

Experimental and numerical study of the design and development of a magnetic flux leakage inspection device to detect defects on ferromagnetic plate with the aim of optimizing the effective parameters

Amin Ghafari Khezri | Amir Refahi Oskouei² 

1. Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: amin88ghafari@gmail.com
2. Mechanic Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: amir.refahi@sru.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 26 Feb. 2024

Revised 17 May 2024

Accepted 15 June 2024

Keywords:

Magnetic Flux Leakage,
Nondestructive Test,
Corrosion,
Storage Tank Floor,
Inspection.

ABSTRACT

Today, in the oil and gas industry, storage tanks are used to store oil and petroleum products. Industry experience indicates that soil-side corrosion would occur at severe rates at most above ground storage tanks bottom. Since these damages happen at the bottom surface of the tanks and are not visible with visual inspection, a trustable method is needed that can inspect the storage tanks periodically. According to the researches have carried out until now, the most common technology to identify defects in the bottom surface of the storage tanks is the magnetic flux leakage inspection technique (MFL), which can perform the inspection as quickly as possible with proper accuracy. For this purpose, in this article, the aim is to build a magnetic flux leakage inspection device that can perform inspection and identification. There are many various parameters affect the MFL inspection such as environmental conditions, operational parameters and etc. Among the operational parameters the effective variables which have important roles in inspection are: the distance of the sensors to the center of the defect point, the distance between the magnet poles and the distance between the magnets and the tank bottom plate. Also, the reference plates used in this project are steel plates with 6 mm and 10 mm thicknesses include the artificial defects created on the surface according to ASME Section V Article 16. In order to reduce the costs and time of experimental tests Ansys Maxwell simulation program was used and the results obtained from the simulation were used to conduct experimental tests. The results of simulation are compared with the results of experiment. The results showed that by changing the mentioned effective parameters, defects with the depth of 20% to 80% can be detected with trustable accuracy. Also, by changing the parameters in some conditions, the lower depths of 20% can be detectable.

Cite this article: Ghafari Khezri, A., Refahi Oskouei, A. (2024). Experimental and numerical study of the design and development of a magnetic flux leakage inspection device to detect defects on ferromagnetic plate with the aim of optimizing the effective parameters. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 1-10.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.445773.1141>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

مطالعه تجربی و عددی طراحی و ساخت یک دستگاه نشت شار مغناطیسی جهت شناسایی عیوب بر روی ورق‌های فلزی با هدف بهینه‌سازی پارامترهای موثر

امین غفاری خضری^۱ | امیر رفاهی اسکوئی^۲ ✉

۱. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: amin88ghafari@gmail.com

۲. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: amir.refahi@su.ac.ir

چکیده:

امروزه در صنعت نفت و گاز از مخازن ذخیره سازی برای نگهداری نفت و فرآورده های نفتی استفاده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد که خوردگی در زیر مخازن ذخیره در سمت خاک با نرخ بالاتری رخ می‌دهد. برخی آسیب‌ها در سطح زیرین مخازن در مجاورت خاک اتفاق می‌افتد و با بازرسی چشمی قابل مشاهده نیستند، به روشی قابل اعتماد برای بازرسی نیاز است که بتواند کف مخازن ذخیره را به صورت دوره‌ای مورد بازرسی قرار دهد. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای شناسایی عیوب در کف مخازن ذخیره، روش بازرسی نشت شار مغناطیسی (MFL) است که می‌تواند بازرسی را در سریع‌ترین زمان ممکن با دقت مناسب انجام دهد. برای این منظور در این مقاله هدف ساخت دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی است که بتواند بازرسی و شناسایی عیوب را انجام دهد. پارامترهای مختلفی بر بازرسی نشت شار مغناطیسی تأثیر می‌گذارند. از جمله پارامترهای عملیاتی که نقش مهمی در بازرسی دارند می‌توان به فاصله سنسورها تا مرکز عیب، فاصله بین قطب‌های آهنربا و فاصله بین آهنرباها از کف مخزن اشاره کرد. صفحات مرجع مورد استفاده در این پروژه صفحات فولادی با ضخامت‌های ۶ و ۱۰ میلی‌متر شامل عیوب مصنوعی ایجاد شده بر روی سطح طبق استاندارد ASME SECTION V ARTICLE 16 می‌باشند. قبل از انجام آزمایش‌های عملی جهت کاهش هزینه‌ها و زمان تست‌های تجربی، از شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس مکسول بهره گرفته شد و از نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برای انجام تست‌های تجربی استفاده گردید. در انتها نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی بدست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تغییر پارامترهای موثر ذکر شده، می‌توان عیوب با عمق ۲۰ تا ۸۰ درصد را با دقتی قابل قبول تشخیص داد. همچنین با تغییر پارامترها در برخی شرایط می‌توان عمق خوردگی یا عیب کمتر از ۲۰ درصد را نیز تشخیص داد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۲۶

کلیدواژگان:

نشت شار مغناطیسی،

آزمون‌های غیرمخرب،

عیب خوردگی،

بازرسی کف مخازن نفتی،

آزمون نشت شار مغناطیسی

استناد: غفاری خضری، امین؛ رفاهی اسکوئی، امیر (۱۴۰۲). مطالعه تجربی و عددی طراحی و ساخت یک دستگاه نشت شار مغناطیسی جهت شناسایی عیوب بر روی ورق‌های فلزی با هدف بهینه‌سازی پارامترهای موثر. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۱-۱۰.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.445773.1141>



۱- مقدمه

مخازن نفتی در صنعت نفت و انرژی از اهمیت بالایی برخوردار هستند زیرا که حمل و نقل و نگهداری مواد نفتی به وسیله این مخازن انجام می‌شود. یکی از مکان‌هایی که بسیار مستعد تشکیل عیب و خوردگی است، سطح زیر و روی کف مخازن نفتی است که سطح زیر کف مخزن به دلیل قراردادن روی زمین و تماس با سطح بتنی امکان ایجاد خوردگی در آن وجود دارد و همچنین قابل رویت نیست و ممکن است که عیب سبب نشستی شود. به منظور بازرسی صحیح می‌بایست از روش آزمون‌های غیر مخرب استفاده شود و یکی از متداول‌ترین روش‌های بازرسی برای مخازن نفتی روش بازرسی آزمون نشت شار مغناطیسی^۱ است. مطالعات و کارهای پژوهشی مختلفی در ارتباط با روش نشت شار مغناطیسی در دنیا بر روی سازه‌های فلزی، سیم بکسل‌ها، لوله‌ها و کف مخازن انجام شده است. در این مقاله بیشتر به جنبه استفاده و کاربرد های نشت شار مغناطیسی در بازرسی ورق‌های فلزی پرداخته شده است. از جمله مواردی که بیشتر بر روی آن تمرکز شده است می‌توان به تشخیص عیب خوردگی در ورق‌های فلزی که عمدتاً در کف مخازن بیشتر اتفاق می‌افتد اشاره کرد. به عنوان نمونه در سال ۲۰۰۰ موخوپدهیای و همکارش توانستند به روش تبدیل موج‌های گسسته عیوب کمبود تراکم فلزات را با استفاده از بازرسی نشت شار مغناطیسی شناسایی کنند [۱].

در سال ۲۰۰۳ لیو و همکارانش مقاله‌ای با عنوان مغناطش ناحیه‌ای برای بررسی مقدار مغناطش یک آهنربا در یک قطعه فرومغناطیس با هدف بررسی نشت شار مغناطیسی کف مخازن منتشر کردند که در آن تاثیر عواملی چون ضخامت، ارتفاع و عرض آهنربا و همچنین فاصله آهنربا تا قطعه و سنسورها تا قطعه را تغییر داده بودند تا عوامل موثر در نشت شار مغناطیسی و عوامل موثر در مغناطش ناحیه‌ای را پیدا کنند [۲].

در سال ۲۰۰۵ دو ژیه و همکاران بر روی روش جدید مدل‌سازی سه بعدی بر مبنای المان محدود ۳ بعدی ارائه دادند و با انتخاب روش مش بندی مناسب و تحلیل منطقه

مجاور عیوب توانستند تحلیل دقیق تری را ارائه دهند [۳]. در سال ۲۰۰۷ سانگ و همکارانش به بررسی پارامترهای موثر در بهبود عملکرد بازرسی نشت شار مغناطیسی پرداختند و عوامل عملی و موثر در بهینه‌سازی دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی را معرفی کردند که این بهینه‌سازی در راستای بهبود عملکرد دستگاه بازرسی کف مخازن بود [۴].

در سال ۲۰۰۸ کابا و همکاران توانستند تکنیک‌های جدیدی از طریق مغناطیس پالسی را برای تعیین کمیت عیوب موجود در عیوب خارجی لوله‌ها ارائه دهند و عیوب راحت تر و با پیک بالا تری شناسایی شد [۵].

در سال ۲۰۱۱ ژانگ گوگوانگ و همکاران بر روی پردازش سیگنال بررسی‌هایی انجام دادند و با استفاده از روش درون یابی و افزایش نقاط بازرسی و کاهش فاصله سنسورها موفق به دریافت سیگنال با وضوح بهتری شدند [۶].

در سال ۲۰۱۲ پیرسون و همکارانش از شرکت انگلیسی سیلوروینگ مقاله‌ای منتشر کردند که در آن از روش جدیدی برای بازرسی کف مخازن با نام روش استار^۲ (STARS) رو نمایی کرد که در این روش امکان بازرسی عیوب بالایی و زیرین به صورت هم زمان قابل انجام بود [۷].

در سال ۲۰۱۴ بوت و همکارانش از شرکت های ادیفای و سیلوروینگس مقاله‌ای با عنوان "عواملی که بر قابلیت‌های اندازه‌گیری نقص تکنیک نشت شار مغناطیسی تأثیر می‌گذارند" منتشر کردند که در آن جهت بررسی صحت عملکرد و توان بازرسی دستگاه‌های بازرسی نشت شار مغناطیسی استاندارد تعریف کردند که سازندگان بتوانند با تست دستگاه‌های خود بر اساس این استاندارد ها دستگاه‌های خود را ارزیابی کنند [۸].

در سال ۲۰۱۵ چن لی و همکاران طرحی تمام رباتیک به عنوان طرح برای بازرسی کف مخازن نفتی به روش MFL ارائه دادند که در این روش اپراتور انسانی از بازرسی کلی جدا شده و بازرسی توسط ربات لاک پشتی و از راه دور انجام می‌شد [۹].

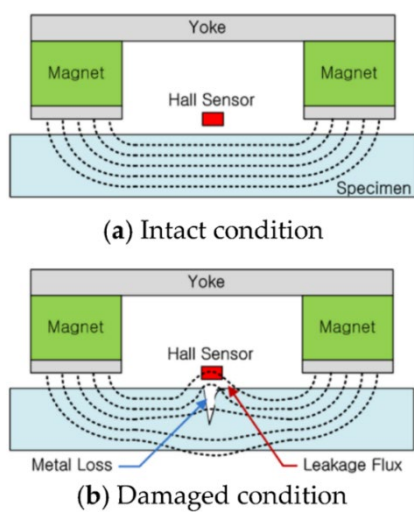
در سال ۲۰۱۸ پولن و همکارانش توانستند با کمک

² Surface Topology Air-gap Reluctance System

¹ Magnetic Flux Leakage Inspection (MFL)

میدان مغناطیسی بوده و برای شناسایی و عیب یابی طیف گسترده‌ای از مواد فلزی فرومغناطیس با ساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت استفاده می‌شود. دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی شامل یک ارابه، یوک، بخش مغناطیسی کننده، سنسورها و بخش تجزیه و تحلیل تشکیل شده است.

آزمون نشت شار مغناطیسی با استفاده از جریان متناوب، جریان مستقیم و یا با استفاده از آهنرباهای دائمی قادر است بر روی هر ماده فرو مغناطیسی اعمال شود که در این مقاله، از آهنرباهای دائمی استفاده شده است.



شکل ۱) عملکرد دستگاه نشت شار مغناطیسی

مطابق شکل ۱ در روش نشت شار مغناطیسی از دو آهنربا (Magnet) در فاصله مشخص از همدیگر استفاده می‌شود که توسط یک قطعه فلزی به نام یوک به همدیگر وصل می‌شود. در صورتیکه آهنربا به قطعه کار مورد بازرسی نزدیک شود یک حلقه میدان مغناطیسی مانند حالت (a) در شکل ۱ حاصل می‌گردد که بخش عمده میدان در داخل قطعه کار نفوذ کرده و خطوط میدان مغناطیسی بصورت منظم و یکنواخت می‌باشند. در صورتیکه سر راه میدان مغناطیسی عیب یا ناپیوستگی وجود داشته باشد در این صورت خطوط میدان منحرف شده و مانند حالت (b) در شکل ۱ باعث ایجاد نشت شار میدان مغناطیسی می‌گردند. خطوط میدان منحرف شده یا نشت پیدا کرده توسط سنسورهای حساس به میدان مغناطیسی قابل شناسایی بوده و میزان نشتی توسط این سنسورها قابل محاسبه می‌باشد.

روش استار، اثرات تغییرات سرعت حرکت در بازرسی از ۰/۵ متر بر ثانیه الی ۳ متر بر ثانیه را برای دستگاه بازرسی کف مخازن با ضخامت‌های ۶ تا ۲۰ میلی متر را با دقت و به درستی اندازه گیری کنند و به نتایج خوبی برسند [۱۰].

در سال ۲۰۱۹ ژانگ و همکارانش مقایسه‌ای بین روش MFL و MFD انجام دادند نشان داد که اگر این دو روش را در کنار یکدیگر به کار بگیریم نتیجه مطلوب‌تری خواهیم داشت و برتری روش MFD این بود که می‌توانست عیوب با اشکال هندسی پیچیده تر را راحت تر تشخیص و از لحاظ اندازه‌ای بهتر تشخیصی بدهد. در حالی که روش MFL عیوب را بزرگ‌تر نشان می‌داد [۱۱].

در سال ۲۰۲۱ لانگ و همکاران توانستند با امتحان روش آزمایشی جدید اندازه، شکل و نقطه شروع عیب را به روش MFL بهتر شناسایی کنند و سطح بازرسی به روش MFL را ارتقا ببخشند [۱۲].

در سال ۲۰۲۲ مارک و همکاران یک آزمایش مقایسه ای بین روش‌های SMFL^۱ و RMFL^۲ و MFL انجام دادند و به بررسی تفاوت‌های دقت بازرسی عیوب دور و نزدیک بین این روش‌ها پرداختند [۱۳].

با توجه به مطالعات و کارهای انجام شده نتیجه می‌شود که عوامل و پارامترهای مختلفی بر بازرسی نشت شار مغناطیسی تاثیر گذار هستند که هر کدام باید به صورت جداگانه بررسی شود. در این مقاله پارامترهای ضخامت آهنربا، فاصله بین دو آهنربا، فاصله آهنربا از سطح قطعه بررسی شده است. هدف این مقاله ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی با انتخاب بهینه‌ترین پارامترهای ذکر شده در بالا می‌باشد. این مقاله در سه بخش معرفی روش، تئوری (بخش شبیه سازی)، عملی (بخش تجربی) و در آخر قسمت نتیجه گیری آورده شده است.

۱-۱ معرفی آزمون نشت شار مغناطیسی

آزمون نشت شار مغناطیسی به عنوان یکی از آزمون‌های غیرمخرب که نشات گرفته از آزمون ذرات مغناطیسی است، شناخته شده است. نشت شار مغناطیسی بر پایه ایجاد

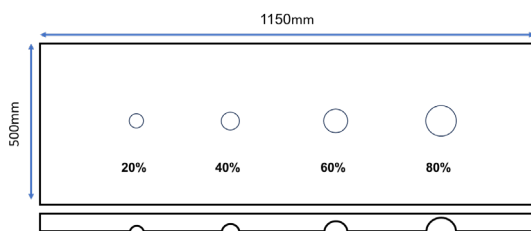
¹ Magnetic Field Distortion

² Stray Magnetic Flux Leakage

³ Residual Magnetic Flux Leakage

API 653 APPENDIX و ASME Section V Article 16 G استفاده شده است. بر اساس استاندارد ضخامت ورق قابل بازرسی به منظور شبیه سازی دقیق تر کف مخازن می‌بایست حداقل 6 mm و حداکثر 12 mm و عیوب صنعتی ایجاد شده می‌بایست به صورت پله‌ای ایجاد شوند تا قابل تشخیص باشند. اگر چه که شرکت‌های سازنده دستگاه‌های بازرسی نشت شار مغناطیسی از این نیز پیش‌تر رفته‌اند و به منظور اثبات توانایی دستگاه‌های خود حداکثر ضخامت ورق‌های مورد بازرسی را افزایش داده‌اند.

بر اساس اطلاعات موجود در مقاله "عواملی که بر قابلیت‌های اندازه‌گیری نقص تکنیک نشت شار مغناطیسی تأثیر می‌گذارند" [۸] ضخامت ورقه‌های بازرسی از 6 mm شروع شده و تا ضخامت 16 mm اندازه‌گیری می‌شود. و عیوب‌های ایجاد شده می‌بایست با یک مته ته‌گرد با قطر 22 mm ایجاد شوند. عیوب ایجاد شده می‌بایست مانند شکل ۳ دارای عمق عیب‌های 20٪، 40٪، 60٪ و 80٪ باشند. این مقدار قطر عیب از حالت استاندارد گفته شده در مقالات رفرنس کوچک تر است و همچنین به صورت پلکانی نیز نیست. به همین دلیل بازرسی آن توسط دستگاه‌های بازرسی نشت شار مغناطیسی یک مقدار سخت تر خواهد بود. ولی می‌توان اینگونه استناد کرد که اگر عیوب با حجم عیبی کم را بتوان با دستگاه‌های بازرسی ساخته شده اندازه گرفت، اندازه‌گیری عیوب استاندارد صنعتی نیز قابل انجام می‌باشد.



شکل ۳) سایز استاندارد ورق بازرسی به همراه عیوب ایجاد شده بر اساس API

در شبیه سازی انجام شده هدف رسیدن به حداکثر مغناطش ورق بازرسی و حد اکثر مقدار شار عبوری و عدم اشباع سنسورها است. معیار مورد نظر برای اینکه کدام پارامتر بهترین کارایی را دارد ایجاد ناحیه اشباع مغناطیسی بین دو قطب آهنربا می‌باشد. پارامترهای موثر در بازرسی به ترتیب: فاصله دو مغنت نسبت به هم (L)، فاصله مغنت‌ها از

از اساسی ترین اجزای تشکیل دهنده دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی می‌توان به مواردی همچون: یوک بازرسی، ارابه حامل و سیستم دریافت و پردازش اطلاعات اشاره کرد. یوک بازرسی از بخش‌های مختلفی مانند: پلیت نگه دارنده آهنرباها (بک پلیت)، آهنرباهای دائمی، سنسورهای دریافت سیگنال (سنسور اثر هال) تشکیل شده است.

ارابه حامل از بخش‌های نگه دارنده یوک بازرسی و سیستم حرکتی (چرخ‌ها و موتور حرکتی) تشکیل شده است. سیستم پردازش اطلاعات از بخش‌های مختلفی مانند: دیتالاگر، آمپلیفایر، انکودر و نرم افزار خواندن اطلاعات تشکیل شده است.

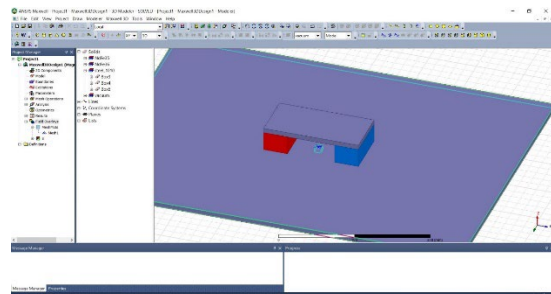
پس از معرفی روش بازرسی نشت شار مغناطیسی و مطالعات انجام شده مرتبط در این حوزه به منظور ساخت نمونه اولیه بازرسی ابتدا می‌بایست بخش تئوری کار و شبیه سازی انجام شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۲- روش کار

در این بخش ابتدا به تئوری و شبیه سازی کار پرداخته شده و پس از نتیجه‌گیری شبیه سازی به ساخت دستگاه و تست روی ورق بازرسی پرداخته شده است.

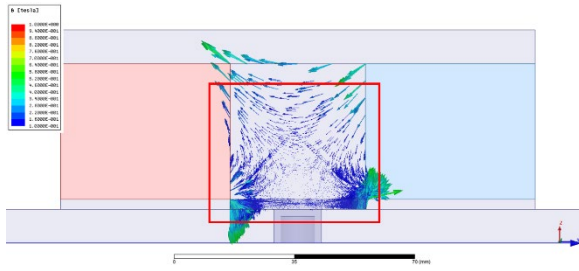
۲-۱ شبیه سازی (بخش تئوری)

در بخش محاسباتی و شبیه سازی آزمایش اولیه نرم افزار مهندسی انسیس مکسول (ANSYS MAXWELL) انتخاب شده است، که برای انجام شبیه سازی دستگاه بازرسی، ورق کف مخزن معیوب و جایگذاری سنسورها و دریافت سیگنال عیب استفاده می‌شود. نرم افزار انسیس مکسول به روش المان محدود اقدام به حل مسائل می‌کند.



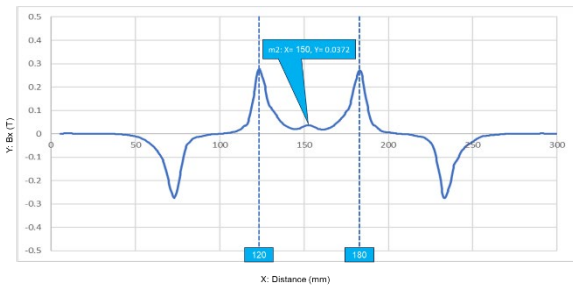
شکل ۲) محیط نرم افزاری انسیس مکسول

به منظور ایجاد فضایی واقعی به منظور تست، جهت ایجاد عیوب مصنوعی از اطلاعات موجود در استانداردهای



شکل ۶) میدان های مغناطیسی در فضای بین دو آهنربا

در شکل ۷ حالت مطلوب قرار گیری تمامی پارامترهای موثر در بازرسی که در شبیه سازی اندازه گیری و سنجیده شده اند، آورده شده است و سیگنال مطلوب برای هر کدام از عیبها با درصد های مختلف به همین صورت است.



شکل ۷) نمایش نموداری نرم افزار در صورت اشباع مطلوب ورق بازرسی با وجود عیب

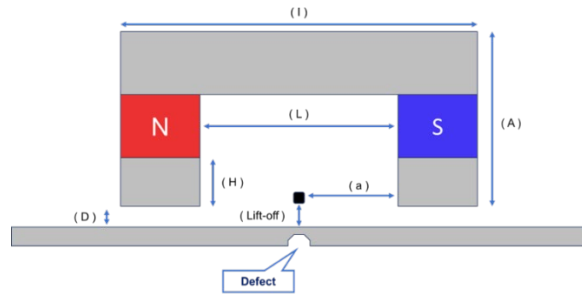
در شکل ۷ که در بالا آورده شده است می توان در میان دو قله ای که مقدار شار ماکزیمم را نشان می دهد و فاصله بین آهنرباها در آن مشخص شده است، نشتی که توسط سنسورها دریافت شده است را که به صورت یک قله کوچک نشان داده شده است مشاهده کرد. برای پیدا کردن مقادیر پارامترهای مناسب جهت شبیه سازی، مقادیر مختلفی آزمایش گردید که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) مقادیر پارامترهای موثر در شبیه سازی

| مقادیر (mm) | | | | | | پارامتر |
|-------------|----|----|----|-----|-----|----------|
| ۵۰ | ۶۰ | ۷۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۱۲۰ | L |
| - | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | D+H |
| ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | Lift-off |

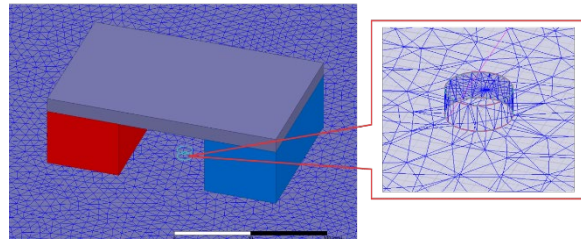
برای تعیین مقدار فاصله بین دو آهنربا (L) فواصل ۵۰mm، ۶۰mm، ۷۰mm، ۸۰mm، ۱۰۰mm، ۱۲۰mm بررسی شدند که در فواصل بالا تر از ۶۰mm اشباع لازم در ورق شبیه سازی صورت نمی گرفت و در مقدار کمتر

سطح ورق مورد بازرسی (H + D)، فاصله مگنتها تا سنسور دریافت اطلاعات (a) و فاصله سنسورها تا سطح ورق مورد بازرسی (Lift-Off) هستند که در شکل ۴ آورده شده است.



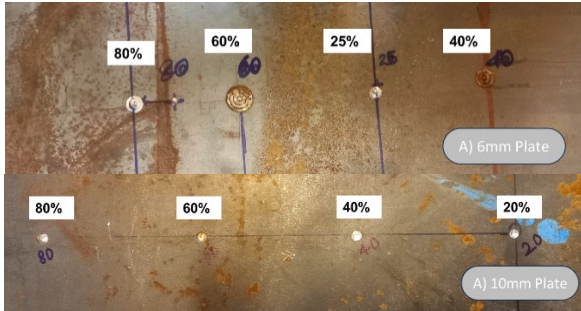
شکل ۴) پارامتر های موثر در بازرسی نشت شار مغناطیسی

در شبیه سازی ورق بازرسی برای تمامی عیوب مد نظر یک شبیه سازی کامل انجام شده است و عیوب به صورت نشان داده شده در شکل در بخش زیرین ورق بازرسی ایجاد شده اند و یوک و خط سنسور در بالای ورق قرار داده شده است.



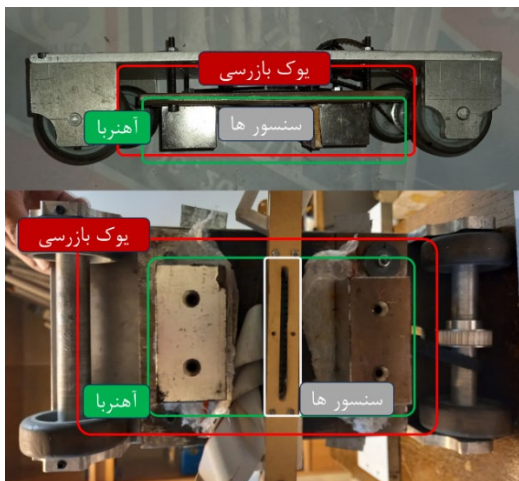
شکل ۵) نمایی از شبیه سازی عیب ۸۰٪

در شبیه سازی با توجه به پارامترهای مد نظر بهترین حالت به دست آمده برای شبیه سازی در فواصل گفته شده در جدول زیر آورده شده است. بهترین حالت شبیه سازی با توجه به مطالعات صورت گرفته، حالتی است که بتوان در ورق بازرسی، در فضای بین دو آهنربا مغناطش با میزان شار عبوری ($1.8T \leq B < 2T$) ایجاد نمود و این می بایست در صورتی باشد که سنسورهای قرارداده شده در بالای عیب و توسط میدان مغناطیسی ایجاد شده اشباع نشوند [۱۴]. به منظور درک بهتر در شکل ۶ میدان های مغناطیسی بین دو قطب آهنربا آورده شده است.



شکل ۸) عیوب ایجاد شده در ورق های بازرسی 6mm و 10mm

در ورق بازرسی ضخامت 6mm به دلیل اینکه از ورق آماده استفاده شده است دو عیب 40٪ و 60٪ به صورت استاندارد ASME SECTION V ARTICLE 16 سوراخ کاری شده اند و دو عیب 20٪ و 80٪ به روش گفته شده در مقاله مذکور سوراخ کاری شده‌اند. همچنین در شکل ۹ تصویر دستگاه ساخته شده از زیر آورده شده است و می‌توان در آن اربابه و یوک و محل جایگذاری سنسورها را مشاهده کرد.



شکل ۹) نمونه ساخته شده دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی

همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود برای بخش دریافت سیگنال از سنسورهای اثر هال که در بین آهنرباها جایگذاری شده است و به موازات آهنرباها قرار گرفته شده‌اند استفاده شده است. در شکل ۱۰ کیت سنسورها و نحوه چیدمان آنها کنار یکدیگر به خوبی نمایش داده شده است.

از 60mm سنسورها اشباع می‌شدند. همچنین برای تعیین فاصله آهنربا از ورق بازرسی (D+H) فواصل 5mm، 6mm، 4mm، 3mm بررسی شدند که در فواصل بیشتر از 3mm به دلیل پراکندگی شار میدان‌های مغناطیسی بین دو آهنربا سنسورها اشباع شده و نتایج را نشان نمی‌دهند و در فاصله 3mm و کمتر از آن مقدار مطلوب بود. مقدار فاصله بین سنسورها و مرکز عیب (Lift-off) نیز در اندازه های 2mm، 3mm، 4mm، 5mm، 6mm، 7mm بررسی شد که مقادیر بالاتر از 3mm عیوب 20٪ و 40٪ را به سختی نشان می‌داد و در فاصله 3mm و کمتر مقدار سیگنال مطلوب بود. مقادیر پارامترهای مطلوب به صورت خلاصه پس از آزمون و خطاهای بسیار در شبیه سازی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲) پارامترهای موثر به دست آمده

| پارامتر | مقدار (mm) |
|----------|------------|
| L | 60 |
| D+H | 3 |
| Lift-off | 3 |

پس از نتیجه گیری در بخش تئوری و شبیه سازی نوبت به ساخت دستگاه آزمایشی رسید که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۲-۲ ساخت (بخش تجربی)

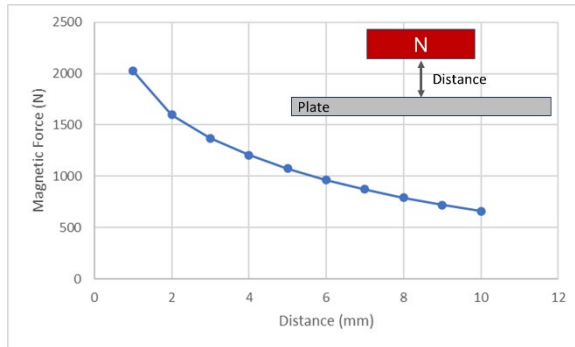
در این بخش ابتدا به معرفی تجهیزات و لوازم مورد نیاز برای انجام بازرسی پرداخته شده است.

۲-۲-۱ لوازم مورد نیاز

همانطور که در معرفی روش نشر شار مغناطیسی گفته شد، لوازم مورد نیاز برای ساخت دستگاه بازرسی که عبارتند از: اربابه حامل، یوک بازرسی و سیستم جمع آوری و پردازش اطلاعات ساخته شد و همچنین ورق بازرسی مد نظر با ضخامت‌های 6mm و 10mm نیز با توجه به استانداردهای ذکر شده سوراخ کاری انجام شد. ورق‌های بازرسی در شکل ۸ که عیوب 20٪، 40٪، 60٪ و 80٪ در آنها ایجاد شده است مشاهده‌اند.

حامل ارایه می شود.

در این بخش آزمایش با توجه به نمودار تغییرات نیروی مغناطیسی که آهنربا به ورق بازرسی می آورد و کمی آزمون و خطا این مورد رفع گردید. نمودار نسبت نیروی مغناطیسی به فاصله آهنربا از ورق بازرسی در شکل ۱۲ آورده شده است.



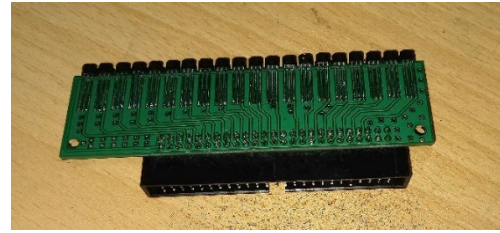
شکل ۱۲) نمودار نسبت فاصله آهنربا از ورق بازرسی به نیروی مغناطیسی

یکی دیگر از مشکلات پیش آمده این بود که با اعمال پارامترهای بدست آمده در شبیه سازی، ورق مورد بازرسی به اشباع می رسید اما میدان های سرگردان نیز در فضای بین آهنرباها سبب اشباع شدن سنسور می شدند. در این حالت به منظور جلوگیری از این امر فاصله بین دو آهنربا یا پارامتر (L) تغییر داده شد. مقدار مناسب به دست آمده برای پارامترها به صورت تجربی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳) فواصل مناسب در پارامترها در بازرسی تجربی

| مقدار (mm) | پارامتر |
|---------------------------------|----------|
| $80 \leq L \leq 100$ | L |
| ۳ | D+H |
| $2 \leq \text{Lift-off} \leq 3$ | Lift-off |

با توجه به مقادیر اندازه گیری شده بهترین فاصله بین مرکز عیب و سنسورها (Lift-off) برابر با ۳mm قرار داده شد و بهترین فاصله بین آهنرباها برای بازرسی ورق های ۶mm و ۱۰mm برابر با دو مقدار ۸۰mm و ۱۰۰mm قرار داده شد. همچنین نمونه سیگنال مطلوب دریافت شده در شکل ۱۳ در پایین با احتساب تمامی موارد گفته شده نمایش داده شده است. یکی از مهم ترین دلایل عدم استفاده (Lift-off) با مقدار ۲mm امکان برخورد و یا سایش

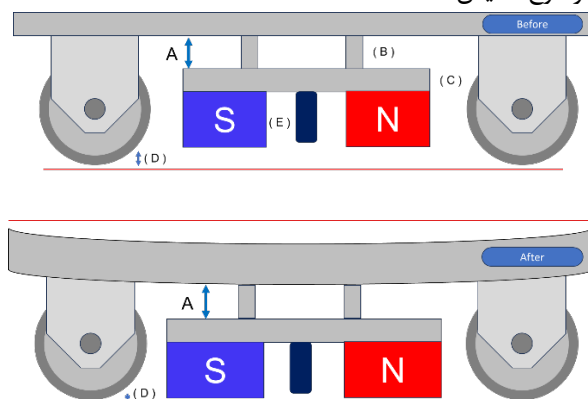


شکل ۱۰) کیت سنسورهای اثر هال

نشتی شار دریافت شده توسط سنسورها به بورد جمع آوری داده منتقل شده و در آنجا پردازش اولیه صورت می گیرد و سپس اطلاعات از بورد به نرم افزار ارسال و به صورت آنلاین قابل مشاهده و ثبت خواهند بود. در ادامه به بخش نتایج به دست آمده و مقایسه نتایج حالت شبیه سازی و حالت تجربی پرداخته شده است.

۳- نتایج و بحث

در بخش تجربی ابتدا مقادیر پارامترها، برابر با مقادیر پارامترها در شبیه سازی در نظر گرفته شد. مشکلاتی در کار پیش آمد که برای حل آنها مقادیر پارامترها نسبت به مقدار شبیه سازی شده تغییر داده شد و یک عامل جدید که در حالت تئوری به آن پرداخته نشده بود به مقادیر اضافه شد که می بایست در حالت تجربی آن را در نظر گرفت و آن پارامتر میزان مقدار نیروی جاذبه مغناطیسی است که هر آهنربا به ورق بازرسی وارد می کند و می تواند با جذب ورق حامل نگهدارنده خود را دچار خمش کند. در شکل ۱۲ این موضوع نمایش داده شده است.



شکل ۱۱) اثر نیروی مغناطیسی آهنرباها بر روی ارایه در حالت عادی و روی ورق بازرسی

در شکل ۱۱ همانطور که مشاهده می شود، میزان جاذبه آهنرباها به ورق بازرسی به قدری است که سبب خم شدن

مقدار قله‌ای که در نمودارها رسم شده است نشانگر این است که میل آهنرباها به جذب ورق بازرسی در ورق ۱۰mm بیشتر است و میدان سرگردان کمتری بین دو آهنربا در فضای خالی بین آهنرباها جریان دارد و در نتیجه مقدار نویز کمتری نیز مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس پارامترهایی که با نرم افزار بدست آورده شد و آنچه که در حالت تجربی نتیجه شد، به صورت تقریبی با یکدیگر مطابقت داشتند و نتایج مطلوبی حاصل شد و بر اساس مواردی که مد نظر بود مناسب ترین حالت انتخاب گردید. مطلوب ترین حالت حالتی است که دستگاه بازرسی فضای زیادی را در بر نگیرد، قابل حمل باشد، فاصله آهنرباها از یکدیگر نه زیاد دور و نه زیاد نزدیک باشند که سنسور دچار مشکل نشود. حالت مطلوب به دست آمده در شبیه حالت تجربی برای ورق ۶mm و ۸mm به ترتیب lift-off برابر با ۳mm و L برابر با ۸۰mm و ۱۰۰mm است و دستگاه توانست در این حالت ها عیوب ۲۰٪ الی ۸۰٪ را شناسایی نماید. همچنین نشان داده شد که دستگاه قابلیت این را دارد در صورت بهینه سازی حتی عیوب ریز تر را نیز بازرسی کند. در نتایج به دست آمده در بهترین حالت بازرسی عیوب با دقت حداقل ۲۰٪ ضخامت ورق بازرسی قابل شناسایی بودند.

۵- تشکر و قدردانی

با تشکر از شرکت میپو بابت کمک‌های بی دریغ شان که در این راه کمک حال انجام پروژه بوده‌اند.

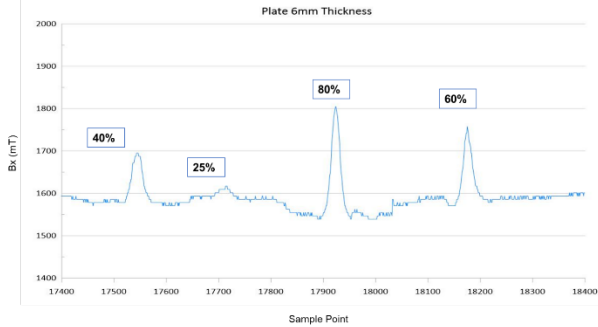
۶- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

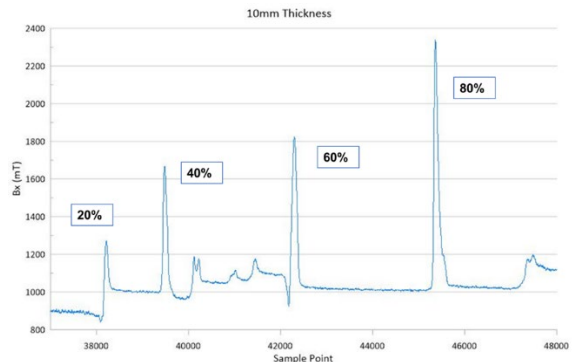
- [1] Mukhopadhyay, S., & Srivastava, G. (2000). Characterisation of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform. *Ndt & E International*, 33(1), 57-65.
- [2] Liu, Z., Zhang, X., & Li, J. (2003). Study on local magnetization of magnetic flux leakage testing

سنسورها با ورق بازرسی بود.



شکل ۱۳ سیگنال دریافتی از دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی بر روی ورق 6mm

در اوایل آزمایش ورق ۶mm نتیجه بر این شد که حداقل فاصله L برای بازرسی برابر با ۸۰mm و مقدار Lift-off برابر با ۳mm مناسب است. با اجرای این فواصل در پارامترهای بازگو شده در بازرسی عیوب از ۲۰٪ تا ۸۰٪ قابل شناسایی بودند. تنها عیب وارده در این حالت این است که با وجود فاصله بین آهنرباها، امکان نیمه اشباع شدن سنسورها وجود دارد و هر آزمایش باید چندین بار جهت اطمینان از محل عیوب انجام شود. همچنین علت نزدیک بودن قله‌های سیگنال های بدست آمده در ورق ۶mm این است که دو عیب ۴۰٪ و ۶۰٪ دارای حجم بیشتری نسبت به دو عیب دیگر هستند. پس از انجام آزمایش روی ورق ۶mm نوبت به آزمایش روی ورق ۱۰mm شد که نتایج بررسی مانند ورق بازرسی ۶mm با همان مقدار پارامترهای استفاده شده قابل مشاهده است. نمودار ورق ۱۰mm بازرسی شده در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.



شکل ۱۴ سیگنال دریافتی از دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی بر روی ورق ۱۰mm

همانطور که در نمودار مشخص است عیوب به خوبی در بازرسی شناسایی شده‌اند. نتایج بدست آمده با توجه به

- 10-20.
- [12] Long, Y., Zhou, H., & Li, T. (2021). A characteristic approximation approach to defect opening profile recognition in magnetic flux leakage detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-12.
- [13] Usarek, Z., Kudelski, J., & Mazurkiewicz, D. (2022). A comparative study on methods of distinction between near-and far-side defects as techniques used alongside with the magnetic flux leakage testing. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 41(1), 12.
- [14] Clapham, L., Fawley, R., & Rankin, J. (2007). Understanding magnetic flux leakage (MFL) signals from mechanical damage in pipelines—Phase I. *Journal of Pipeline Integrity*, 5(2), 75-88.
- for storage tank floors. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45(5), 328-331.
- [3] Zhiye, D., He, Y., & Li, W. (2005). 3D MFL of steel pipe computation based on nodal-edge element coupled method. *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, IEEE.
- [4] Song, X.-C., Liu, J., & Wang, Q. (2007). Optimization of the magnetic circuit in the MFL inspection system for storage-tank floors. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 43, 326-331.
- [5] Wilson, J. W., Clapham, L., & Atherton, D. (2008). New techniques for the quantification of defects through pulsed magnetic flux leakage. *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China.
- [6] Guoguang, Z., & Penghui, L. (2011). Signal processing technology of circumferential magnetic flux leakage inspection in pipeline. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE.
- [7] Pearson, N. (2012). Discrimination of top and bottom discontinuities with MFL and the Surface Topology Air-gap Reluctance System (STARS). *MENDT*.
- [8] Boat, M., Scott, A., & Hughes, T. Factors that affect the defect sizing capabilities of the magnetic flux leakage. *Silverwing (UK) Ltd., Swansea, UK, Tech. Rep.**
- [9] Lee, W. C., Chin, H. L., & Mohamed, N. (2015). Autonomous industrial tank floor inspection robot. *2015 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, IEEE.
- [10] Pullen, A. L., Price, M., & Wilcox, P. (2018). Magnetic flux leakage scanning velocities for tank floor inspection. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(9), 1-8.
- [11] Zhang, J., Wang, F., & Li, Y. (2019). A comparative study between magnetic field distortion and magnetic flux leakage techniques for surface defect shape reconstruction in steel plates. *Sensors and Actuators A: Physical*, 288,