

Experimental and numerical investigation of heat exchanger tubes based on magnetic flux leakage method

Mahmoud Abedin Darkoush¹ | Amir Refahi Oskouei²

1. Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: m.abedin.d75@gmail.com
2. Mechanic Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. E-mail: amir.refahi@sru.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 17 Nov. 2025

Revised 10 Feb. 2026

Accepted 19 Feb. 2026

Keywords:

Magnetic Flux Leakage,
Nondestructive Test,
Corrosion,
Exchanger Tube
inspection.

ABSTRACT

One of the most widely used sectors in the industry is energy, which has been given many devices with the advancement of science and its emergence in the industry. In the discussion of energy, exchange is very important, the equipment used for this purpose is heat exchangers, and the heart of the heat exchanger is its tubes, which are responsible for this important. Due to high operating temperatures and proximity to the fluid, heat exchanger tubes become corroded or have various other defects over time and must be inspected periodically. One of the non-destructive inspection methods is magnetic flux leakage, which is based on magnetic testing, which is much less expensive than other methods due to the widespread use of ferromagnetic tubes in exchangers. According to research, an exchanger that is widely used in the industry has similar specifications to the heat exchangers of Pakman Company, a 3-pass horizontal steam boiler, model PSBHN-3500, ferromagnetic, with a small diameter and thick wall. Specifically, the tubes in question have an outer diameter of 50 mm and a wall thickness of 3 mm, seamless fire-resistant steel Mn417, which poses a challenge to other non-destructive testing methods. Given the conditions of the heat exchanger tubes, including the need to access both sides, the fastest and least expensive option for identifying corrosion defects is to use the magnetic flux leakage method. In this thesis, a simulation based on studies has been carried out first, then, according to the simulation results, a real device has been built and experimental tests have also been conducted. The result of these measures has been the detection of groove and hole defects with very low depth percentages on the control tube. With increasing the current applied to the electromagnetic generator, the signal voltage received from the sensor has increased, and with increasing the air gap of the sensor, the received voltage has decreased, and with increasing the air gap between the yoke legs and the surface of the inspected part, the peak value has decreased.

Cite this article: Abedin Darkoush, M., Refahi Oskuei, A. (2025). Experimental and numerical investigation of heat exchanger tubes based on magnetic flux leakage method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 74-88.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.560270.1173>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

مطالعه تجربی و عددی عیوب داخلی لوله‌های مبدل حرارتی بر اساس روش نشت شار مغناطیسی

محمود عابدین درکوش^۱ | امیر رفاهی اسکوتی^۲۱. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: m.abedin.d75@gmail.com۲. دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، رایانامه: amir.refahi@sru.ac.ir

چکیده:

مبدل‌های حرارتی یکی از پرکاربردترین تجهیزات صنعتی هستند که به دلیل کار در دما و فشار بالا و مجاورت با سیال، درگیر خوردگی می‌شوند. تبادل انرژی بسیار مهم است و انجام آن بر عهده‌ی لوله‌های مبدل حرارتی است، بنابراین به صورت دوره‌ای مورد بازرسی قرار می‌گیرند. نشت شار مغناطیسی یکی از روش‌های پرکاربرد بازرسی غیرمخرب است که از نظر قواعد بر پایه‌ی اصول آزمون ذرات مغناطیسی استوار است. با توجه به تحقیقات مبدل‌های حرارتی در بازه ۳۵۰۰ الی ۵۰۰۰ کیلووات در صنایع گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور دقیق، لوله‌های مبدل‌های این بازه عملکردی دارای قطر بیرونی ۵۰ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۳ میلی‌متر، بدون درز و آتشیوار از جنس فولاد ساده کم کربن 17Mn4 هستند. با توجه به محدودیت دسترسی به یکطرف لوله، سریع‌ترین و کم هزینه‌ترین گزینه برای شناسایی عیوب ناشی از خوردگی استفاده از روش نشت شار مغناطیسی است. در این مقاله بر اساس مطالعات انجام شده، ابتدا دستگاه در نرم‌افزار انسیس مکسول شبیه‌سازی شده است. سپس با توجه به نتایج شبیه‌سازی نمونه واقعی دستگاه ساخته شده است و آزمایش‌های تجربی روی نمونه شاهد با عیوب شیاری از ۱۰٪ الی ۴۰٪ ضخامت جداره و سوراخ‌هایی با قطر ۴ mm که از ۲۰٪ الی ۱۰۰٪ ضخامت جداره، گرفته شده است. دستگاه ساخته شده با بهینه کردن پارامترها توانایی تشخیص عیوب با حداقل عمق ۲۰٪ را داشت. در این دستگاه با افزایش جریان اعمالی به مولد الکترومغناطیسی ولتاژ سیگنال دریافتی از حسگر افزایش داشته و با افزایش فاصله هوایی حسگر، ولتاژ دریافتی کاهش داشته است، همچنین با افزایش فاصله هوایی بین پایه‌های یوک و سطح قطعه مورد بازرسی مقدار ولتاژ کاهش داشته است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۸/۲۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:

نشت شار مغناطیسی،
آزمون‌های غیرمخرب،
بازرسی لوله، خوردگی،
مبدل حرارتی

استناد: عابدین درکوش، محمود و رفاهی اسکوتی، امیر (۱۴۰۴). مطالعه تجربی و عددی عیوب داخلی لوله‌های مبدل حرارتی بر اساس روش نشت شار مغناطیسی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۷۴-۸۸.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.560270.1173>

۱- مقدمه

باتوجه به نقش انرژی و انتقال آن در صنعت یکی از پرکاربردترین ادواتی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، مبدل‌های حرارتی هستند که به وسیله لوله‌های داخلی انرژی گرمایی را به سیال واسط منتقل می‌کنند. این لوله‌ها به دلیل کار در فشار و دمای بالا و مجاورت با سیال استهلاک بالایی دارند و در مرور زمان درگیر عیوب مختلفی مانند خوردگی می‌شوند و امکان دارد نتیجه این عیوب نشتی، انفجار و خطرات دیگر باشد اما این عیوب با چشم قابل دیدن نیستند و باید با استفاده از روش‌های آزمون غیرمخرب بازرسی شوند. یکی از روش‌های قابل اطمینان و کم هزینه برای بازرسی لوله‌ها، روش آزمون نشت شار مغناطیسی است. در این زمینه پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است که هر کدام مربوط به بازرسی نشت شار مغناطیسی در حوزه‌های مختلفی مانند کابل‌های فولادی، مخازن نفتی، میلگردهای مدفون در بتن، سازه‌های فولادی و لوله‌ها هستند. در این مقاله تمرکز بر انجام بازرسی نشت شار مغناطیسی بر روی لوله‌های فولادی می‌باشد. از مواردی که در این مقاله به آن پرداخته شده است می‌توان به تشخیص عیوب خوردگی حفره‌ای و شیاری در لوله‌های فولادی که در مبدل‌های حرارتی ایجاد می‌شوند اشاره کرد. در مطالعات گذشته به بررسی لوله‌ها با ضخامت و قطر کم پرداخته شده است اما این مدل لوله‌ها با توجه به نوع کاربری قطر کم و ضخامت دیواره بالایی دارند که این محدودیت علت عدم اشباع به وسیله پیچه داخلی است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰ جون لی و همکارانش بر روی اتوماسیون آزمون نشت شار مغناطیسی برای خطوط انتقال گاز طبیعی مطالعات ارزشمندی انجام دادند که به افزایش سرعت و دقت بازرسی منجر شد [۱].

در سال ۲۰۰۶ یوجی گوته و همکارانش مطالعه‌ای بر روی لوله‌های فین دار انجام دادند که منجر به ارائه روشی کارآمد برای تشخیص عیوب روی لوله‌های فین دار شد [۲]. سال ۲۰۰۹ هائوجانگ و همکارانش با مطالعه بر روی عیوب ایجاد شده در لوله‌های نفت و گاز توانستند با جمع‌آوری داده‌های بسیار هندسه و ابعاد عیوب را تشخیص دهند [۳].

در سال ۲۰۱۴ مائو و همکارانش توانستند یک یوک جدید با امکان بازرسی از لوله‌ها با قطرهای مختلف در یک بازه را طراحی و ارائه کنند [۴].

در سال ۲۰۱۸ لیشاپنگ و همکارانش با مطالعه بر روی تاثیر فاصله‌هوایی حسگر رابطه‌ی بین گپ بین حسگر و قطعه را به صورت شبیه‌سازی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند و با تطبیق داده‌ها توانستند تایید نتایج تئوری را در بخش تجربی دریافت کنند [۵].

هوینگلی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ موفق به توسعه روش بازرسی نشت شار مغناطیسی برای لوله‌های بویلرها شدند که خطای تشخیص عمق عیب در این شرایط برابر با ۶.۴٪ بود [۶].

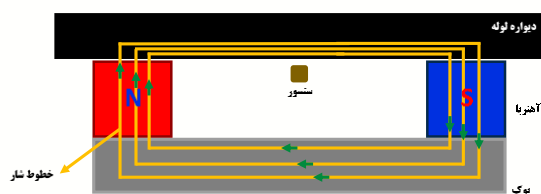
دیویر تروینو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ مطالعاتی را بر روی روش دیگری برای داده‌برداری در سیستم نشت شار مغناطیسی به سرانجام رساندند و نتایج این روش را با روش‌های متداول اثرهال مقایسه کردند. نتیجه حاصل هرچند دقت بالاتری را در روش جدید گزارش می‌کردند اما با توجه به پارامترهای دیگر این روش در مقایسه با روش اثرهال نیاز به بررسی‌های بیشتر برای ورود به بازار تجاری دارد [۷].

هایاشی و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای غلبه بر مشکلات بازرسی میلگردهای مدفون در بتن، روشی را برای تشخیص و تصویربرداری از سیگنال عیب با استفاده از آزمون نشت شار مغناطیسی غیراشباع با ترکیب یک پراب آرایه حسگر مغناطیسی توسعه داده‌اند و موفق به بازرسی میلگرد تا عمق ۱۰۰mm شدند. نشت شار مغناطیسی غیراشباع روشی است که از یک میدان مغناطیسی متناوب در ویژگی‌های مغناطیسی اولیه فولاد استفاده می‌کند، که در مقایسه با روش MFL معمولی نیازی به میدان مغناطیسی اعمال شده قوی ندارد [۸].

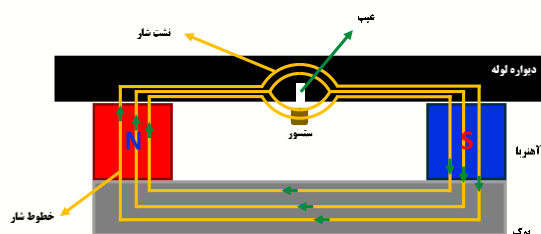
لو و همکاران در سال ۲۰۲۲ موفق به توسعه ربات‌های بازرسی کابل فولادی مارپیچ مورد استفاده در پل‌های کابلی شدند. آن‌ها با تغییر در مدار مغناطیسی و مدل‌سازی‌های پیچیده به روش المان محدود موفق به افزایش دقت بازرسی کابل‌ها تا ۹۵.۲۳٪ شدند [۹].

جی و همکاران در سال ۲۰۲۳ به منظور بهینه‌سازی

روشی که در گذشته از آن استفاده می‌شد تا ذرات در محل عیب، به‌صورت تجمعی جمع شوند و عیب را نمایان کنند. در این روش امکان بازرسی بسیاری از قطعات مختلف وجود دارد که وجه اشتراک تمامی قطعات، فرومغناطیسی بودن آن‌ها است. روش نشت شارمغناطیسی نیز بر همین مبنا و در ادامه بازرسی ذرات مغناطیسی گسترش یافته است. این دستگاه شامل قسمت‌های مختلفی چون یوک^۲، مولد میدان، حسگر و دریافت کننده می‌باشد که در این مقاله با توجه به مشخصات دستگاه استفاده از انواع حسگرها با بازه‌ها و حساسیت‌های مختلف و مولدهای میدان دائمی مانند آهنربای دائمی و مولدهای الکترومغناطیس با اعمال جریان‌های مستقیم و متناوب امکان پذیر است که در این مقاله ابتدا از آهنربای دائمی^۳ و سپس از آهنربای الکترومغناطیسی^۴ با جریان مستقیم استفاده شده است.



الف) مدار مغناطیسی دستگاه بدون حضور عیب



ب) مدار مغناطیسی دستگاه در حضور عیب

شکل ۱) اساس عملکردی دستگاه بدون عیب و در حضور عیب

مطابق شکل ۱، در این دستگاه از حسگر (Sensor) با فاصله هوایی مناسب از قطعه مورد بازرسی، یوک که تکمیل کننده مدار مغناطیسی است و آهنربای دائمی که مولد میدان مغناطیسی است استفاده شده است.

همان‌گونه که قابل مشاهده است، در حالت (الف) شکل ۱، مدار مغناطیسی بدون حضور عیب در مسیر مستقیم

طراحی قسمت یوک دستگاه تشخیص نشت شارمغناطیسی برای حلقه آویز U شکل مورد استفاده در خطوط انتقال برق و بهبود حساسیت و دقت آن در تشخیص عیوب حلقه آویز U شکل، یک ساختار یوک نیم حلقه بهبود یافته بر اساس ساختار یوک سنتی معرفی کردند که باعث بهبود پیک دریافتی در محل عیب می‌شد [۱۰].

در سال ۲۰۲۴ وانگ و همکاران برای افزایش دقت بازرسی خطوط انتقال نفت با ترکیب روش نشت شار مغناطیسی و یادگیری ماشین^۱ و با استفاده از قابلیت‌های هوش مصنوعی روشی ارائه کردند که با کاهش دخالت نیروی انسانی و کاهش خطای انسانی دقت بازرسی‌ها را افزایش می‌دهد [۱۱].

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۵ فی و همکارانش یک روش مبتنی بر روش نشت شارمغناطیسی برای تشخیص خوردگی در خطوط لوله زیر دریا توسعه دادند که با استفاده از یک مدل المان محدود سه‌بعدی، اثرات هندسه نقص، فاصله بلند شدن و سرعت عملکرد بر روی سیگنال‌های دریافتی را تجزیه و تحلیل می‌کند. این مطالعه یک روش تخمین نقص را بر اساس مقادیر محوری قله تا دره و فاصله پیک شعاعی پیشنهاد می‌کند، که با دقت بالا در برابر نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی شده است ارائه می‌دهد [۱۲].

با توجه به مطالعات نیاز به بازرسی لوله‌هایی که قطر کم و گوشت زیاد دارند و در ادوات بسیاری از جمله مبدل حرارتی استفاده می‌شوند مغفول مانده است، لذا در این مقاله ابتدا به مطالعه، شبیه سازی، ساخت و بهینه سازی دستگاهی جهت بازرسی لوله‌های مبدل حرارتی پرداخته شود.

۱-۱ معرفی بازرسی نشت شار مغناطیسی

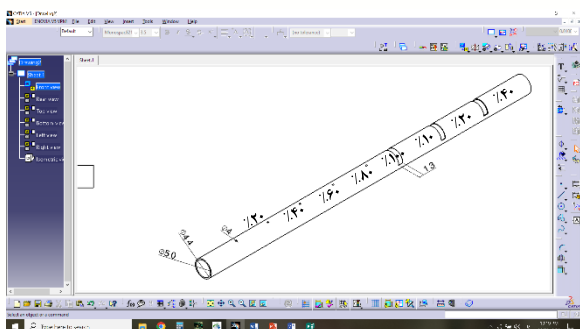
برای آشنایی با این آزمون، لازم است ابتدا به ریشه آن اشاره کنیم. مبنای آزمون، آزمون ذرات مغناطیسی است؛

² Yoke

³ Permanent Magnet

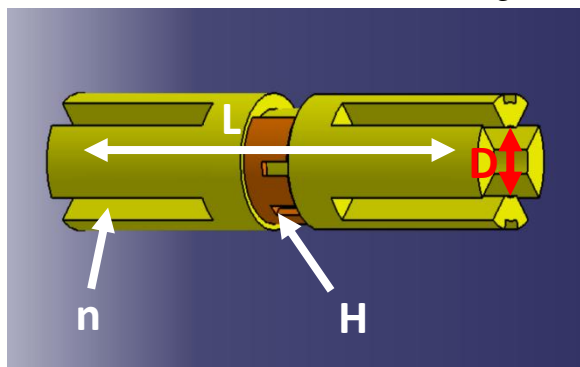
⁴ Electromagnet

¹ Machine learning



شکل ۷) نمونه شاهد طراحی شده

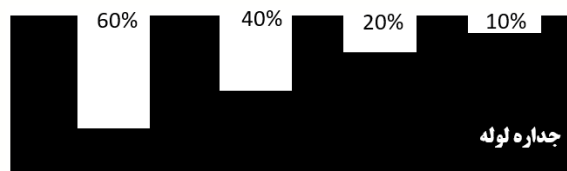
طبق شکل ۷ مشخصات لوله شاهد بدین شرح است: طول لوله ۱۰۰۰mm، قطر داخلی لوله ۴۴mm، و قطر خارجی لوله ۵۰mm و ضخامت دیواره لوله ۳mm می‌باشد. در آزمون نشت شارمغناطیس زمانی بیشترین نشت از عیب را خواهیم داشت که قطعه مورد بازرسی به اشباع رسیده باشد تا خطوط شار توانایی چگال شدن را نداشته و در بیشترین مقدار ممکن نشت پیدا کنند که با توجه به این نکته اولین هدف در شبیه‌سازی به اشباع رساندن قطعه مورد بازرسی است. مسیر پیشبرد کار به این صورت تعریف شد که با تغییر یک پارامتر و ثابت ماندن بقیه آن‌ها، رابطه بین پارامتر متغیر با اشباع قطعه مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفتند شامل: فاصله حسگر تا سطح قطعه (H)، تعداد آهنرباها (n)، فاصله آهنرباها (L)، راهنمای شار (d,h) و هسته فریتی (D) می‌باشند. این پارامترها برای درک بهتر مخاطب در شکل ۸ به نمایش گذاشته شدند.



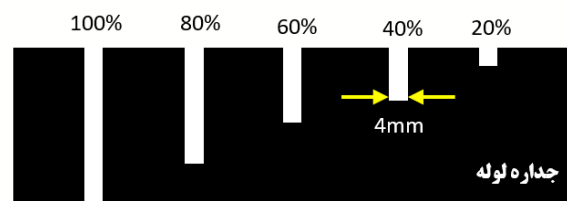
¹ Liftoff

نرم‌افزار برپایه‌ی روش المان محدود اقدام به حل مسائل و آنالیزهای لازم می‌کند.

ابتدا به مشخصات نمونه شاهد پرداخته می‌شود که براساس شیوه‌نامه منتشر شده از شرکت معتبر OLYMPUS NDT CANADA و استاندارد ASME Section V Article 16 طراحی شده است. بر اساس استاندارد نمونه شاهد برای قطر مورد نظر باید دارای عیوب شیاری و سوراخ باشد که عیوب شیاری باید با عرض ۱۳mm و حداقل عمق ۱۰٪ ضخامت نمونه باشد و عیوب سوراخ با توجه به قطر لوله شاهد انتخاب شده در این مقاله با قطر ۴mm و با عمق ۴۰٪ الی ۱۰۰٪ ضخامت باشد و حداقل طول لوله ۲۰۰mm می‌باشد. عیوب سوراخ طبق شکل ۶ با عمق‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪، ۱۰۰٪ عیوب شیاری طبق شکل ۵ با عمق‌های ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ می‌باشند که با توجه به پیشروی شرکت‌های فعال در این زمینه و کاهش عمق سوراخ‌ها به ۲۰٪ در دستگاه‌های موجود در این مقاله بر روی عیوب با درصد عمق ۲۰٪ و کمتر نیز بررسی صورت گرفته است. با توجه به سختی تشخیص عیوب با درصد عمق کم‌تر می‌توان اینگونه استنباط کرد که با تشخیص عیب با درصد عمق کم‌تر، دستگاه قابلیت بازرسی عیوب با درصد عمق بیشتر را خواهد داشت.



شکل ۵) عمق عیوب شیاری



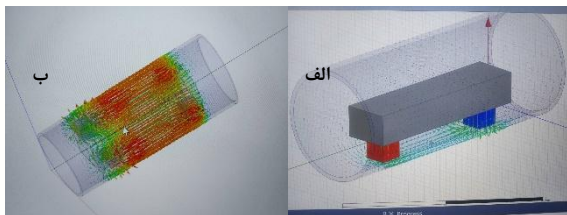
شکل ۶) عمق عیوب سوراخ

جنس لوله شاهد، راهنماها و هسته 1010 Steel و جنس آهنرباها Nd35، جنس حماله و نگهدارنده حسگرها نیز ABS تعریف شد. با توجه به موجودی بازار ابعاد آهنرباها ۲۵×۱۰×۱۰mm تعریف شد که قطب‌ها در وجه ۲۵×۱۰mm تعریف شدند. مش‌بندی نیز به صورت خودکار تنظیم شد.

جدول ۱) بازه تعریفی برای پارامترهای موثر یوک اول

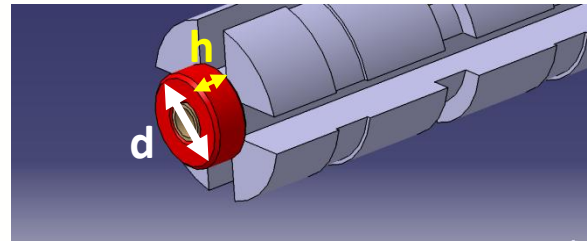
پارامتر	بازه تغییرات هر پارامتر						
	واحد	۶	۵	۴	۳	۲	۱
تعداد آهنرباها	n	-	-	-	۴	۲	۱
فاصله آهنرباها	L (mm)	۳۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۲۰	۱۶۰
راهنمای شار	h (mm)	-	۱۰	۵	۴	۳	۲
	d (mm)	-	∅ ۴۳	∅ ۴۰	∅ ۳۰	∅ ۲۰	-
هسته فریتی	D (mm)	∅ ۲۳	∅ ۲۰	∅ ۱۵	∅ ۱۰	∅ ۵	بدون هسته
فاصله آهنرباها تا سطح قطعه	l (mm)	-	-	۴	۳	۲	۱
فاصله هوایی حسگر	H (mm)	۳	۲.۵	۲	۱.۵	۱	۰.۵

طبق جدول ۱ تعداد آهنرباها از ۱ جفت تا ۴ جفت مورد بررسی قرار گرفت که در حالت ۱ جفت قطعه به اشباع نرسیده بود. در حالت ۲ جفت نیز قطعه در نزدیکی آهنربا اشباع شده بود اما در فاصله وسط دو آهنربا به اشباع نرسیده بود و با ۳ جفت آهنربا به حدود اشباع رسیده بود ولی این اشباع شدن در قطعه مورد بازرسی یکنواخت نبود که منجر به استفاده از ۴ جفت آهنربا شد که هم یکنواختی اشباع قطعه در وسط فاصله بین دو آهنربا به اشباع می‌رسید.



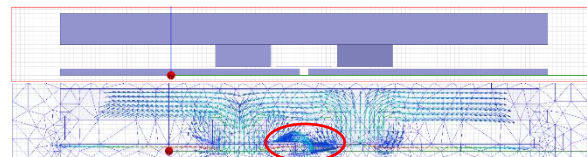
شکل ۱۱) استفاده از الف) ۱ جفت و ب) ۴ جفت آهنربا

همچنین برای فاصله آهنرباها (L) مقادیر ۳۰mm، ۴۰mm، ۶۰mm، ۸۰mm، ۱۲۰mm، ۱۶۰mm بررسی شد که در فواصل بیشتر از ۸۰mm سیگنال از عیوب سوراخ کم عمق تر از ۱۰٪ دریافت نشد و در فواصل ۶۰mm و کمتر سیگنال عیوب سوراخ ۸۰٪ دریافت شد بنابراین فاصله مطلوب برای آهنرباها ۳۰mm، ۴۰mm، ۶۰mm خواهد بود و در این بین قوی‌ترین سیگنال بدون اشباع حسگرها از فاصله ۳۰mm

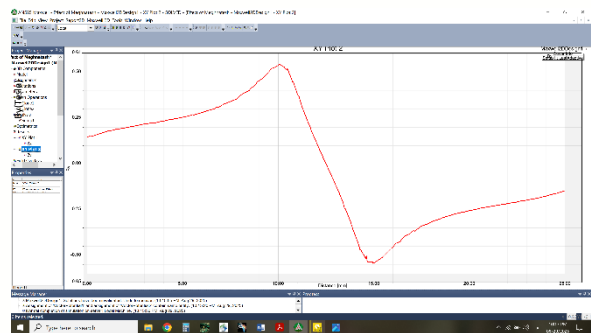


شکل ۸) پارامترهای موثر یوک اول

در شبیه سازی، حسگرها به صورت یک خط بازرسی^۱ تعریف شدند و لوله شاهد برای همه به صورت واحد شبیه‌سازی شد و عیوب استاندارد بر روی لوله ایجاد شدند.



شکل ۹) خطوط شار میدان در حضور عیب روی خط بازرسی

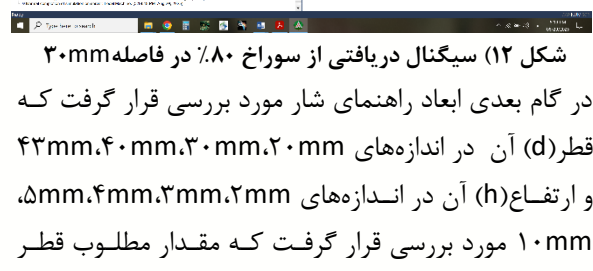
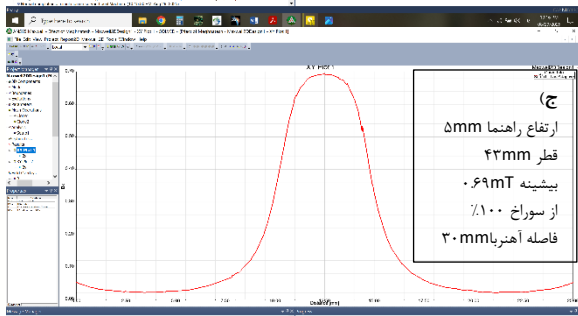
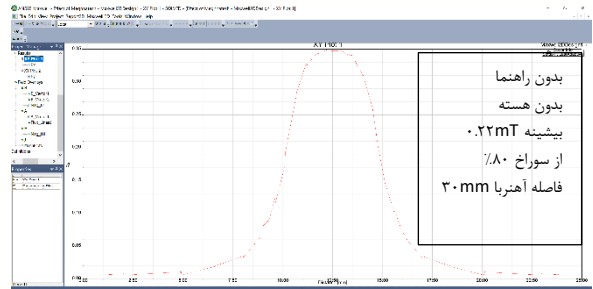
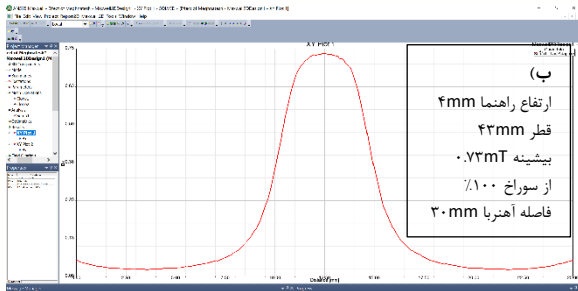


شکل ۱۰) سیگنال دریافتی از سوراخ ۱۰٪ در حالت اشباع

در شکل ۹ شکل شار روی خط حسگر از سوراخ ۱۰٪ نمایش داده شده است و در شکل ۱۰ سیگنال دریافتی از همان حسگر به نمایش گذاشته شده است. می‌توان دید که شکل سیگنال دریافتی مانند تغییرات مولفه میدان در راستای محور Y می‌باشد. در ادامه مسیر به بازه تعریف شده برای پارامترهای موثر معرفی شده در جدول ۱ می‌پردازیم.

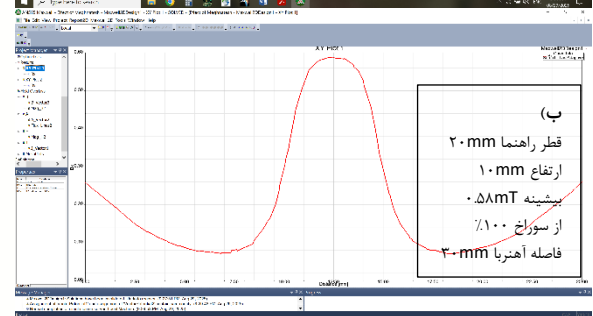
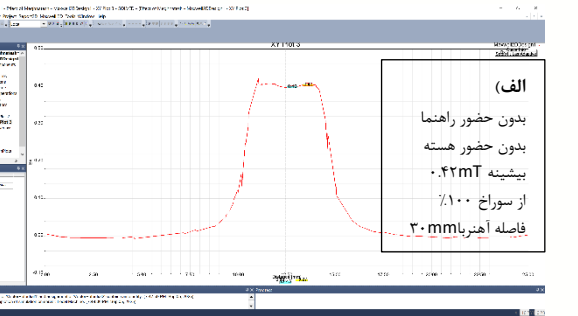
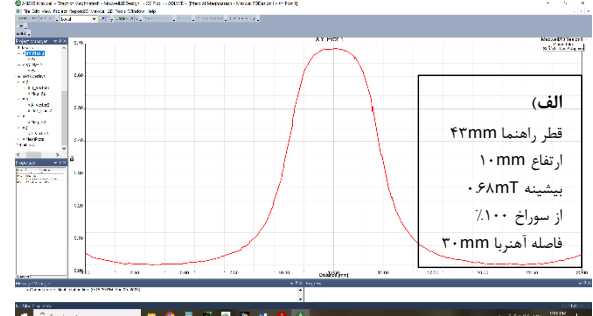
^۱ PolyLine

دریافت شد.

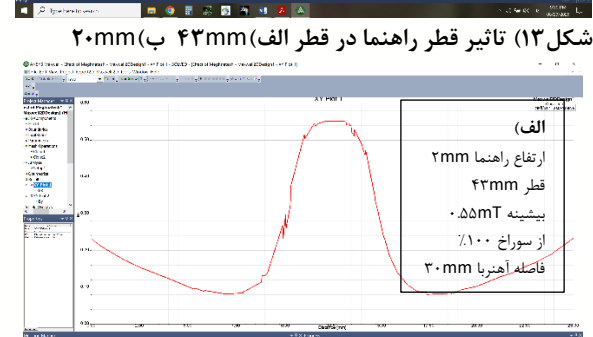
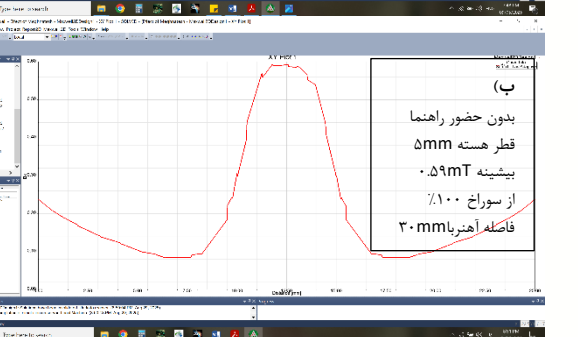


شکل ۱۲) سیگنال دریافتی از سوراخ ۸۰٪ در فاصله ۳۰mm در گام بعدی ابعاد راهنمای شار مورد بررسی قرار گرفت که قطر (d) آن در اندازه‌های ۴۳mm، ۴۰mm، ۳۰mm، ۲۰mm و ارتفاع (h) آن در اندازه‌های ۵mm، ۴mm، ۳mm، ۲mm مورد بررسی قرار گرفت که مقدار مطلوب قطر ۴۳mm و مقدار ارتفاع مطلوب ۴mm مشخص شد.

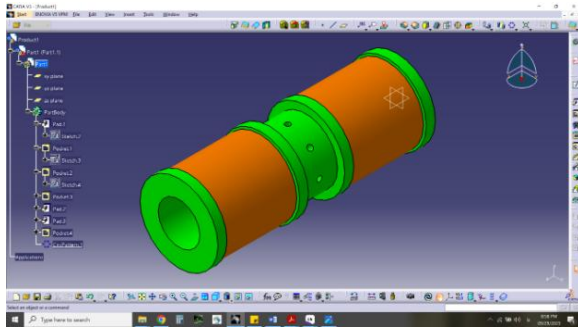
شکل ۱۴) تاثیر ارتفاع راهنما در الف) ۲mm، ب) ۴mm، ج) ۵mm در گام بعد قطر هسته در اندازه‌های ۲۳mm، ۲۰mm، ۱۵mm، ۱۰mm، ۵mm مورد بررسی قرار گرفت که خروجی تمامی مقادیر در یک بازه با اختلاف اندک قرار داشتند اما بدون حضور هسته، میدان دریافتی کاهش زیادی داشت. لذا قطر مطلوب با فاصله هوایی حسگر تا قطعه^۱ تنظیم شد.



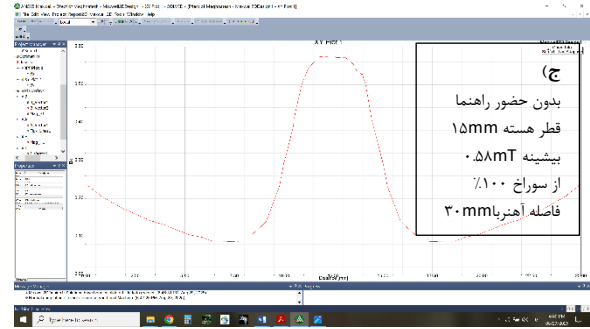
شکل ۱۳) تاثیر قطر راهنما در الف) ۴۳mm، ب) ۲۰mm



¹ Lift-off



شکل ۱۶) یوک دوم



شکل ۱۵) تاثیر هسته فریتی

الف) بدون هسته ب) ۵mm ج) ۱۵mm

با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی یوک اول و با توجه به یکسان بودن پارامترهای موثر این دو یوک می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر تغییر پارامترهای موثر یوک اول و دوم از نظر ساختاری یکسان بوده و تفاوت‌های اندکی خواهند داشت که این تفاوت مرتبط با مولد میدان و پارامترهای آن خواهد بود؛ لذا در شبیه‌سازی یوک دوم تمرکز بر روی مولد میدان و تاثیرات آن بود. با شبیه‌سازی یوک دوم و انجام بررسی‌ها نتیجه اعمال جریان ۳ آمپری میدان مغناطیسی ۱.۸T در نقطه وسط دو پیچه بود که بیش از ۸۰٪ از میدان ایجاد شده با ۴ جفت آهنربا که برابر ۱T بود قوی‌تر شده بود. با توجه به تفاوت بسیار زیاد اندازه میدان یوک اول در حالت شبیه‌سازی با تجربی بعد از ساخت یوک دوم ابتدا میدان آن با دستگاه گوس‌متر^۱ با جریان ۶ آمپر اندازه‌گیری شد و با میدان حاصل از یوک اول مقایسه شد. بعد از اندازه‌گیری و مقایسه بین میدان حاصل در یوک اول با یوک تازه ساخته شده به این نتیجه رسیدیم که با توجه به ضعیف‌تر بودن میدان حاصل از یوک دوم نسبت به یوک اول و عدم دریافت سیگنال در یوک اول یوک دوم نیز سیگنالی دریافت نخواهد کرد.

در جدول ۳ مقادیر مربوط به شبیه‌سازی یوک دوم آورده شده است.

فاصله آهنربا تا سطح قطعه نیز در مقادیر ۱mm، ۲mm، ۳mm، ۴mm مورد بررسی قرار گرفت که اندازه مطلوب آن ۱mm بود. در گام آخر فاصله هوایی حسگر (H) در اندازه‌های ۰.۵mm، ۱mm، ۱.۵mm، ۲mm، ۲.۵mm، ۳mm مورد بررسی قرار گرفتند که مقدار مطلوب ۱mm تعیین شد.

جدول ۲) مقادیر مطلوب در شبیه‌سازی یوک اول

پارامتر	مقدار مطلوب
فاصله هوایی حسگر (H)	۱mm
تعداد آهنربا (n)	۴ جفت
قطر و ارتفاع راهنمای شار (d, h)	d=۴۳mm h=۴mm
قطر هسته فریتی (D)	۲۳mm
فاصله آهنربا تا سطح قطعه (l)	۱mm
فاصله آهنرباها از یکدیگر (L)	۳۰mm

در این بخش تمامی مقادیر مفروض تئوری مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر مطلوب مشخص شد. در گام بعدی به ساخت و بخش تجربی پرداخته خواهد شد.

۲-۲) یوک دوم

با توجه به انجام آزمون‌های تجربی یوک اول و عدم دریافت سیگنال، یک یوک جدید طراحی و ساخته شد. در یوک دوم مولد میدان به صورت الکترومغناطیسی در نظر گرفته شد. یوک دوم از نظر ساختاری مشابه یوک اول می‌باشد. یوک دوم در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.

¹ Gauss Meter

طول پیچه جدید ۱۶۰mm، بیشینه قطر ۸۰mm، فاصله تا لوله ۷۷mm، ضخامت آن ۴۱mm، قطر سیم مسی استفاده شده در پیچه ۱.۴mm، جریان مداوم کاری ۱۰ آمپر، تعداد دور پیچه ۱۱۰۰ دور و فاصله بیرون به بیرون پایه‌های آن ۲۴۷mm می‌باشد. پارامترهای موثر یوک سوم در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴) بازه تعریفی برای پارامترهای موثر یوک سوم

پارامتر	بازه تغییرات هر پارامتر			
	۱	۲	۳	۴
جریان اعمالی	۳	۶	۱۰	۲۰
فاصله حسگر تا سطح قطعه	۱.۵	۱	۰.۵	۰.۲۵
فاصله یوک تا سطح قطعه	۵	۴	۳	۲

در بازه‌های معرفی شده برای تمامی پارامترهای موثر شبیه‌سازی صورت گرفت و مورد بررسی قرار داده شد. جریان ۳A و ۶A اعمال شد و هیچ سیگنالی دریافت نشد اما با اعمال جریان ۱۰A و ۲۰A سیگنال‌های عیوب سوراخ از ۴۰٪ دریافت شد لذا مقدار مطلوب جریان برای پیچه ۱۰A و ۲۰A می‌باشد. همچنین فاصله حسگرها تا سطح قطعه با مقادیر اعلامی مورد بررسی قرار گرفت که در لیفت‌آف ۰.۲۵mm، ۰.۵mm، ۱mm، ۱.۵mm سیگنال مطلوب دریافت شد. با افزایش فاصله قدرت سیگنال کاهش پیدا می‌کرد. همچنین فواصل پایه‌های یوک تا سطح قطعه مورد بررسی قرار گرفت و در فواصل بیشتر از ۲mm عیوب سوراخ با درصد عمق کم‌تر از ۶۰٪ قابل شناسایی نبودند. در جدول ۵ مقادیر مطلوب آورده شده است.

جدول ۵) مقادیر مطلوب یوک سوم

پارامتر	مقدار مطلوب	واحد
جریان اعمالی	۱۰ و ۲۰	آمپر/A
فاصله حسگر تا سطح قطعه	۱ و ۰.۵ و ۰.۲۵	mm
فاصله یوک تا سطح قطعه	۲	mm

۳- ساخت و آزمون‌های تجربی

در این قسمت با کمک اطلاعات به دست آمده در بخش

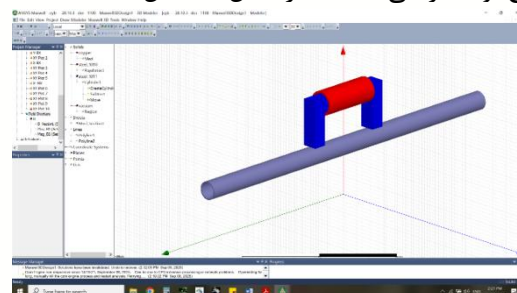
جدول ۳) مقادیر شبیه‌سازی و آزمون یوک دوم

پارامتر	بازه تغییرات هر پارامتر		
	۱	۲	۳
جریان اعمالی	۳	۶	۱۰
راهنمای شار	۴	-	-
هسته شار	Ø ۲۳	-	-
ابعاد سیم پیچ	۴۰	-	-
	۱۰	-	-
	۲۴۰	-	-
	-	-	دور

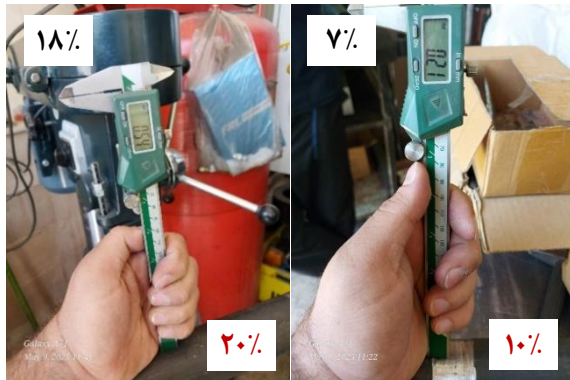
۲-۳ یوک سوم

بعد از عدم دریافت سیگنال در یوک اول و دوم به بررسی علت پرداخته شد. با توجه به اندازه گیری میدان با دستگاه گاوس‌متر اولین مورد تفاوت میدان تولیدی توسط مولد بود. با بررسی مشخصات مولد انتخاب شده در نرم‌افزار و مقایسه آن با میدان تجربی حاصل مشخص شد که قطعه تعریف شده در نرم‌افزار با نمونه مشابه تهیه شده از بازار تفاوت قابل توجهی را دارد که میدان تولیدی در شبیه‌سازی ۴ برابر میدان تولیدی شبیه‌سازی است. در یوک اول میدان بیشینه در بین آهنرباها برابر با ۱.۴T بود که در آزمون تجربی این عدد ۰.۳۹۸T که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. با توجه به این نکته که میدان در حالت تجربی کم‌تر از ۳۰٪ شبیه‌سازی است، در یوک سوم شبیه‌سازی اصلاح شد.

به دلیل ضعف میدان اعمالی، نیاز به تقویت میدان داشتیم. با توجه به فضای محدود داخل لوله در یوک سوم به سمت بازرسی خارج از لوله رفتیم تا محدودیت قطر داخلی لوله (۴۴mm) را نداشته باشیم و یوک سوم برای بازرسی از خارج لوله طراحی شد که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.

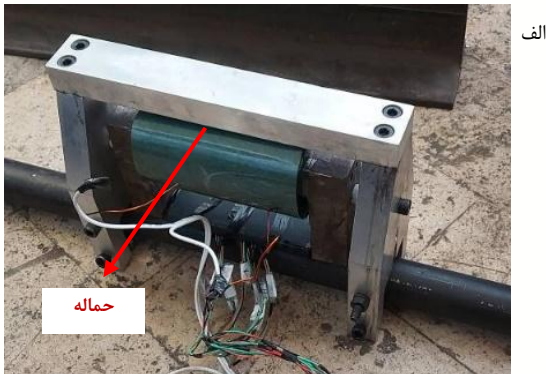


شکل ۱۷) یوک سوم

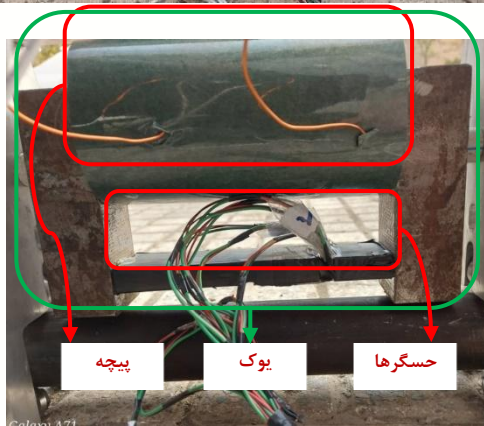


شکل ۱۹) عمق اسمی و عمق واقعی ایجاد شده در سورخ و شیار

طبق شکل ۱۷ که مدل شبیه‌سازی شده‌ی یوک سوم را نشان می‌دهد، دستگاه ساخته شد و یک حماله مناسب به منظور حمل یوک بر روی طراحی و اجرا گردید.



الف



ب

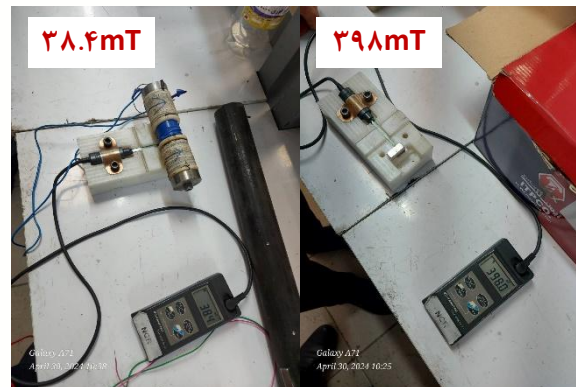
شکل ۲۰) الف-حماله و ب-اجزاء دستگاه

در این دستگاه از یک آرایه حسگر ۸ تایی اثرهال موجود در بازار استفاده شده است. این حسگرها به صورت عمود بر محور لوله چیدمان شده‌اند. برای پردازش داده‌های دریافتی از کیت آردوینو (MEGA2560) استفاده شده است. علت استفاده از این مدار وجود تقویت کننده، برنامه نویسی با نرخ داده برداری بالا و بهره‌گیری از پردازنده ۱۰ بیتی می‌باشد

شبیه‌سازی به ساخت دستگاه بازرسی نشت شار مغناطیسی و انجام آزمون‌های تجربی پرداخته شده است.

۳-۱ یوک اول و دوم

پس از ساخت یوک اول و دوم و انجام آزمون‌های عملی، هیچگونه سیگنالی دریافت نشد. با اندازه‌گیری میزان میدان تولیدی از مولد هر یوک، مشخص شد که تفاوت بسیار زیادی میان مقادیر خروجی شبیه‌سازی و نتایج آزمون عملی وجود دارد.



شکل ۱۸) میدان حاصل از مولد یوک اول و دوم

با توجه به عدم دریافت سیگنال و بررسی‌های بعدی، مشخص شد که علت اصلی، ضعف میدان تولیدی توسط دو مولد بوده است.

۳-۲ یوک سوم

در گام بعدی با مشخص شدن ضعف میدان و عدم وجود فضای کافی در داخل لوله با قطر داخلی ۴۴mm تصمیم بر ساخت دستگاه بازرسی از خارج لوله گرفته شد.

۳-۲-۱ تجهیزات مورد نیاز

در این بخش، ابتدا قسمت‌های مختلف دستگاه به صورت مجزا ساخته شده و سپس به یکدیگر متصل می‌شوند. نخستین بخش، نمونه شاهد است که شامل یک لوله با قطر خارجی ۵۰mm و قطر داخلی ۴۴mm (ضخامت ۳mm) و طول ۱۱۰۰mm می‌باشد. جنس لوله مطابق با نمونه یاد شده در مقدمه می‌باشد که عیوب استاندارد روی آن ایجاد شد. با توجه به تغییر یوک و ابعاد آن عیوب به ترتیب شیار ۱۰٪، سوراخ ۱۰٪، ۰٫۸۰٪، ۰٫۶۰٪، ۰٫۴۰٪، ۰٫۲۰٪ به صورت منظم روی لوله با فواصل مشخص ایجاد شدند.

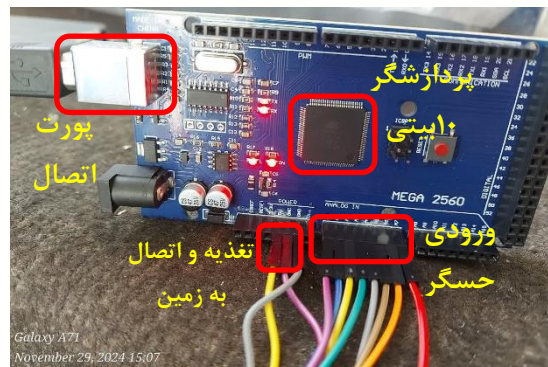
در پارامتر گپ بین پایه‌های یوک و قطعه مورد بازرسی بود. در شبیه‌سازی اعداد بسیار کوچک باشد قابل اجرا بود اما در آزمون تجربی به دلیل برخورد این امکان وجود نداشت. مهم‌ترین تفاوت شبیه‌سازی با بخش تجربی در سیگنال دریافتی با دو سرعت متفاوت 1m/s و 0.25m/s بود. سیگنال دریافتی در این دو حالت با یکدیگر متفاوت بودند، علت این تفاوت بعد از انجام بررسی و مطالعه، تاثیر سرعت بر ایجاد جریان گردابی و لرزش‌های متفاوت است که تاثیر لرزش‌ها بسیار بیشتر از جریان‌های گردابی است چراکه سرعت پایین در انجام آزمون‌ها انتخاب شده بود. حرکت حماله با سرعت زیاد بر روی لوله باعث ایجاد جریان‌های گردابی بر روی سطح قطعه می‌شود. جریان‌های گردابی ایجاد شده خود تولید میدان مغناطیسی در جهت عمود بر سطح قطعه می‌کنند که باعث تاثیر بر خروجی حسگرها می‌شود. برای حذف این جریان، حماله باید با سرعت کم‌تر از 0.5m/s حرکت کند. تفاوت دیگری که مشاهده شد تاثیر نویزهای محیطی در محل بازرسی بر سیگنال دریافتی بود. با وجود دستگاه‌های مختلف الکتریکی و مغناطیسی در فاصله ۲ متری دستگاه نویز شدیدی بر خروجی حسگرها ایجاد می‌کرد. با افزایش فاصله، شدت این نویزها به صورت قابل توجهی کاهش داشت و بر نتایج بازرسی تاثیر مخربی نداشت. پس از انجام آزمون‌های تجربی، مقادیر مطلوب در شرایط تجربی به دست آمد که این مقادیر در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶) مقادیر مطلوب در آزمون تجربی یوک سوم

پارامتر	مقدار بهینه	واحد
تعداد دور سیم پیچ	۱۱۰۰	دور
جریان اعمالی	۲۰	آمپر
فاصله‌هوایی حسگر	۰.۵	میلیمتر
فاصله‌هوایی پایه‌های یوک	۲	میلیمتر

در جدول ۶ تمامی پارامترها در شرایط آزمون تجربی بررسی شده و مقدار بهینه هر یک تعیین شده است. از این

که امکان پردازش با سرعت بالا و اضافه کردن فیلتر و تقویت سیگنال را دارد.



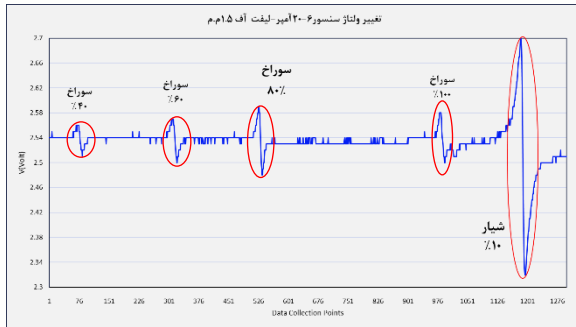
شکل ۲۱) کیت آردوینو MEGA 2560

این برد شامل ۸ ورودی دیجیتال و ۸ ورودی آنالوگ برای حسگرها و تغذیه ۵ ولت می‌باشد. حسگرهای استفاده شده خروجی را به شکل ولتاژ به کیت پردازش کننده ارسال می‌کنند. کیت بعد از پردازش اولیه و تبدیل داده‌ها به سیگنال و تقویت آن، اطلاعات به نرم‌افزار ارسال شده و بصورت گرافیکی به نمایش گذاشته می‌شوند.

۴- نتایج و بحث

تمام اعدادی که در بخش تئوری شبیه‌سازی شده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مقادیر بهینه به دست آمدند. تمامی مقادیر مطلوب و برخی مقادیر نامطلوب هر پارامتر در بخش تجربی مورد بررسی قرار گرفتند.

در آزمون‌های تجربی تفاوت‌هایی نسبت به آزمون‌های شبیه‌سازی وجود داشت. به‌عنوان نمونه در شبیه‌سازی، به هر میزان لیفت‌آف حسگر کمتر باشد، سیگنال قوی‌تری دریافت خواهد شد. با این حال، در آزمون تجربی مشاهده شد که هرگاه لیفت‌آف حسگر از 0.5mm کمتر شود، به دلیل لرزش بیش از حد، نویز زیادی ایجاد می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که در عمل، نسبت سیگنال به نویز (SNR) کاهش یافته و سیگنال عیوب سوراخ با عمق ۴۰٪ و ۲۰٪ به صورت کامل در نویز ادغام می‌شود و قابل تشخیص نیست. تفاوت دوم آزمون تجربی با شبیه‌سازی در دریافت سیگنال با جریان ۱۰A و ۲۰A بود. در آزمون تجربی با جریان ۱۰A عیوب زیر ۶۰٪ تشخیص داده نمی‌شدند اما در شبیه‌سازی با جریان ۱۰A تمام عیوب تشخیص داده شدند. تفاوت سوم



شکل ۲۵) سیگنال دریافتی با جریان ۲۰ آمپر

در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود که با افزایش جریان، بدون تنظیمات بهینه، دستگاه قادر است عیوب با عمق ۴۰٪ و بیشتر را تشخیص دهد. علت واژگونه بودن نمودار، حرکت رفت و برگشت بر روی لوله است.

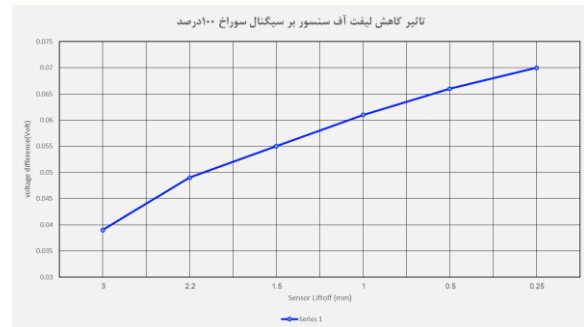
در گام نهایی دستگاه با استفاده از مقادیر بهینه‌ای که از آزمون‌های تجربی به دست آمده بود، مجدداً تنظیم شد و فرایند بازرسی یک‌بار دیگر تکرار گردید. نتیجه حاصل از تنظیمات بهینه در شکل ۲۶ قابل مشاهده است.



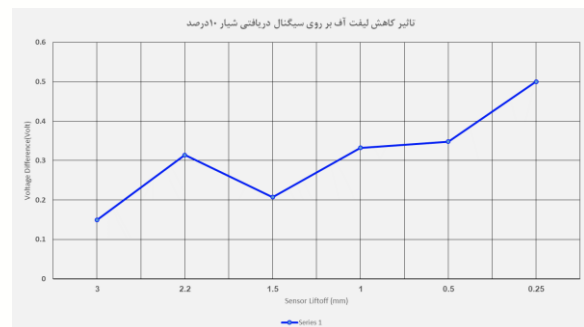
شکل ۲۶) سیگنال دریافتی با تنظیم نهایی دستگاه

با توجه به شکل ۲۶ عیب‌های سوراخ با عمق ۲۰٪ و عیب‌های شیار با عمق ۱۰٪ نیز توسط دستگاه ساخته شده با تنظیمات در حالت بهینه قابل شناسایی هستند. در بخش پایانی سیگنال‌های جمع‌آوری شده در شبیه‌سازی با نتایج آزمون تجربی مقایسه شده است که در شکل ۲۲ قابل مشاهده می‌باشد.

مقادیر برای تنظیمات نهایی دستگاه استفاده خواهد شد و نتایج مربوط به آن گزارش می‌شود. یکی از پارامترهای موثر لیفت‌آف حسگر است که تاثیر آن در شکل ۱۷ و ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌گونه که نمودار نشان می‌دهد، کاهش لیفت‌آف حسگر به طور مستقیم موجب افزایش سیگنال دریافتی می‌گردد.



شکل ۲۲) تاثیر فاصله‌هوایی حسگر بر سیگنال سوراخ ۱۰٪



شکل ۲۳) تاثیر کاهش لیفت‌آف بر روی سیگنال شیار ۱۰٪

از دیگر پارامترهای موثر، جریان اعمالی بر پیچه بود که تاثیر آن را در سیگنال دریافتی در شکل ۲۴ مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۴) سیگنال دریافتی با جریان ۱۰ آمپر

در شکل ۲۴ لیفت‌آف حسگرها ۱.۵mm و گپ پایه‌های یوک ۲mm تنظیم شده است.

سیگنال از عیوب مشخص شده در استاندارد موفق به دریافت سیگنال از عیوب سوراخ ۰.۱۸٪ و شیار ۰.۷٪ نیز شد.

از مهم‌ترین راهکارهای استفاده شده برای دریافت سیگنال مناسب تنظیم قدرت میدان مغناطیسی مناسب برای قطعه مورد بازرسی بود، همانطور که ذکر شد در یوک‌های اول و دوم به دلیل عدم اعمال میدان مغناطیسی کافی به قطعه حسگرها هیچ‌گونه سیگنالی دریافت نکردند و با توجه به این ضعف، در یوک سوم تلاش بر تقویت مولد میدان، تولید و اعمال میدان کافی بر قطعه مورد بازرسی شده است و نتیجه، دریافت سیگنال قابل اطمینان از عیب شیار با عمق واقعی ۷ درصد و سوراخ با عمق واقعی ۱۸ درصد شد.

۶- تشکر و قدردانی

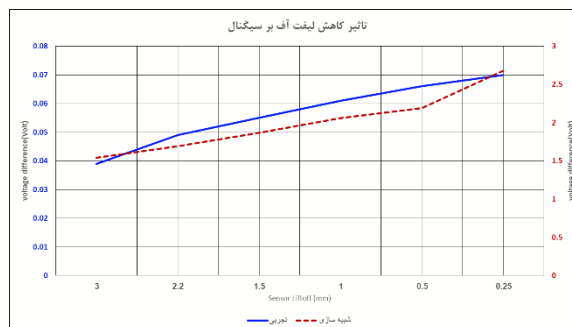
با تشکر از مهندس پیمان عنایتی، محمدرضا قادری و محمدرضا سادات رسول که در این مسیر کمک‌هایشان پیشبرد پروژه را سرعت بخشید.

۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸- منابع

- [1] Lee, J. Y., et al. (2000). HIERARCHICAL RULE BASED CLASSIFICATION OF MFL SIGNALS OBTAINED FROM NATURAL GAS PIPELINE INSPECTION. In *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000): Neural Computing: New Challenges and Perspectives for the New Millennium*.
- [2] Gotoh, Y., & Takahashi, N. (2006). 3D FEM ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC INSPECTION OF OUTER SIDE DEFECTS ON STEEL TUBE USING INNER COIL. In *Proceedings of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*.
- [3] Hua, G., et al. (2009). IMPROVING SNR OF MFL SIGNAL IN FLAW DETECTION OF COAL MINE WIRE ROPES. In *Proceedings of the 2nd International Congress on Image and Signal Processing*.



شکل ۲۷) مقایسه تاثیر لیفت آف حسگر در حالت تجربی و تئوری

۵- نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار، و همچنین نتایج حاصل از آزمون‌های عملی، می‌توان دریافت که نتایج دو بخش به صورت کیفی و کمی یکدیگر را به صورت تقریبی تایید می‌کنند که این موفقیت با توجه به عیب یابی و برطرف کردن ایرادات و تجربه حاصل از یوک اول و دوم بود. با توجه به این همخوانی و موفقیت دستگاه در دریافت سیگنال‌های معتبر، درگام بعدی پارامترهای موثر را با هدف دستیابی به بهینه‌ترین حالت انتخاب کردیم. نتایج این بهینه سازی افزایش نسبت سیگنال به نویز، افزایش پیک دریافتی از هر عیب، کاهش نویز دریافتی و دریافت سیگنال از عیوب کوچک‌تر بود.

از ویژگی‌های دستگاه آزمون نشت شارمغناطیسی ساخته شده می‌توان به سهولت حمل و نقل دستگاه توسط اپراتور، قابلیت تغییر قطر لوله مورد بازرسی با تعویض بلبرینگ‌های تعبیه شده برای هدایت لوله، قابلیت تغییر قدرت میدان اعمال شده با تنظیم جریان تا ۲۰A، قابلیت تنظیم لیفت‌آف‌های مختلف برای حسگر و بهینه بودن فاصله بین پایه‌های یوک برای جداسازی دقیق‌تر عیوب به گونه‌ای که پایه‌ها نه بیش از حد نزدیک و نه بسیار دور باشند و قطعه مورد بازرسی به حالت اشباع رسیده باشد اما حسگرها اشباع نشده باشند، اشاره کرد. نکته مهمی که در این دستگاه بسیار حائز اهمیت است، هزینه بسیار مناسب آن نسبت به دستگاه‌های مشابه خارجی است.

این دستگاه در حالت بهینه علاوه بر دریافت

- [4] Mao, B., et al. (2014). SIGNAL PROCESSING AND DEFECT ANALYSIS OF PIPELINE INSPECTION APPLYING MAGNETIC FLUX LEAKAGE METHODS. *Intelligent Service Robotics*, 7(4), 203–209.
- [5] Peng, L., et al. (2018). A LIFT-OFF REVISION METHOD FOR MAGNETIC FLUX LEAKAGE MEASUREMENT SIGNAL. In *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2018)*.
- [6] Lee, H., et al. (2019). MAGNETIC FLUX LEAKAGE MEASUREMENT SYSTEM FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF WATER-COOLED WALL. In *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2019)*.
- [7] Trevino, D. A., Ghorbel, F. H., & Dutta, S. M. (2020). MAGNETO-OPTICAL AND HALL EFFECT MAGNETIC-FLUX LEAKAGE SENSING: A VALIDATION STUDY. *IEEE Transactions on Magnetics*, 56(3), 1–9.
- [8] Hayashi, M., et al. (2021). IMAGING OF DEFECT SIGNAL OF REINFORCING STEEL BAR AT HIGH LIFT-OFF USING A MAGNETIC SENSOR ARRAY BY UNSATURATED AC MAGNETIC FLUX LEAKAGE TESTING. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(2), 1–4.
- [9] Lu, J., et al. (2022). STUDY ON MAGNETIC FLUX LEAKAGE DETECTION OF BROKEN CABLE WIRE UNDER ROBOT SPIRAL CLIMBING. In *Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (CCC 2022)*.
- [10] Ji, H., et al. (2023). RESEARCH ON STRUCTURE AND KEY PARAMETER MODELING OF EXCITATION DEVICE FOR MAGNETIC FLUX LEAKAGE DETECTION OF U-SHAPED HANGING RING. In *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE 2023)*.
- [11] Wang, Z., et al. (2024). APPLICATION AND DEVELOPMENT OF OIL PIPELINE MAGNETIC FLUX LEAKAGE DETECTION BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHM. In *Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP 2024)*.
- [12] Qu, F., et al. (2025). DESIGN AND PERFORMANCE STUDY OF A MAGNETIC FLUX LEAKAGE PIG FOR SUBSEA PIPELINE DEFECT DETECTION. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(8), 1462.