در قطعه، جریان افت خواهد کرد. میدان الکترومغناطیسی تولیدی به زمان وابسته است. به دلیل تغییرات میدان حاصل از جریان ادی با زمان، جریان گردابی دیگر در قطعه به وجود خواهد آمد. اثر این پدیده منجر به انتشار جریان ادی به سوی پایین قطعه آزمایش می شود. نرخ تغییرات جریان گردابی شامل اطلاعات ضخامت قطعه است. متأسفانه نرخ زوال جریان ادی نیز وابسته به متوسط این تغییرات و پارامترهای کویل می باشد.

شکل ۱، نحوه ایجاد جریان و میدان مغناطیسی القایی یک سیم پیچ در قطعه آزمایشی فرومغناطیس را نشان می دهد [۴]. عملکرد سیستم PEC مطابق با شکل ۲ به مراحل که براساس ولتاژ کویل های گیرنده تقسیم بندی شده است، مشخص می شود.

بعدی قطعات و مواد به خصوص در موارد حساس مانند هواپیما یا نیروگاه ها را کاهش می دهد [۱]. یکی از روش های مختلف آزمون غیر مخرب که از اصول الکترومغناطیس پیروی می کند، آزمایش جریان های گردابی (ادی) است که استفاده از آن هر روزه فراگیرتر می شود. استفاده از روش آزمون جریان گردابی گذرا^۱ در آزمایش مواد، به سال ۱۹۷۱ باز می گردد و در زمینه انرژی اتمی نیز استفاده شده است. استفاده از این روش با رشد تکنولوژی نیز افزایش چشم گیری داشته ولی هنوز به صورت تجاری در نیامده است. از مزایای مهم این روش نفوذ بیشتر، توانایی تشخیص ناپیوستگی در قطعات هواپیما و در هنگام پرواز می باشد. مزیت اصلی این روش در اندازه گیری در لوله ها و ورق های نازک مثل عملیات پوشش دهی، شناسایی ترک های ریز داخل قطعه و خصوصاً خوردگی است [۲]. از جمله تفاوت های آزمون جریان گردابی گذرا (PEC) با آزمون جریان گردابی (ET) این است که در روش ET، قطعه توسط یک میدان مغناطیسی تک فرکانس تحریک می شود ولی در PEC قطعه توسط یک میدان مغناطیسی گذرا تحریک می شود. مزیت PEC، محصولی به صورت یک پالس زودگذر با یک طیف حجمی فرکانس از جریان DC با میزان ۱۰۰ کیلوهرتز می باشد. موج مورد استفاده در ET، موج پیوسته سینوسی است. به بیان دیگر عرض باند مورد استفاده در روش ET کوچک است. در روش PEC فرکانس ها در محدوده بیشتری قرار دارند. این عرض با طول پاس نسبت عکس دارد که امکان کار با سیستم چند فرکانس را به وجود می آورد و به بیان دیگر ولتاژ مورد



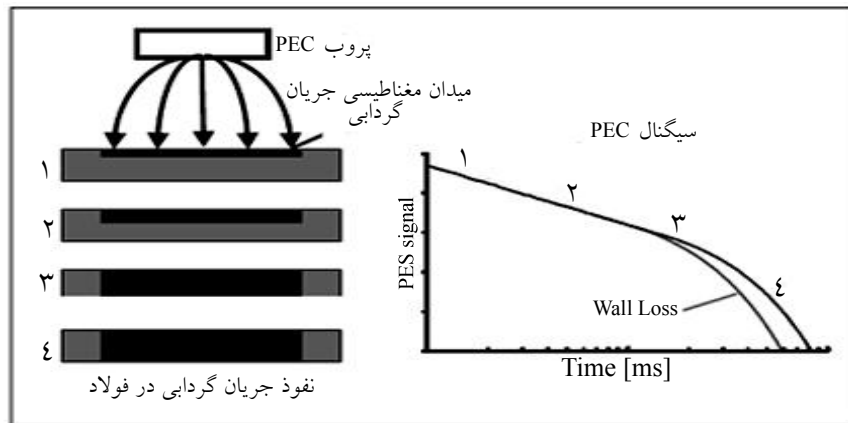
شکل ۱- نحوه ایجاد جریان و میدان مغناطیسی القایی یک سیم پیچ در قطعه آزمایشی فرومغناطیس [۴]

می‌آورد. مانند هر روش دیگر، آزمون PEC نیز معایبی دارد که با توجه به کاربرد اصول مغناطیسی تنها قادر به بازرسی مواد رسانا است و پروب باید به سطح دسترسی داشته باشد و همچنین آموزش و مهارت در این روش نسبت به دیگر روش‌ها بیشتر احساس می‌شود [۴]. تغییرات فاصله بین پروب و نمونه مورد آزمایش که باعث تغییر ظرفیت القاء مغناطیسی می‌شود را Lift-off می‌نامند [۶].

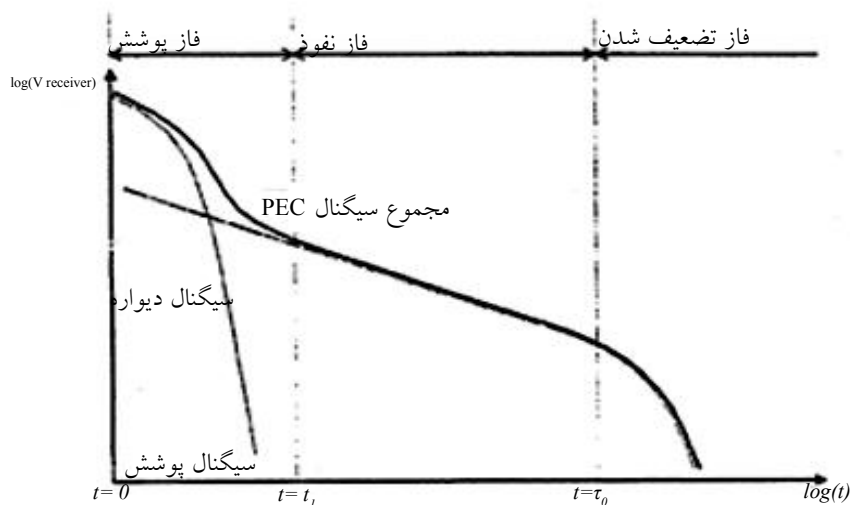
عوامل تأثیرگذار در PEC عبارتند از:

- ۱- پیک دامنه نمودار دریافتی
 - ۲- زمان رسیدن به پیک دامنه
 - ۳- زمان عبور از مقدار صفر نمودار
- بزرگی (حجم مقدار) پیک دامنه متناسب با میزان کاهش فلز است و در حقیقت پیک دامنه به موقعیت و اندازه عیب وابسته است [۷].

در سیگنال PEC، انطباق^۱ از دو منبع روکش عایق و دیواره لوله، میدان‌های مغناطیسی تولید شده مشاهده می‌شود. در این دو قطعه میدان مغناطیسی کل می‌تواند به صورت خطی جمع شود. دامنه سیگنال روکش نسبت به سیگنال دیواره لوله بلندتر است زیرا به پروب نزدیک‌تر است. زوال سیگنال روکش نسبت به دیواره سریعتر است چون ضخامت روکش نسبت به ضخامت لوله بسیار کمتر است (شکل ۳). روش نوین PEC، نسبت به دیگر روش‌های تست غیر مخرب مزایایی دارد که می‌توان به نفوذ بیشتر در تشخیص ناپیوستگی‌ها، بررسی لوله‌ها و ورق‌های نازک اشاره کرد. همچنین به دلیل این‌که در روش PEC، فرکانس‌ها در محدوده بیشتری قرار دارند، شناسایی دقیق عیوب و ثبت کلیه اطلاعات پردازش عیوب نسبت به اندازه و مکان، قابلیت ارزیابی و مقایسه با آزمایش انجام شده قبلی را فراهم



شکل ۲- نمودار نتایج سیستم PEC روی نمونه آزمایش [۵]



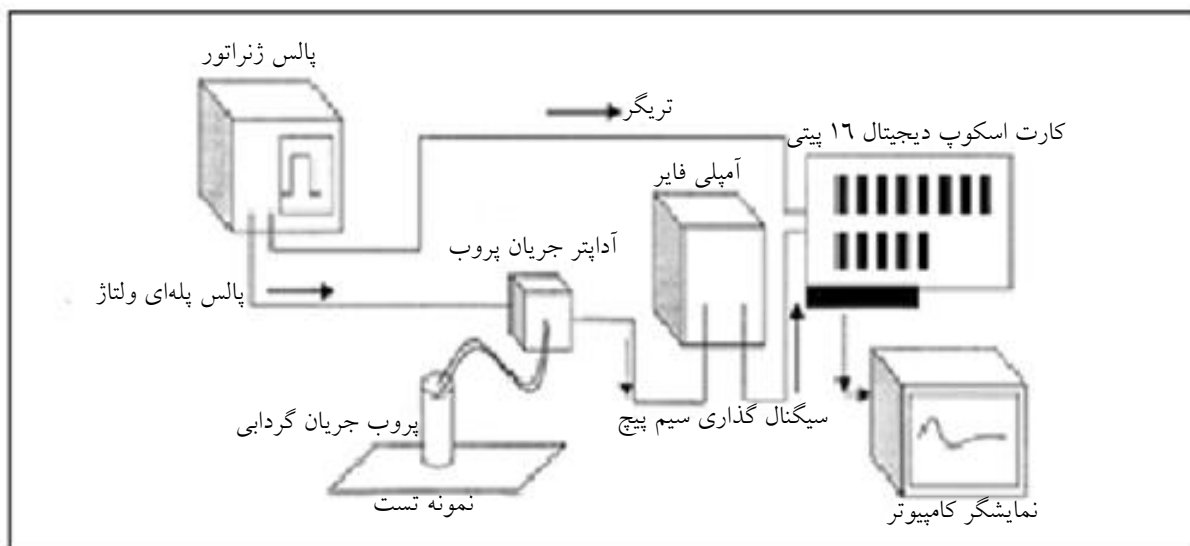
شکل ۳- فازهای چهارگانه تست PEC [۵]

سیستم آزمایش و نحوه عملکرد

در سیستم آزمون جریان گردابی گذرا ابتدا از فانکشن ژنراتور برای تولید پالسی از سیگنال استفاده می‌شود، سیگنال‌های تحریک برای القاء مغناطیسی توسط پروب PEC، وارد قطعه مورد آزمایش شده و پروب سیگنال برگشتی را برای تقویت سیگنالی وارد آمپلی فایر می‌کند و در نهایت سیگنال تقویت 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 فرایند، تحلیل سیگنالی را انجام داد. شکل ۴، شماتیک سیستم

آزمون PEC و شکل ۵، نمای اصلی سیستم آزمون PEC را نشان می‌دهد.

به منظور آماده کردن نمونه مورد آزمایش، ابتدا بر روی لوله گاز ۶ اینچی و ضخامت ۵/۲ میلیمتر به کمک دستگاه فرز، خوردگی‌هایی با ضخامت ۱/۴، ۱/۹۸، ۲/۵۸، ۳/۱۶، ۳/۷۴، ۴/۲۶، ۴/۹۸ میلیمتر با دقت بالایی ایجاد شد. برای شروع آزمون PEC، باید به این نکته توجه کرد که فرکانس تولیدی توسط فانکشن ژنراتور به میزانی باشد که ضخامت‌های شبیه‌سازی شده بر روی لوله گاز را پوشش دهد (شکل ۶).



شکل ۴- شمای کلی سیستم آزمون جریان گردابی گذرا



شکل ۶- شبیه‌سازی خوردگی‌هایی با ضخامت‌های متفاوت بر روی لوله گاز



شکل ۵- سیستم و تجهیزات آزمون جریان گردابی گذرا

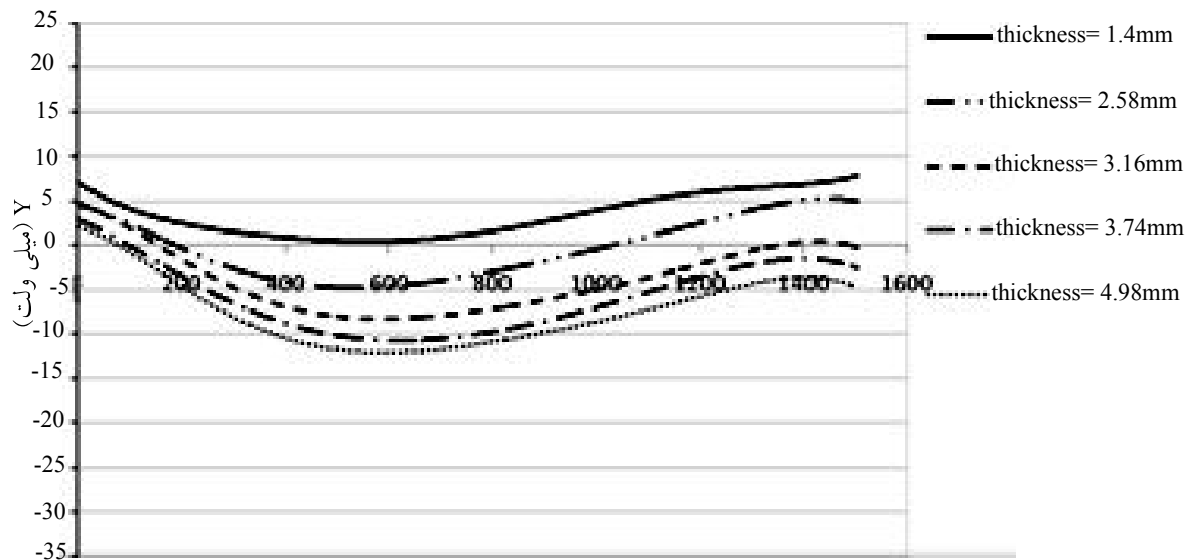
بحث و تحلیل نتایج

سیگنال ضخامت‌های متفاوت را از هم تمیز داد. برای کالیبره کردن سیستم، ضخامت‌های مختلف لوله با کمترین دامنه سیگنال‌های اختلافی با هم اندازه کردن منحنی‌ها، مرتبط می‌شوند (شکل ۸).

سپس برای راستی سنجی سیستم، از دو ضخامت ۱/۹۸ و ۴/۲۶ لوله استفاده شد و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده، سیگنال‌های PEC مربوط به این دو ضخامت را از سیگنال مرجع کسر تا کم‌ترین دامنه سیگنال‌های اختلافی مشخص شود. نهایتاً با استفاده از دامنه‌های خوانده شده و میان‌یابی می‌توان میزان ضخامت‌ها را با دقت بالایی تعیین کرد (جدول ۱).

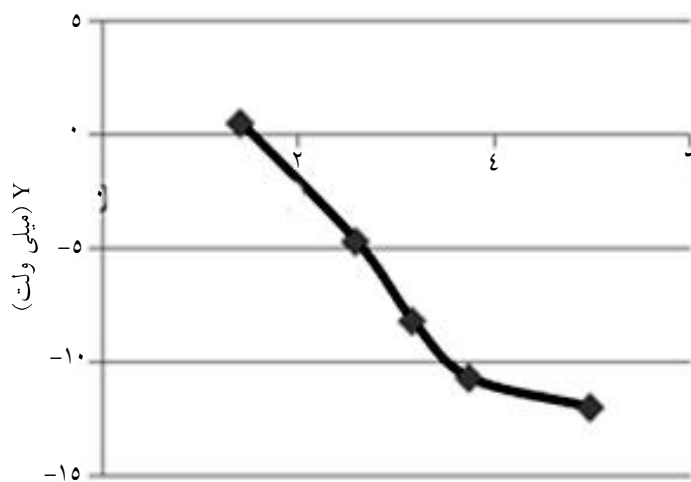
سیگنال‌های مربوط به هر کدام از ضخامت خوردگی‌ها را به صورت جداگانه از سیگنال مرجع (سیگنال مربوط به ضخامت اولیه لوله گاز) کسر کرده و نمودار سیگنال اختلافی رسم می‌شود (شکل ۷).

به منظور کالیبره کردن سیستم آزمایشی از پنج ضخامت مختلف روی لوله استفاده شد. از دو ضخامت ۱/۹۸ و ۴/۲۶ میلیمتر به دلیل استفاده در راستی سنجی و آزمایش سیستم تست در این مرحله استفاده نشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با تغییر ضخامت‌های لوله، کم‌ترین دامنه سیگنال اختلافی تغییر می‌کند و به سهولت می‌توان



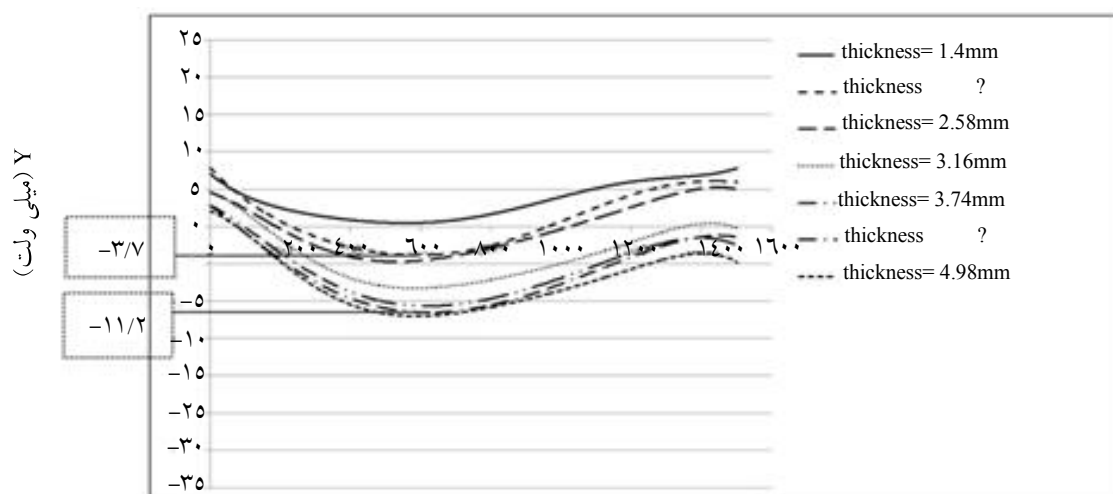
x زمان (میلی ثانیه)

شکل ۷- سیگنال‌های اختلافی از سیگنال در نقطه مرجع



x زمان (میلی ثانیه)

شکل ۸- نمودار سیگنال‌های اختلافی در نقاط کالیبراسیون بر حسب کم‌ترین دامنه



x زمان (میلی ثانیه)

شکل ۹- به دست آوردن کم‌ترین دامنه سیگنال اختلافی دو ضخامت مجهول

شوند، کلیه سیگنال‌های اختلافی حاصله از یک نقطه یا محدوده‌ای از نقاط می‌گذرند که این نقطه را Lift-off Intersection می‌گویند (شکل ۱۱).

در صورتی که به منظور تحلیل سیگنال‌های اختلافی از دامنه سیگنال در این نقطه (LOI) استفاده شود، می‌توان مطمئن بود که اضافه کردن لایه‌های عایق تاثیری در دامنه سیگنال اختلافی نخواهد داشت و دامنه به دست آمده برای عایق‌ها با ضخامت‌های متفاوت را می‌توان با نمودار مرجع مقایسه کرد. در زیر نمودار مینیمم دامنه سیگنال‌های اختلافی در حالت لوله بدون عایق و با اضافه نمودن عایق نمایش داده شده است. نمودار مینیمم دامنه سیگنال اختلافی لوله بدون عایق را می‌توان به‌عنوان نمودار کالیبراسیون جهت تخمین ضخامت در دیگر نقاط مربوط به حالت لوله با عایق در نظر گرفت (شکل ۱۲ و ۱۳). دقت اندازه‌گیری ضخامت سنجی دستگاه PEC را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد.

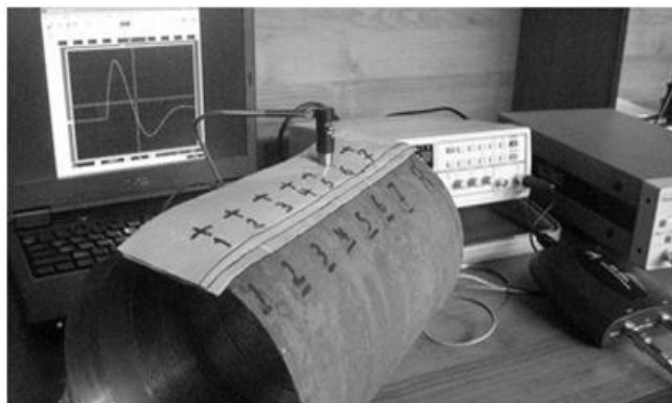
جدول ۱- دقت اندازه‌گیری ضخامت سنجی دستگاه PEC و تشخیص خوردگی

ضخامت واقعی (میلیمتر)	۱/۹۸	۴/۲۶
ضخامت تخمین زده شده توسط آزمون جریان گردابی گذرا	۱/۹۳۰۲	۴/۱۱۳۱
درصد خطای دستگاه آزمون جریان گردابی گذرا	۴/۹۸	۳/۴۴۸۳

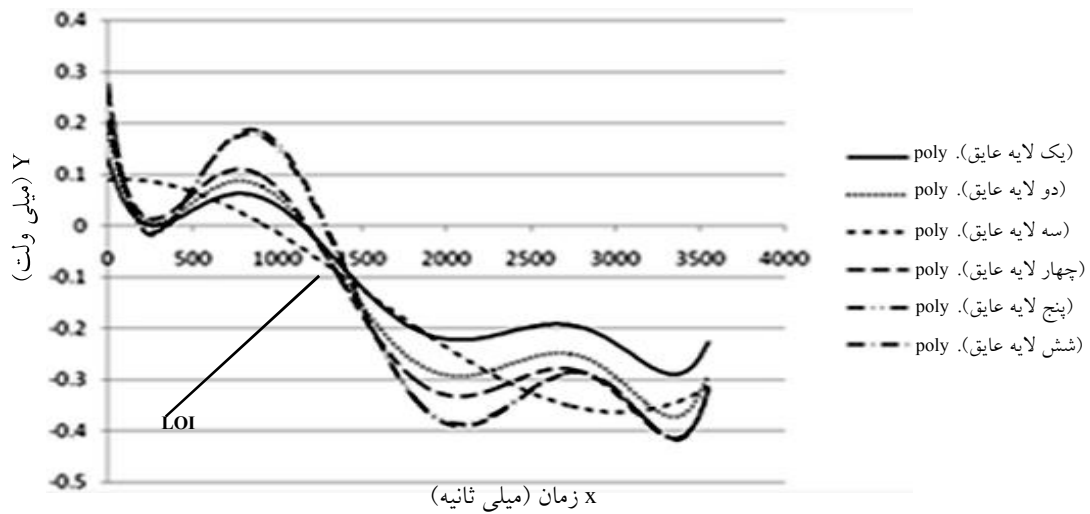
تحلیل نتایج با اعمال لایه‌های عایق

در این مرحله از آزمایش، لوله گاز از روی عایق مورد بررسی قرار گرفت. عایق مورد استفاده از عایق‌های نوع سرد با ضخامت ۱ میلیمتر بود که برای محافظت لوله‌های گاز غیر مدفون کاربرد دارد. طی سه مرحله، سه لایه عایق اعمال و در هر مرحله نتایج مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰، اعمال سه لایه عایق را نشان می‌دهد.

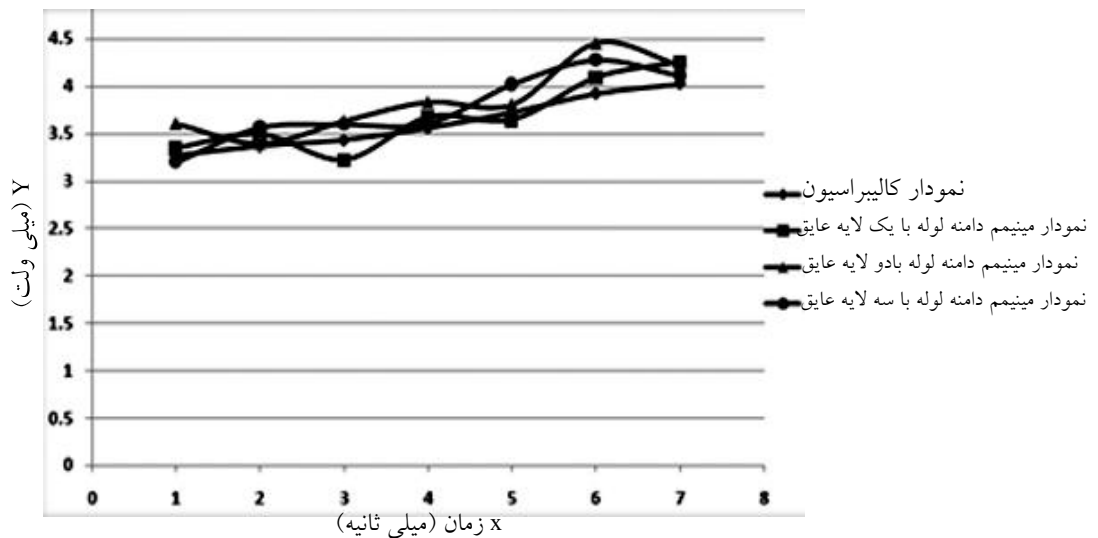
پس از انجام آزمایش‌های متعدد و بررسی نتایج، مشخص شد که به هر میزان تعداد لایه‌های عایق اضافه



شکل ۱۰- تست خوردگی لوله گاز از روی سه لایه عایق



شکل ۱۱- یافتن نقطه LOI



شکل ۱۲- نمودار کم‌ترین دامنه سیگنال‌های اختلافی در حالت لوله بدون عایق و با عایق

مختصات	1.4	1.98	2.58	3.16	3.74	4.26	4.98
لوله بدون عایق	3.272727	3.372727	3.436363	3.562321	3.727272	3.923653	4.02542
لوله با یک لایه عایق	3.345454	3.490909	3.2225	3.672727	3.644	4.090909	4.254545
لوله با دو لایه عایق	3.609090	3.4	3.636363	3.836363	3.809090	4.454545	4.218181
لوله با سه لایه عایق	3.2	3.563636	3.595236	3.606545	4.02	4.274545	4.109090

شکل ۱۳- بلوک دیاگرام مینیمم دامنه سیگنال‌های اختلافی در حالت لوله بدون عایق و با عایق

گذرا توسط نرم افزار Maxwell شبیه سازی شد. در سیستم آزمون جریان گردابی، پارامترهایی نظیر ولتاژ، فرکانس و فاصله هوایی میان پروب و نمونه، دارای اهمیت است که به کمک این نرم افزار عوامل فوق بهینه و به وضوح مشخص شدند. با توجه به بررسی نتایج به دست آمده از شبیه سازی با نرم افزار Maxwell، کلیه عوامل مورد نیاز آزمایش نمونه، استخراج شد.

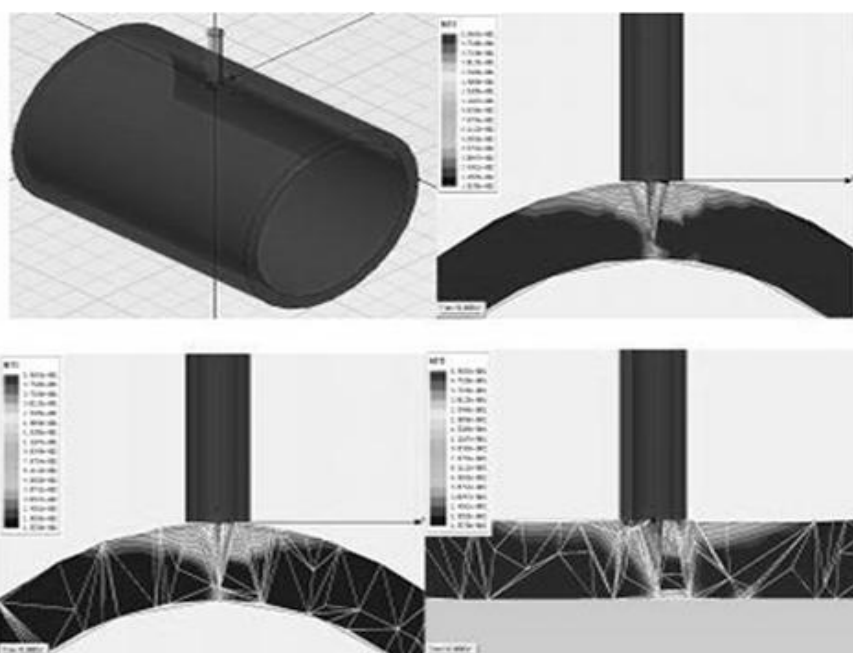
فرکانس ۵۰۰ هرتز، با ولتاژ ۴ ولت در پنج گام زمانی با یک شکل موج مربعی از جمله پارامترهای بهینه استخراج شده توسط شبیه سازی نرم افزار بود که با اعمال آن، میدان مغناطیسی القایی مورد نیاز برای آزمایش حاصل شد. در تصاویر شکل ۱۴، نتایج شبیه سازی و تحلیل نرم افزار Maxwell مشاهده می شود.

شبیه سازی مکانیزم آزمون جریان گردابی توسط نرم افزار Maxwell

با توجه به ضخامت بالای لوله گاز مورد آزمایش، اطمینان از اینکه آیا پالس ولتاژ فرستاده شده و آیا میدان مغناطیسی به وجود آمده و نیز توانایی گذر از کل ضخامت لوله گاز را دارد یا خیر کار مشکلی است، زیرا سیستم شناسایی خوردگی در آزمون جریان گردابی گذرا بر این مبنا استوار است که میدان مغناطیسی ایجاد شده کل ضخامت نمونه مورد آزمایش را می پیماید و تحلیل سیگنالی برای تشخیص خوردگی بر روی سیگنال، پاسخی است که کویل ثانویه پروب دریافت می کند. به همین منظور در ابتدا کلیه شرایط از جمله جنس و ابعاد نمونه، مشخصات و ویژگی های پروب و دیگر ملزومات مکانیزم آزمون جریان گردابی

جدول ۲- دقت اندازه گیری ضخامت سنجی دستگاه PEC و تشخیص خوردگی از روی ضخامت های مختلف عایق

ضخامت واقعی	ضخامت تخمین زده شده توسط	آزمون جریان گردابی گذرا	درصد خطا
۱/۹۸ میلیمتر	با اعمال یک لایه عایق	۱/۶۸۳	۱۵
	با اعمال دو لایه عایق	۱/۷۸۲	۱۰
	با اعمال سه لایه عایق	۱/۷۴۲۴	۱۲
۳/۱۶ میلیمتر	با اعمال یک لایه عایق	۲/۸۷۵	۹
	با اعمال دو لایه عایق	۲/۷۶۵	۱۲/۵
	با اعمال سه لایه عایق	۲/۸۲۸	۱۰/۵



شکل ۱۴- مراحل شبیه سازی و تحلیل اثر میدان مغناطیسی به کمک نرم افزار Maxwell

نتیجه‌گیری

روش آزمون جریان گردابی گذرا، یک روش جدید در آزمایش‌های غیر مخرب است که هنوز در سطح آزمایشگاهی است و تاکنون دستگامی برای انجام میدانی این نوع آزمایش به بازار نیامده است. این روش در شناسایی و تعیین خوردگی در صنعت هواپیمایی نتایج بسیار خوبی داده است. از آنجا که این آزمایش بر روی لوله‌های گاز بدون هیچ‌گونه توقف در انتقال گاز انجام می‌شود و نیازی به برداشتن عایق‌های روی لوله نیست، می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب در تشخیص خوردگی

به‌کار رود. به‌کاربردن پروب مناسب برای تعیین خوردگی در ضخامت‌های گوناگون لوله گاز از جمله موارد مهمی است که باید به آن توجه داشت، نرم افزار Maxwell با قابلیت‌های فوق‌العاده‌ای که در طراحی پروب دارد، روش مناسبی است که همواره قبل از انجام آزمایش و طراحی پروب باید مدنظر قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی شرکت ملی گاز ایران در انجام این پروژه تشکر می‌شود.

منابع

- [۱] دادخواه س.، دادخواه ا.، تکنولوژی بازرسی جوش، نشر آزاده، ۱۳۸۵
- [2] McMaster R.C., "Nondestructive testing handbook", 2nd ed., Vol Testing, 1986.
- [3] Tian G.Y. & Sophian A., "Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors", NDT & E International, Vol. 38(1), pp. 77-82, January 2005.
- [4] Safizadeh M.S., Lepine B.A., Forsyth V. D.S & Fahr A., "Time-frequency analysis of pulsed eddy current signals", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 20, No. 2, pp. 73-86, 2001.
- [5] Riccardo Scottini Herman J., "Inspection of coated subsea piping and risers quakkelsteijn applus RTD", American Society for Nondestructive, pp. 4-27, 2007.
- [6] Tian GY. & Sophian A., "Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT", NDT & E International, Vol. 38(4), pp. 319-324, 2005.
- [7] Giguere S., Lepine B. A. & Dubois J.M.S., "Pulsed eddy current technology: characterizing material loss with gap and lift-off variations", Res Nondestr Eval, Vol. 43, pp. 119-129, 2001.