

## Design and Construction of Magnetic Sensor Set to Detect Internal Defects Based on Magnetic Field Perturbation

Amir Refahi Oskouei

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University

\*Amir.refahi@sru.ac.ir

### Abstract:

This paper introduces a magnetic field perturbation based on the magnetic response received from a small area of the wall as a solution to measure the internal defects of the pipes. In this method, there is no need for magnetic saturation of the wall, and wall thickness does not affect its performance. To build a magnetic field perturbation receiver, a permanent magnet with Hall Effect sensor was used. Since the arrangement of the sensor ie. the position of the sensor relative to the magnet, is of great importance, so it was simulated using the finite element method and the best position of the sensor was presented by analyzing the software results. Since the wall thickness is reduced, so in the simulations for different depths of the defect, the values of the received magnetic response were recorded and used as a measure to evaluate the amount of thickness reduction or defect depth. Also, an experimental test system was developed to compare the results of theoretical modeling and its results were compared with the results of the proposed model. The results show that the proposed method can be used as an effective tool to identify internal defects.

**Keywords:** Magnetic Field Perturbation, Corrosion Defect, Internal Wall of Tube, Sensor Design.

## طراحی و ساخت حسگر مغناطیسی جهت شناسایی عیوب داخلی بر اساس آشفستگی میدان مغناطیسی

امیر رفاهی اسکوئی\*<sup>۱</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

\*amir.refahi@sru.ac.ir

### چکیده

مقاله حاضر با بهره‌گیری از آشفستگی میدان مغناطیسی که بر پایه پاسخ مغناطیسی دریافت شده از یک مساحت کوچکی از دیواره استوار است، به عنوان راهکاری برای اندازه‌گیری عیوب داخلی لوله‌ها ارائه شده است. در این روش نیازی به اشباع مغناطیسی دیواره نبوده و ضخامت دیواره تاثیری بر کارایی آن ندارد. برای ساخت گیرنده حساس به آشفستگی میدان مغناطیسی، از آهنربای دائمی به همراه حسگرهای اثر هال استفاده شده است. از آنجایی که چیدمان حسگر یعنی قرارگیری حسگر نسبت به آهنربا از اهمیت بالایی برخوردار است لذا با استفاده از روش اجزا محدود شبیه‌سازی آن انجام شد و با تحلیل نتایج نرم‌افزاری بهترین حالت قرارگیری حسگر ارائه گردید. از آنجایی که در دیواره لوله‌ها کاهش ضخامت دیواره مطرح است لذا در شبیه‌سازی‌ها برای عمق‌های مختلف از عیب، مقادیر پاسخ مغناطیسی دریافت شده ثبت، و به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری مقدار کاهش ضخامت یا عمق عیب، بکار برده شد. همچنین یک سامانه آزمون تجربی برای مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی تئوری ساخته شد و نتایج آن با نتایج مدل ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده به عنوان ابزاری موثر برای شناسایی عیوب داخلی می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

**واژگان کلیدی:** آشفستگی میدان مغناطیسی، عیب خوردگی، دیواره داخلی لوله، طراحی حسگر.

### ۱- مقدمه

یکی از روشهای معمول در بازرسی است که در داخل تجهیزاتی مثل پیگ یا توپک‌ها برای بازرسی خطوط لوله بکار می‌رود. در این روش دیواره لوله مغناطیس شده و وجود ناپیوستگی‌ها یا کاهش ضخامت دیواره باعث نشتی میدان مغناطیسی می‌گردد که توسط حسگرهای حساس به میدان مغناطیسی قابل شناسایی است. این روش بر پایه اشباع شار میدان مغناطیسی در دیواره لوله‌ها استوار است لذا سیستم مغناطیسی باید قابلیت اشباع دیواره را داشته باشد تا اینکه نشتی شار مغناطیسی در اثر وجود عیب ایجاد گردد. از آنجاییکه این روش برای عیب‌یابی کف مخازن، عیب‌یابی کابل‌های سیم‌بکسل و جداره بیرونی و داخلی لوله‌های دارای قطر بالا بیشتر کاربرد دارد، لذا تحقیقات متعددی در این ارتباط صورت گرفته که هر کدام از این تحقیقات شامل ساخت، طراحی و شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای متداول می‌باشد [۱-۴]. این روش دارای محدودیت‌هایی است از جمله اینکه نیاز به اشباع مغناطیسی دیواره لوله دارد و همچنین برای لوله‌ها با قطرهای کوچک‌تر و ضخامت‌های کلفت‌تر قابل

استفاده از آزمون‌های غیرمخرب در صنایع پیشرفته بخاطر کاهش مدت زمان از کار افتادگی، بالا بردن امنیت و بهبود کیفیت محصولات تولیدی دارای اهمیت خیلی بالایی است. انواع مختلفی از روشهای غیرمخرب برای شناسایی عیب توسعه پیدا کرده ولی بخشی از آنها بصورت کاربردی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روشها که دارای پایه مغناطیس است می‌توان به روشهایی مثل نشت شار مغناطیسی<sup>۱</sup>، روش جریان گردابی<sup>۲</sup> و حافظه مغناطیسی فلزات<sup>۳</sup> که به طور قابل توجه در بازرسی و عیب‌یابی خطوط لوله کاربرد دارند اشاره کرد. هر کدام از این روشها دارای اشکالات و موانعی مثل تداخل میدان‌های مغناطیسی با تغییرات هندسه سطوح (غیر از سطوح عیب) و یا حساس بودن به جهت‌گیری عیب می‌باشند. نشتی شار مغناطیسی

<sup>1</sup>Magnetic Flux Leakage (MFL)

<sup>2</sup>Eddy Current (EC)

<sup>3</sup>Metal Magnetic Memory (MMM)

افزار المان محدود شبیه سازی و با روش تجربی مورد مقایسه قرار گرفته بود.

یو<sup>۹</sup> و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۷ روشهای غیرمخرب بر پایه مغناطیس را مورد مطالعه قرار داده و پردازش سیگنالهای حاصل از این روشها را از دیدگاههای مختلف مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. این تحقیق در واقع مروری بوده در جهت مقایسه روشهای مغناطیسی نسبت به همدیگر و درک مناسبی از تئوری این روشها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. در کار حاضر از حسگر اثر هال به همراه یک آهنربای دائمی جهت شناسایی و اندازه‌گیری مکان عیب استفاده شده است. با توجه به اینکه قرارگیری حسگر نسبت به آهنربا دارای یک فاصله بهینه می‌باشد لذا از نرم‌افزار انسافت- ماکسول<sup>۱۰</sup> [۱۱] برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی حاصل از آهنربا و تاثیر آن بر روی حسگر اثر هال استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری مورد مقایسه قرار گرفته و عمق عیب بر اساس نتایج بدست آمده بصورت کمی مدل‌سازی و محاسبه گردید.

## ۲- اصول عملکرد روش آشفتگی میدان مغناطیسی

اصول عملکردی روش آشفتگی میدان خیلی ساده می‌باشد. بطوریکه اگر یک آهنربا در یک فاصله مشخص و ثابتی از یک ورق فولادی قرار بگیرد و در راستای آن با یک فاصله ثابت و معین حرکت کند، این حرکت بر روی خطوط میدان مغناطیسی در آن محدوده مشخص، تاثیری نخواهد داشت. ولی در صورتیکه در راستای حرکت، فرورفتگی یا برآمدگی یا ناپیوستگی بر روی ورق وجود داشته باشد، در این صورت خطوط میدان در محل ناپیوستگی دچار اعوجاج یا بی‌نظمی می‌شوند و به عبارت دیگر ممکن است چگالی خطوط میدان در یک زمان معین در آن محل دچار تغییراتی بشود که این تغییرات در واقع نشانه‌ای از وجود عیب بوده و می‌تواند توسط حسگرهای حساس به میدان مغناطیسی سنجیده شود. در شکل ۱ چگونگی قرارگیری خطوط میدان در حضور عیب و بدون عیب آورده شده است. همانطوریکه در شکل ۱ دیده می‌شود خطوط پتانسیل میدان در قسمت بدون عیب بصورت منظم و عمود بر سطح قرار گرفته‌اند و فاصله خطوط نسبت به همدیگر یکنواخت و یکسان می‌باشد در حالیکه در بخش دارای

<sup>۹</sup>Liu

<sup>۱۰</sup>Ansoft - Maxwell

استفاده نیست. لذا بر اساس برخی محدودیت‌های موجود در این روشها توسعه روشهای نوین در آزمون‌های غیرمخرب با سرعت بالا در حال انجام است.

از جمله این روشهای نوین می‌توان به روش آشفتگی میدان مغناطیسی<sup>۱</sup> اشاره کرد. این روش با بهره‌گیری از تغییرات میدان مغناطیسی که بر پایه ایجاد بی‌نظمی و آشفتگی در خطوط میدان در اثر برخورد با عیب در یک ناحیه مشخص از قطعه ایجاد می‌گردد، استوار است. در این روش پاسخ مغناطیسی حاصل از به هم ریختگی میدان اندازه‌گیری و شکل و ابعاد عیب مشخص می‌شود. در این روش نیازی به اشباع کردن جسم تحت آزمون نبوده و همچنین ضخامت دیواره لوله بر عملکرد حسگر و شناسایی عیب داخلی، تاثیرگذار نمی‌باشد. در این زمینه کارهای مطالعاتی متفاوتی صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. یه<sup>۲</sup> و همکارانش [۵] در سال ۲۰۲۰ از روش مغناطیسی جریان گردابی و بهره‌گیری از آرایه حسگرهای مغناطیسی TMR<sup>۳</sup> با قدرت تفکیک و حساسیت بالا، تصویر سازی عیب را بصورت شبیه‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این روش از مشخصه‌های حوزه فرکانس برای شناسایی عیب استفاده شده بود.

شبیه همین کار با بهره‌گیری از حسگرهای AMR<sup>۴</sup> جهت شناسایی آشفتگی میدان مغناطیسی توسط لی<sup>۵</sup> و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۷ مورد مطالعه قرار گرفته است.

آگویلا<sup>۶</sup> و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۶ با بکارگیری حسگرهای GMR<sup>۷</sup> و مشخص کردن چگالی شار مغناطیسی در مولفه‌های میدان توانستند جهت‌گیری عیب، عرض و عمق آن را مشخص کنند.

سان<sup>۸</sup> و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۱ از روش آشفتگی میدان مغناطیسی برای پیدا کردن عیب بر روی سطح ورق و لوله بهره‌گرفتند. حسگر ساخته شده در این تحقیق شامل آهنربای دائمی با یک سیم پیچ بود که محیط خارجی آهنربا را احاطه کرده بود. هدف پیدا کردن فاصله بهینه بین حسگر و سطح مورد بازرسی بود که توسط نرم

<sup>۱</sup>Magnetic Field Perturbation

<sup>۲</sup>Yea

<sup>۳</sup>Tunnel Magnetoresistance

<sup>۴</sup>Anisotropic Magnetoresistance

<sup>۵</sup>Li

<sup>۶</sup>Aguila

<sup>۷</sup>Giant Magnetoresistance

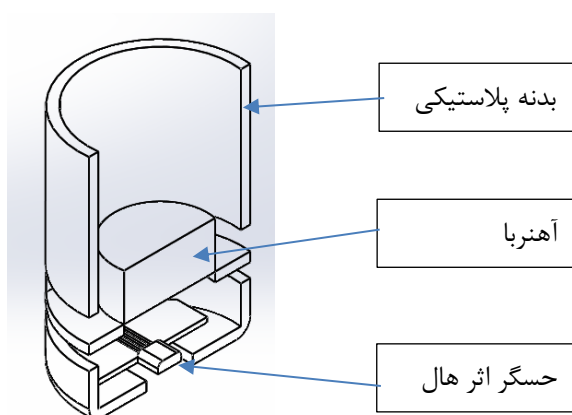
<sup>۸</sup>Sun

مختلف ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ استفاده شده است. این سوراخ‌ها طبق استاندارد ASME Sec. V Article 16 بر روی ورق مورد آزمایش ایجاد شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی اضافه شده در نرم افزار آنسافت-

ماکسول				
مواد	نوع	محدوده اندازه گیری	قدرت	اندازه و ابعاد
آهنربای دائمی	NdFeB	1.3 T	890000 A/m	Ø 20×10 mm
حسگر	UGN 3503	±900G	-	5×5×2 mm
فولاد کربنی	AISI 1020	-	-	300×100×6 mm
نفوذ پذیری مغناطیسی فولاد کربنی		$8.75 \times 10^{-4} \text{ H/m}$		

طبق شکل ۲، آهنربا بر روی یک قطعه پلاستیکی و حسگر اثر هال در فاصله دو میلیمتری نسبت به سطح ورق فلزی درست در وسط خطوط میدان آهنربا قرار می‌گیرد. نکته مهم در چیدمان این است که در صورت نزدیک بودن آهنربا به حسگر اثر هال، حسگر به حالت اشباع در می‌آید و در نتیجه هر چقدر هم چگالی میدان مغناطیسی در اثر عبور از روی عیب تغییر کند، حسگر هیچ تغییری را احساس نخواهد کرد. لذا یکی از مهمترین چالش‌ها پیدا کردن فاصله بهینه بر اساس مشخصات مغناطیسی حسگر می‌باشد.

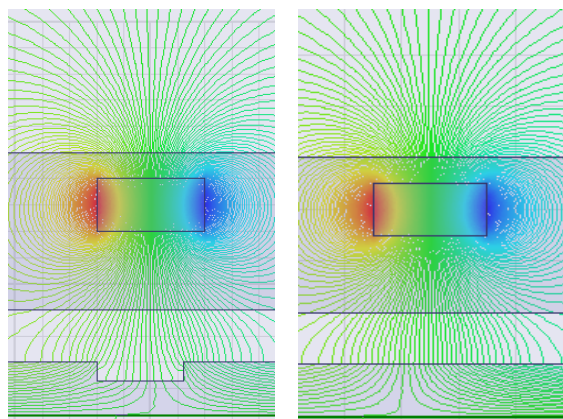


شکل ۲- سطح مقطع اجزای حسگر طراحی شده

طبق اطلاعات موجود، محدوده حساسیت حسگر اثر هال UGN 3503 [۱۰] بین 0-900 G است که بر اساس این مشخصات باید در نرم افزار، فاصله بهینه مورد نظر را محاسبه و بدست آورد. بطور خلاصه هدف نهایی از شبیه سازی رسیدن به یک طراحی بهینه برای ارزیابی میدان

عیب، این خطوط از همدیگر فاصله گرفته و بی نظمی در آن منطقه بوجود می‌آید این بی نظمی خطوط پتانسیل را به هم ریخته و باعث تغییر چگالی میدان مغناطیسی در آن ناحیه خاص می‌گردد.

در این بخش ابتدا به شبیه سازی حسگر طراحی شده در نرم افزار آنسافت-ماکسول پرداخته می‌شود و سپس نتایج آن با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

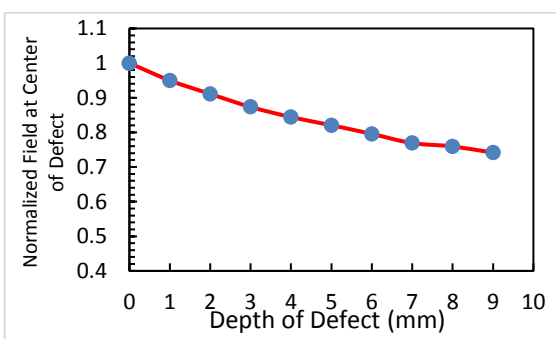


شکل ۱- نحوه توزیع خطوط میدان مغناطیسی در حضور عیب و بدون عیب

۳- شبیه سازی توزیع میدان مغناطیسی حسگر طراحی شده و تعیین فاصله بهینه قرارگیری حسگر اثر هال نسبت به آهنربا

بر اساس اصل آشفتگی میدان، در صورت وجود عیب، خطوط میدان و چگالی آن دچار تغییراتی می‌شود که این تغییرات می‌تواند توسط یک حسگر مغناطیسی اندازه گیری و با نمونه سالم مورد مقایسه قرار بگیرد. بطور معمول برای طراحی حسگر نیازمند آهنربای دائمی و یک ورق فلزی و حسگر حساس به مغناطیس می‌باشد. چیدمان حسگر نسبت به آهنربا و نحوه قرارگیری آنها نسبت به هم دارای اهمیت بالایی است. برای رسیدن به این چیدمان نیازمند استفاده از روش المان محدود است تا بتوان بهترین چیدمان را بدست آورد. برای شبیه سازی آشفتگی میدان از محیط دو بعدی نرم افزار آنسافت-ماکسول استفاده گردید. خواص مغناطیسی بر اساس مشخصات حسگر، آهنربای دائمی و فولاد کربنی بکار برده شده در آزمون تجربی بر اساس جدول ۱ به نرم افزار افزوده شد. از یک ورق فولاد کربنی با ضخامت ۶ میلیمتر و سوراخ‌هایی با قطر ثابت و عمق‌های

مقادیر عددی عمق عیب بالاتر از ۶ میلیمتر تقریباً این تغییرات به یک روند ثابتی می‌رسد که نشان از آن دارد که بالاتر از این مقدار حساسیت حسگر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر تغییرات میدان در عمق عیب‌های بالاتر، خیلی پایین می‌باشد. لذا از آنجاییکه هدف از طرح این موضوع اندازه‌گیری حساسیت حسگر طراحی شده می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که، هر چقدر افت منحنی رسم شده سریع‌تر و یا با شیب بیشتری اتفاق بیفتد، ضریب حساسیت نیز بالاتر است.



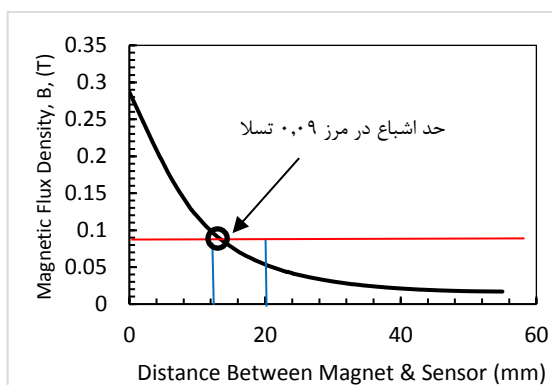
شکل ۴- حساسیت حسگر نسبت به عمق عیب‌های مختلف

#### ۴- سامانه آزمون تجربی

این سامانه که در شکل ۵ نشان داده شده است، شامل یک حسگر و یک آهنربا به همراه یک استوانه پلاستیکی جهت تغییر فاصله حسگر و آهنربا می‌باشد. صفحه اصلی حسگر که بیشترین مقدار شار مغناطیسی را دریافت می‌کند، نسبت به صفحه ورق فولاد کربنی موازی قرار گرفته و در نتیجه صرفاً تغییرات میدان و مولفه‌های عمود بر حسگر، به عنوان ملاک اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۶ مولفه‌های میدان و نحوه اندازه‌گیری آن آورده شده است. از یک بورد آنالوگ به دیجیتال برای اندازه‌گیری تغییرات اتفاق افتاده در حسگر و جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. این بورد قابلیت داده‌برداری با فرکانس 800 Hz را دارد که برای این منظور مناسب است. برای به حرکت در آوردن حسگر از دستگاه اسکنر که قابلیت حرکت خطی در سه محور را دارد استفاده شده است. این اسکنر با سرعت ثابتی حسگر را بر روی سطح ورق فلزی به حرکت در آورده و اطلاعات آن توسط بورد داده‌برداری ثبت و ضبط می‌گردد (شکل ۵). برای پردازش سیگنال‌های حاصل از حسگر از کد توسعه یافته توسط نویسنده در محیط نرم افزار متلب بهره گرفته شده است.

مغناطیسی با حساسیت به کمترین تغییرات بوجود آمده با دقت قابل قبول می‌باشد.

نتایج حاصل از خروجی نرم افزار برای پیدا کردن فاصله بهینه بین حسگر و آهنربا در شکل ۳ آورده شده است. همانطوریکه دیده می‌شود خط قرمز به عنوان حد اشباع حسگر مورد استفاده می‌باشد که تقاطع آن با نمودار مشکی رنگ، در نزدیکی عدد ۱۲ میلیمتر اتفاق افتاده است. لذا در فواصل نزدیک تر از ۱۲ میلیمتر حسگر به اشباع می‌رسد و توانایی گرفتن داده‌ها را ندارد. از طرفی دیگر هر چقدر فاصله حسگر و آهنربا افزایش بیابد، حساسیت آن کاهش می‌یابد. به این دلیل که در فواصل دورتر منحنی شکل ۳ دارای خطی با شیب ملایم و پایین می‌باشد بخاطر همین حساسیت پایینی را نسبت به تغییرات از خود نشان خواهد داد. بهترین منطقه جایی است که دارای شیب نسبتاً بالا و پایین‌تر از حد اشباع حسگر باشد (فاصله بین دو خط آبی رنگ در شکل). در طراحی حاضر فاصله بین حسگر و آهنربا ۱۵ میلیمتر لحاظ شده است.



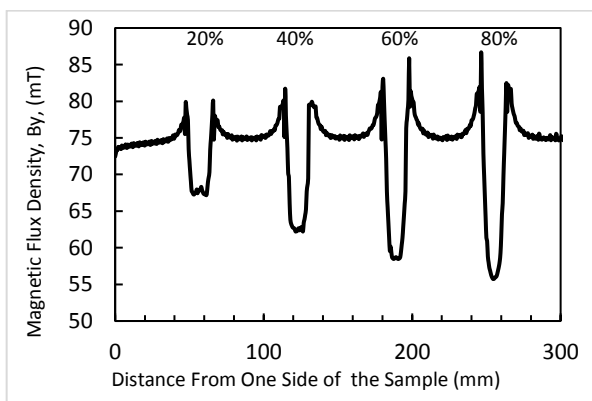
شکل ۳- تعیین فاصله بهینه برای قرارگیری آهنربا نسبت به حسگر

#### ۳-۱- ارزیابی حساسیت مجموعه حسگر طراحی شده

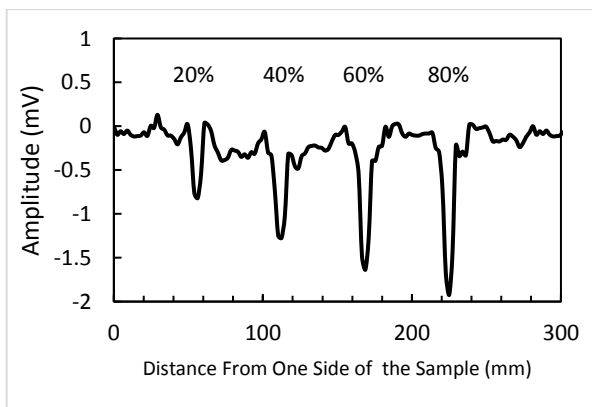
حساسیت مجموعه حسگر / آهنربا طراحی شده بر اساس فاصله یا ارتفاع قرارگیری حسگر نسبت به ورق فلزی قابل پیش‌بینی و محاسبه می‌باشد. برای این کار مجموعه حسگر / آهنربا، در فاصله ۲ میلیمتری از سطح ورق قرار می‌گیرد. سپس برای عیوب با عمق‌های مختلف و ارتفاع قرارگیری مجموعه حسگر نسبت به ورق میزان حساسیت طبق نمودار شکل ۴ حاصل می‌شود. در این شکل مقادیر محور عمودی نسبت به حالت بدون عیب آورده شده است. با افزایش عمق عیب منحنی روند نزولی دارد و برای

### ۵-مقایسه بین نتایج تجربی و شبیه سازی

مطابق شکل ۷ نتایج حاصل از اندازه‌گیری که توسط حسگر اثر هال بدست آمده بود، با نتایج روش شبیه سازی که توسط نرم افزار آنسافت انجام شده بود، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. در این آزمون، چیدمان حسگر اثر حال طوری بود که مولفه میدان مغناطیس را در راستای خطوط میدان اندازه گیری نماید (مولفه  $B_r$  در شکل ۶). از این نتایج می‌توان دهانه عیب یا به عبارتی قطر سوراخ موجود بر روی ورق فولادی را نیز تا حدودی پیش‌بینی کرد. فاصله بین ورود و خروج حسگر از روی سوراخ دایره‌ای بیانگر این مقدار است. از طرف دیگر از آنجائیکه عمق عیب برای چهار سوراخ تعبیه شده بر روی ورق، متفاوت است، از این رو مقدار عددی میدان نیز مطابق با عمق عیب بیشتر می‌شود و لذا می‌توان از این مقدار میدان بدست آمده برای عمق‌های مختلف، حسگر را کالیبره کرد تا عیب‌های نامشخص را نیز اندازه‌گیری کرده و بصورت تقریبی عمق عیب را نیز تشخیص داد.

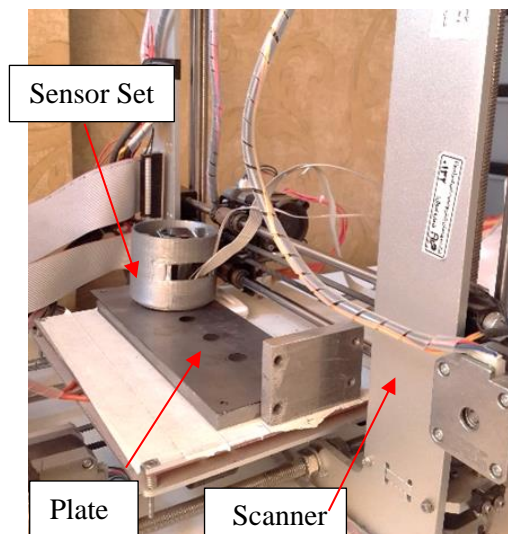


(الف)



(ب)

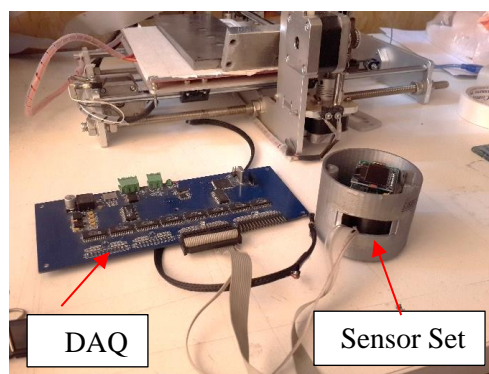
شکل ۷- مقایسه بین نتایج (الف) شبیه سازی (ب) نتایج تجربی



Sensor Set

Plate

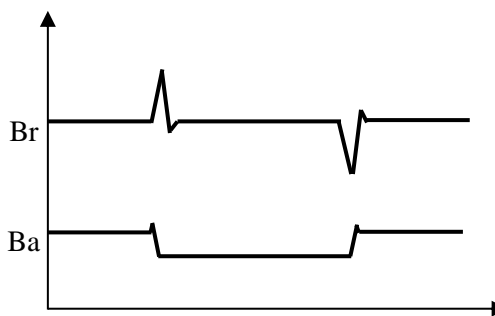
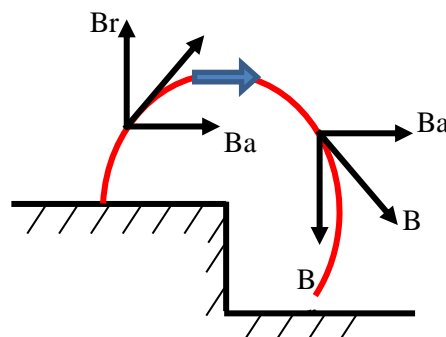
Scanner



DAQ

Sensor Set

شکل ۵- اجزای سامانه آزمون حسگر ساخته شده



شکل ۶- شکل سیگنال‌های بدست آمده از حسگرهای اثر هال بر اساس نحوه چیدمان آنها

اندازه گیری عیب‌ها با عمق‌های مختلف را دارد. نویسنده در کار آینده آرایه ای از حسگرها را برای دیواره داخلی لوله‌ها طراحی و خواهد ساخت که برای لوله‌های یا تیوب‌های مبدل‌های حرارتی که در معرض بیشترین نرخ خوردگی قرار دارند مورد استفاده قرار بگیرد. این حسگرها علاوه بر شناسایی عیب و مشخصه‌های آن قابلیت مکان یابی عیب از یک مکان مشخص را خواهند داشت.

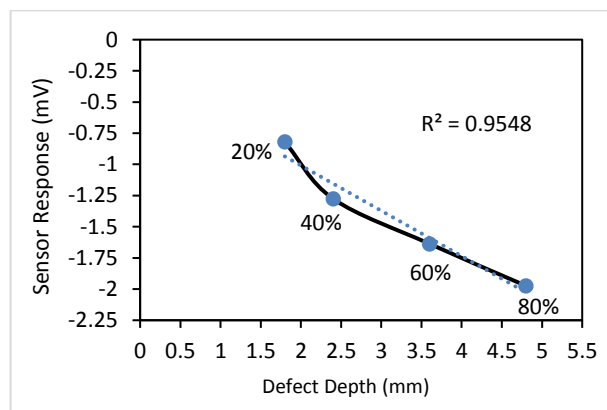
## ۷- قدردانی و تشکر

از عوامل و کارکنان شرکت میپا که در انجام آزمون‌های عملی و تهیه سامانه آزمون برای هر چه بهتر شدن نتایج نویسنده را یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارد.

## ۸- منابع

- [1] Song, X. C., Huang S. L., Zhao, W., (2007). Optimization of the magnetic circuit in the MFL inspection system for storage-tank floors. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 43, 326-331.
- [2] Kim, J. W., Park, S., (2017). Magnetic flux leakage- based local damage detection and quantification for steel wire rope non-destructive evaluation. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29, 3396-3410.
- [3] Karuppasamy, P., Abudhahir, A., Prabhakaran, M., Thirunavukkarasu, S., Rao, B. P. C., Jayakumar, T. (2016). Model-Based Optimization of MFL Testing of Ferromagnetic Steam Generator Tubes, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 35, 3221-3224.
- [4] Augustyniak, M., Usarek, Z. (2016). Finite Element Method Applied in Electromagnetic NDTE: A Review. *J Nondestruct Eval*, 35, 39-62.
- [5] Yea, C., Wang, Y., Wanga, M., Udpa, L., Udpa, S., (2020). Frequency domain analysis of magnetic field images obtained using TMR array sensors for subsurface defect detection and quantification, *NDT & E International*, 116, 102284.
- [6] Li, Z., Jarvis, R., Nagy, P. B., Dixon, S., Cawley, P., (2017). Experimental and simulation methods to study the Magnetic Tomography Method (MTM) for pipe defect detection, *NDT & E International*, 92, 59-66.
- [7] Aguila-Muñoz, J., Espina-Hernández, J.H., Pérez-Benítez, J.A., Caleyó, F., Hallen, J.M., (2016). A magnetic perturbation GMR-based probe for the nondestructive evaluation of surface cracks in ferromagnetic steels, *NDT & E International*, 79, 132-141.
- [8] Sun, Y., Kang, Y., Qiu, C., (2011). A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation, *NDT & E International*, 44, Pages 1-7.
- [9] Liu, S., Sun, Y., Gu, M., Liu, C., He, L., Kang, Y., (2017). Review and analysis of three representative electromagnetic NDT methods, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59, 176-183.
- [10] <https://datasheetspdf.com/pdf/504928/AllegroMicroSystems/UGN3503/1>
- [11] User's guide Ansoft Maxwell, 2D, v.14.

برای این منظور همانطوریکه در شکل ۸ دیده می‌شود خروجی حسگر بر حسب عمق عیب‌های مختلف برای قطعه مورد آزمون رسم شده است. ضریب همبستگی تقریباً خوبی بین پاسخ حسگر و عمق عیب‌ها دیده می‌شود که گواه بر این هست که می‌توان عمق عیب‌های نامشخص را از روی خروجی حسگر اثر حال می‌توان تعیین کرد. همانطوریکه در این شکل دیده می‌شود تطابق خوبی بین دو روش تجربی و شبیه‌سازی، وجود دارد و می‌توان نتایج حاصل از شبیه سازی را قبل از اینکه ساخت نمونه اولیه حسگر انجام بگیرد به عنوان معیاری جهت ارزیابی و شناسایی پارامترها و متغیرهای آزمون، مورد استفاده قرار داد.



شکل ۸- نمودار پاسخ حسگر در برابر عمق عیب‌های مختلف به همراه ضریب همبستگی بین آنها

## ۶- نتیجه گیری

این تحقیق با هدف طراحی و ساخت یک حسگر مغناطیسی جهت شناسایی عیب در داخل دیواره لوله‌ها بخصوص لوله‌های دارای قطر پایین صورت گرفته است. دو پارامتر فاصله بین حسگر و آهنربا به پارامتر حساسیت حسگر نسبت به عیوب مختلف در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. با بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی فاصله بهینه ۱۵ میلی‌متر برای ساخت و طراحی حسگر استفاده شد. نتایج بدست آمده گویای ارتباط نزدیک بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمون تجربی برای ساخت حسگر مورد نظر بود. همچنین برای اطمینان از نحوه پاسخ دهی حسگر به عیوب مختلف، چندین سوراخ با عمق‌های ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ ضخامت ورق فلزی تعبیه گردید و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت. انطباق نسبتاً بالایی بین روند داده‌های بدست آمده بین دو روش حاصل شد که بیانگر این است که حسگر ساخته شده قابلیت