

Feasibility study of using the magnetic flux leakage test method in detecting defects in the coating of supply and distribution gas lines

Nima Rahmani ^a, Mehdi Modabberifar ^{a*}, Moein Taheri^a, Rasool Ebrahimi^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

^b Markazi province gas company, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Rahmani N, Modaberifar M. Feasibility study of using the magnetic flux leakage test method in detecting defects in the coating of supply and distribution gas lines. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023; 2(4): 432-451

doi <https://10.52547/masm.2.4.432>.

KEYWORDS

Finite element method,
Magnetic flux leakage,
Gas transmission pipe cover.

ABSTRACT

Today, the corrosion of oil and gas supply and distribution lines is a major challenge in these industries. In order to prevent the corrosion of underground pipes, various types of coatings, especially bituminous base coatings, are used to protect oil and gas pipelines. One of the widely used tests for detecting defects in metal pipes of gas transmission lines is the magnetic flux leakage test method. This test is performed only on the metal pipe itself and determines the defects of the pipe. In this paper, the possibility of using this test to detect pipeline coating defects has been investigated. If the coating defects are detected, they can be prevented from spreading and reaching the metal body of the pipe. For this purpose, the magnetic flux leakage test of a part of a gas pipe with a coal-based bitumen coating along with a defect and with different thicknesses in the pipe and coating was simulated in Comsol software. The magnetic properties of the coatings were also extracted with a magnetometer. The results of the simulations showed that the leakage of magnetic flux in the coating defects is insignificant and cannot be measured to reveal the defects.

Extended Abstract

1. Introduction

There are various methods for inspecting oil and gas pipelines. One of these methods is the magnetic flux leakage test method. Magnetic flux leakage occurs in places where metal corrosion have occurred (Figure 1). The magnetic flux leakage is detected by the Hall effect sensor.

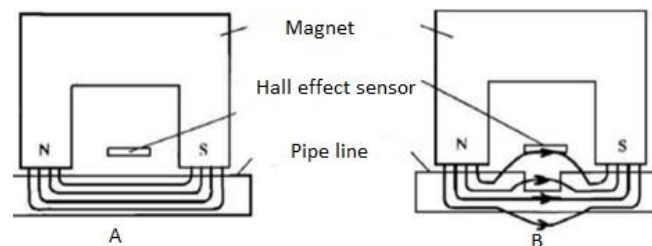


Figure 1. Magnetic field flux lines (A) Pipeline without defect (B) Pipeline with defect [1]

* Corresponding author. Tel.: +98-86-32625724

E-mail address: m-modabberifar@araku.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.4.432>.

Received: January 12, 2023; Received in revised form: February 26, 2023; Accepted: February 26, 2023

© Author



Naemi et al studied magnetic flux leakage modeling techniques for inspection of ferromagnetic plates. This research showed how to use finite element method techniques to model a magnetic flux leakage test system [2]. Boley et al investigated the numerical simulation and inspection tests of magnetic flux leakage in steel pipeline. In this research, numerical simulation and experimental investigation were conducted on defect inspection in steel pipeline using magnetic flux leakage test [3]. Nonso et al. studied the method of pulsed magnetic flux leakage to detect hairline crack and determine its characteristics [4]. Suresh et al studied the development of magnetic flux leakage system for fault detection in small diameter steam generator tube [5]. Tsukada et al. studied the detection of internal cracks in thick steel plates using unsaturated alternating magnetic flux leakage test with a magnetic resistance gradiometer [6]. Modabberifar et al. proposed the method of using AC electric fields in short distances to detect defects and the movement of polarized particles in these distances [7-8]. Chok Wu et al. studied the method of pulsed magnetic flux leakage to detect hairline crack and determine its characteristics [9].

Defects that are created in buried pipelines are first created in the pipe cover, and with the loss of the cover, they advance in the metal pipe. If the defects on the coating detected, it can prevent them from spreading to the pipe and causing more damage. So far, the magnetic flux leakage test method has only been used to check the presence of defects in the metal pipe itself, and no research has been done to check the possibility of performing this test on the pipe coating. In this research, the effect of defects on the coating on the magnetic flux is investigated using finite element simulation. It is assumed that this work is done with the existing devices for testing the magnetic flux leakage so that no additional cost is imposed on the test. The magnetic flux changes caused by surface defects are simulated and the possibility of measuring those using existing sensors is checked.

2. Magnetic flux leakage simulation

In this research, a magnetizing system was designed, which consists of two couplings, two magnets and a yoke. Two magnets made of neodymium, iron and boron alloy with grade N42 were designed to induce magnetic flux. Magnets are used as magnetic sources and their residual magnetic density provides the strength of the magnetic field. Magnetic couplings are ferromagnetic materials and transfer the magnetic field to the pipe wall. The test piece, yoke and couplings are made of X52 carbon steel alloy. Their magnetic behavior is determined according to the magnetization diagram of X-52 steel. The pipe used in gas lines was considered according to the API 5L standard, which is the same as Steel X 52. In this simulation, the pipe cover is made of coal-based bitumen with a strip of glass wool. Figure 2 shows the magnetizing system and the test piece in a block of air with a relative magnetic permeability coefficient of 1.

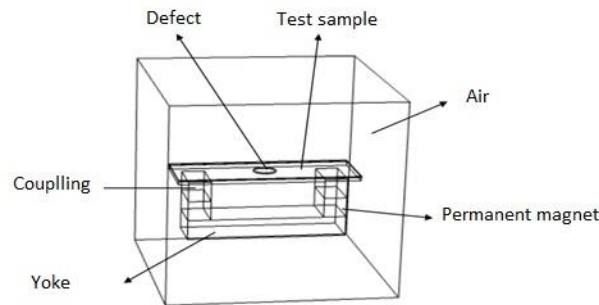


Figure 2. Simulated system geometry

In order to obtain the magnetic properties of coal-based bitumen coating with glass wool strip, a magneto metric test was performed on it. Based on the results of the magneto metric test, the relative magnetic permeability value of this coating was measured as 1.0048 and entered into the software and the simulation was performed. Table 1 shows the type of each part of the system and their magnetic behavior.

Table 1. The type and magnetic behavior of materials used in this research

Yoke	Steel X52	Magnetization curve
Magnets	Nd-Fe-B	paramagnetic
Couplings	Steel X52	Magnetization curve
Air	Air	paramagnetic
Sample	Steel X52	Magnetization curve
Coating	Coal-based bitumen	Relative permeability

Comsol Multiphysics finite element software was used to simulate this process. Two-dimensional finite element method is not suitable for modeling three-dimensional pitting defects. Also, the two-dimensional finite

element method is not able to accurately determine the amount of magnetic saturation created in the part. Therefore, this method is not suitable for designing the magnetizing system. In this research, the 3D finite element method was used. The defect that was considered in this design on the pipe and cover is in the form of a cylinder because it is more similar to the defects created in buried pipelines and it is easier to check the leakage flux in it.

3. Results

In Figure 3, the graphs obtained from the simulation on the pipe with coal base bitumen coating with different states of defects in the pipe and coating are drawn in one graph. In the case of healthy pipe - no coating and healthy pipe - defective coating, the magnetic flux density is equal along the length of the desired line, and the presence of a defect in the coal base bitumen coating did not cause a break in this diagram. In fact, by comparing these two cases, whose graphs are completely superimposed, it is clear that the presence or absence of the coating on the pipe does not make a difference in the graph. In the rest of the cases, the fracture created in the diagram is due to the defect in the pipe, and the defect in the coal base bitumen coating has not changed it. To avoid cluttering the diagram, only some states are shown in this diagram. It should be noted that the base state is the state in which the magnetization value in the magnets is equal to $\pm 1 \text{ e}^6$.

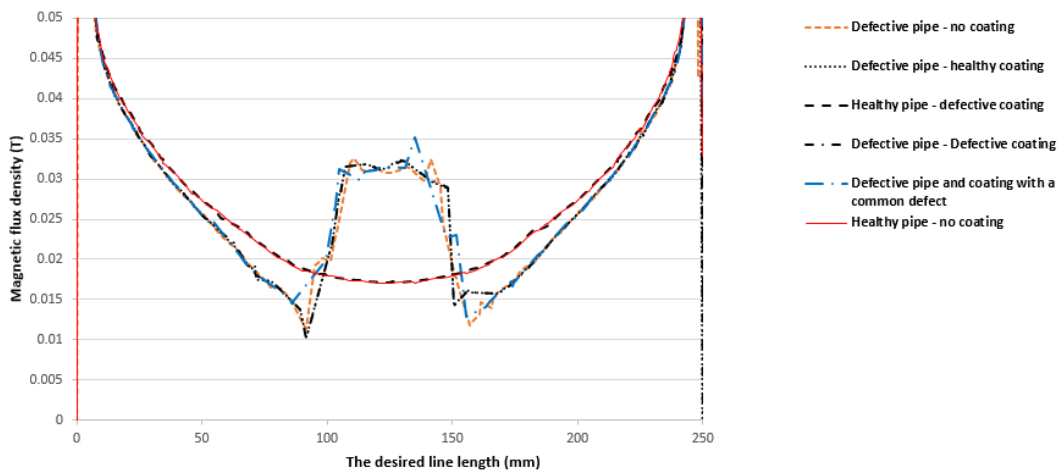


Figure 3. Graphs of magnetic flux density along the length of the desired line for different simulation modes with coal base bitumen coating and magnetization equal to the base mode in magnets.

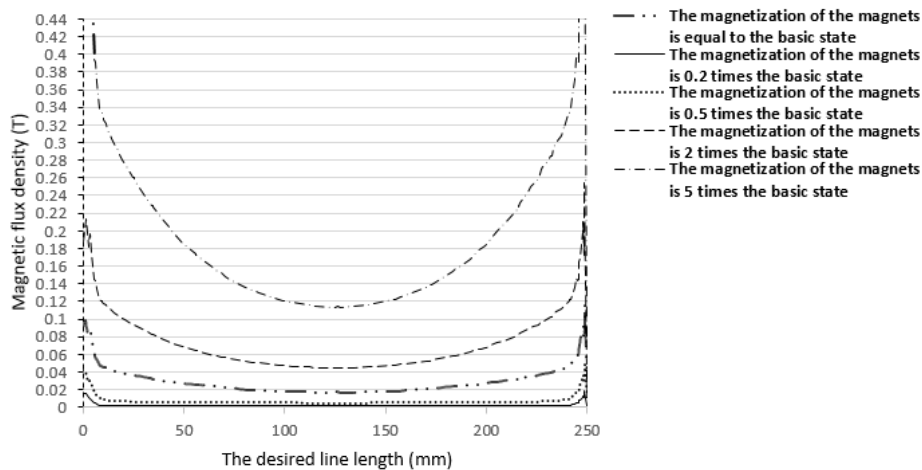


Figure 4. Graphs of magnetic flux density along the length of the desired line by changing the magnetization of the magnets in the case of healthy pipe - defective coal base bitumen coating

In Figure 4, the comparison between the graphs obtained from the condition of healthy pipe - defective coal base bitumen coating by changing the amount of magnetization in the magnets has been done. According to Figure 4, by changing the magnetization of the magnets, the total value of the magnetic flux density changes along the desired line, but a break in the diagram (which indicates the presence of a defect in the desired location) did not occur. This shows that by changing the magnetization value of the magnets, the cylindrical defect in the coal base bitumen coating cannot be detected.



امکان سنجی استفاده از روش تست نشت شار مغناطیسی در تشخیص عیوب پوشش خطوط تغذیه و توزیع انتقال گاز

نیما رحمانی الف، مهدی مدبری فر ب*، معین طاهری ب، رسول ابراهیمی پ

الف کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، Nimarahmani1376@gmail.com

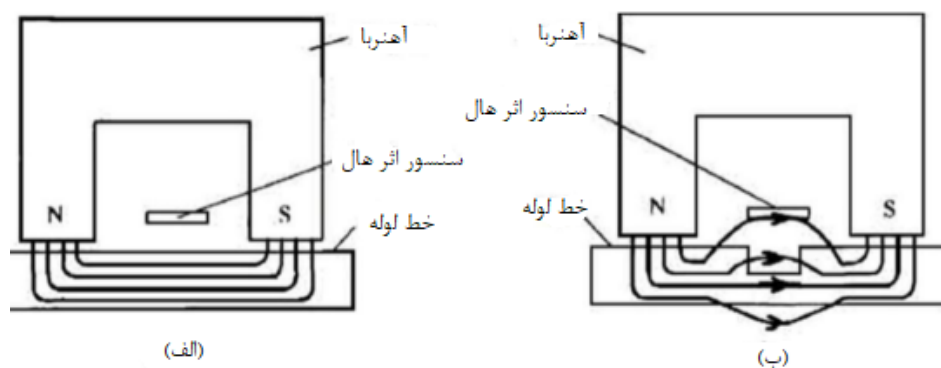
ب دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-modabberifar@araku.ac.ir

پ کارشناسی ارشد، شرکت گاز استان مرکزی، اراک، ایران، Ebrahimi1856@yahoo.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>امروزه پدیده خوردگی خطوط تغذیه و توزیع نفت و گاز چالشی اساسی در این صنایع است. برای جلوگیری از خوردگی لوله‌های مدفون زیر خاک از انواع پوشش‌ها بخصوص پوشش‌های پایه قیری برای محافظت از خطوط لوله نفت و گاز استفاده می‌شود. یکی از تست‌های پرکاربرد برای تشخیص عیوب لوله‌های فلزی خطوط انتقال گاز روش تست نشت شار مغناطیسی می‌باشد. این تست فقط روی خود لوله فلزی انجام می‌شود و عیوب لوله را مشخص می‌کند. در این مقاله، امکان استفاده از این تست برای تشخیص عیوب پوشش خطوط لوله بررسی شده است. در صورت تشخیص عیوب پوشش می‌توان از گسترش و رسیدن آن‌ها به بدنه فلزی لوله جلوگیری کرد. بدین منظور تست نشت شار مغناطیسی قسمتی از لوله گاز به همراه پوشش قیر پایه ذغال سنگی به همراه یک عیب و با ضخامت‌های مختلف در لوله و پوشش، در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. خواص مغناطیسی پوشش نیز با دستگاه مغناطیس‌سنج استخراج شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که نشت شار مغناطیسی در عیوب پوشش ناچیز بوده و برای آشکارسازی عیوب قابل اندازه‌گیری نیست.</p>	<p>روش المان محدود نشت شار مغناطیسی پوشش لوله انتقال گاز</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷</p>

۱- مقدمه

شناسایی به‌موقع و درست عیوب به وجود آمده در خطوط نفت و گاز سبب کاهش تلفات وارده، افزایش ایمنی، استفاده از حداکثر ظرفیت خطوط، افزایش مقاومت خطوط و همچنین کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود. برای جلوگیری از خوردگی لوله‌های مدفون، سطوح خارجی آن‌ها را با مواد مختلفی مانند قیر، اپوکسی، پوشش‌های سه لایه پلی اتیلنی و بیتوسیل پوشش می‌دهند تا از شدت و میزان خوردگی در آن‌ها کاسته شود. این پوشش‌ها بسیاری از نیازهای صنعت گاز را برای پیشگیری از خوردگی برآورده ساختند ولی پس از زمانی، این پوشش‌ها از بین رفته و می‌بایست هزینه‌های زیادی را صرف تعمیر و تعویض این پوشش‌ها نمود. برای بازرسی خطوط لوله نفت و گاز، روش‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش تست نشت شار مغناطیسی می‌باشد. نشتی شار مغناطیسی در مکان‌هایی که کاهش فلز و خوردگی در آن‌ها ایجاد شده، رخ می‌دهد (شکل ۱). نشتی شار مغناطیسی به وجود آمده توسط سنسور اثر هال تشخیص داده می‌شود.



شکل ۱ خطوط شار میدان مغناطیسی (الف) خط لوله بدون وجود عیب (ب) خط لوله با وجود عیب [۱]

نائمی و همکاران، تکنیک‌های مدل‌سازی نشت شار مغناطیسی برای بازرسی صفحات فرومغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق نشان داد که چگونه می‌توان از تکنیک‌های روش اجزای محدود برای مدل‌سازی یک سیستم تست نشت شار مغناطیسی استفاده کرد [۲]. بولی و همکاران بر روی شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های بازرسی نشت شار مغناطیسی در فولاد خط لوله تحقیق کردند. در این مقاله، شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی بر روی بازرسی عیب در فولاد خط لوله با استفاده از تست نشت شار مغناطیسی انجام شد [۳]. نونسو و همکاران بر روی روش نشت شار مغناطیسی پالسی برای تشخیص ترک خطی مویی و تعیین مشخصات آن تحقیق کردند. هدف این تحقیق حل مشکل اجتناب‌ناپذیر جداسازی پیوند دانه‌ای بود که در حین ساخت رخ می‌دهد و ساختارهای خطوط لوله را دچار ترک‌های مینیاتوری می‌کند [۴]. سورش و همکاران بر روی توسعه سیستم اندازه‌گیری نشت شار مغناطیسی برای تشخیص عیب در لوله مولد بخار با قطر کوچک تحقیق کردند. در این تحقیق از روش المان محدود و از نرم‌افزار انسیس مکسول^۱ و مدل تحلیلی برای اعتبار سنجی آرایه مغناطیس‌کننده پیشنهادی استفاده شد [۵]. سوکادا و همکاران بر روی تشخیص ترک‌های داخلی در صفحات فولادی ضخیم با استفاده از آزمایش نشت شار مغناطیسی متناوب غیر اشباع با گرادبومتر مقاومت مغناطیسی کار کردند [۶]. مدبری فر و همکاران روش استفاده از تغییر میدان‌های الکتریکی در فواصل کوتاه را برای تشخیص عیوب و حرکت ذرات پلاریزه شده در این فواصل را پیشنهاد دادند [۷-۸]. چوک وو نونسو و همکاران بر روی روش نشت شار مغناطیسی پالسی برای تشخیص ترک مویی و تعیین مشخصات آن تحقیق کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند که طول و عرض تقریبی هر دو ترک سطحی و سطح دور را می‌توان از عرض سیگنال ایجاد شده در امتداد جهت طول و عرض به دست آورد. با این حال، ترک سطح دور به دلیل گسترش جانبی میدان نشتی در ناحیه دور، پروفیل سیگنال گسترده‌تری را نشان می‌دهد. در سازه‌های خط لوله فرومغناطیسی این امر هم‌چنین امکان تشخیص و نظارت مؤثر بر ترک‌های مویی سطحی و سطح دور ناشی از جداسازی پیوند دانه‌ای را فراهم می‌کند که در حین ساخت، در ساختار خط لوله رخ می‌دهد [۹]. سورش و همکاران بر روی توسعه سیستم اندازه‌گیری نشت شار مغناطیسی برای تشخیص عیب در لوله مولد بخار با قطر کوچک تحقیق کردند. در این تحقیق از روش المان محدود و از نرم‌افزار انسیس مکسول و مدل تحلیلی برای اعتبار سنجی آرایه مغناطیس‌کننده پیشنهادی استفاده شد [۱۰].

عیوبی که در خطوط لوله مدفون ایجاد می‌شود، ابتدا در پوشش لوله ایجاد می‌شوند و با از بین رفتن پوشش، در لوله فلزی پیشروی می‌کنند. اگر بتوان عیوب روی پوشش را تشخیص داد می‌توان از گسترش آن‌ها به لوله و ایجاد خسارت بیشتر جلوگیری کرد. تاکنون روش تست نشت شار مغناطیسی فقط برای بررسی وجود عیوب در خود لوله فلزی استفاده شده است و هیچ پژوهشی جهت بررسی امکان‌پذیری انجام این تست روی پوشش لوله انجام نشده است. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود تأثیر عیوب روی پوشش بر شار مغناطیسی بررسی می‌شود. فرض بر این است که با دستگاه‌های موجود جهت تست نشت شار مغناطیسی این کار انجام می‌گیرد تا هزینه اضافی بر تست تحمیل نگردد. با انجام شبیه‌سازی تغییرات شار مغناطیسی ناشی از عیوب سطحی اندازه‌گیری شده و امکان اندازه‌گیری آن‌ها با استفاده از سنسورهای موجود بررسی می‌شود.

^۱ Ansys Maxwell

۲- معادلات حاکم بر فرآیند

معادلات حاکم بر رفتار فیزیکی میدان مغناطیسی در تست نشت شار مغناطیسی معادلات ماکسول هستند که به صورت روابط ۱ و ۲ می‌باشد [۱۱].

$$\nabla \times H = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، H بردار شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر و B بردار چگالی شار مغناطیسی برحسب تسلا می‌باشد. برای محاسبه‌ی چگالی شار مغناطیسی B از رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود.

$$B = \begin{cases} \mu \cdot H \\ \mu \cdot (H + M) \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه ۳، M مغناطش محیط است و به صورت گشتاور مغناطیسی در واحد حجم تعریف می‌شود و واحد آن آمپر بر متر می‌باشد و μ_0 تراوایی در فضای آزاد بوده و مقدار آن $4\pi \times 10^{-7}$ هنری بر متر می‌باشد. در رابطه ۳، رابطه اول برای فضای آزاد، یعنی جایی که مغناطش محیط (M) برابر با صفر می‌باشد، به کار می‌رود و رابطه دوم برای آهنرباها، مواد فرومغناطیس و پوشش به کار می‌رود. برای آهنرباها، M بیانگر سطح مغناطیس کنندگی می‌باشد که در این شبیه‌سازی مقدار آن $\pm 1e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که با این مقدار مغناطیس کنندگی در آهنرباها، فلز لوله به حد اشباع مغناطیسی خود می‌رسد. رابطه بین بردار پتانسیل مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی طبق رابطه ۴ می‌باشد.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

در رابطه ۴، A پتانسیل برداری مغناطیسی می‌باشد که کمیتی برداری است و از آن می‌توان میدان مغناطیسی را به دست آورد. بنابراین معادلات سیستم مغناطیس کننده به صورت زیر تعریف می‌شوند. رابطه ۵ برای مواد فرومغناطیس، آهنرباها و پوشش و رابطه ۶ برای فضای آزاد به کار می‌رود.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A - M(B) \right) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \right) = 0 \quad (6)$$

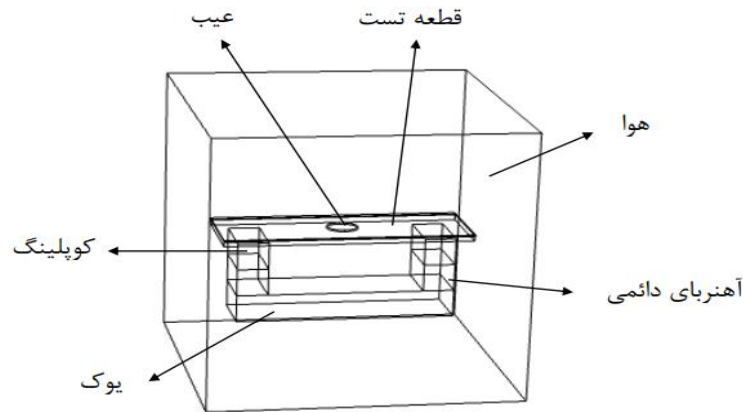
شرایط مرزی برای حل معادلات بالا به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$\begin{cases} A = 0 & \text{at } \infty \\ A & \text{continuous at interfaces} \end{cases} \quad (7)$$

روابط ۵ و ۶ با شرایط مرزی رابطه ۷ حل می‌شوند تا چگالی شار مغناطیسی در تمام مکان‌ها به دست آید.

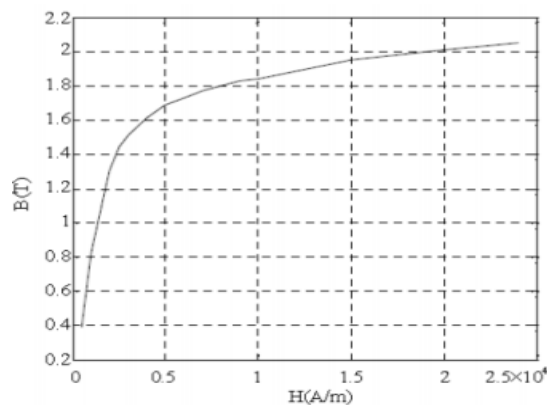
۳- شبیه‌سازی روش نشت شار مغناطیسی

در این پژوهش، یک سیستم مغناطیس کننده طراحی شد، که این سیستم متشکل از دو کویلینگ، دو آهنربا و یک یوک می‌باشد. دو آهنربا از جنس آلیاژ نئودیم، آهن و بور با گرید N42 برای القای شار مغناطیسی طراحی شد. آهنرباها به‌عنوان منابع مغناطیسی به کار می‌روند و چگالی مغناطیسی پسماند آن‌ها، قدرت میدان مغناطیسی را تأمین می‌کند [۱۱]. کویلینگ‌های مغناطیسی نیز از مواد فرومغناطیس هستند و میدان مغناطیسی را به جداره لوله منتقل می‌کنند. جنس قطعه تست، یوک و کویلینگ‌ها از آلیاژ کربن استیل ایکس ۵۲ می‌باشد. رفتار مغناطیسی آن‌ها طبق نمودار مغناطیس شوندگی استیل ایکس ۵۲ مشخص می‌شود. لوله مورد استفاده در خطوط گاز طبق استاندارد API 5L در نظر گرفته شد که همان استیل ایکس ۵۲ می‌باشد. در این شبیه‌سازی پوشش لوله از جنس قیر پایه زغال‌سنگی با نوار پشم شیشه می‌باشد. شکل ۲ سیستم مغناطیس کننده و قطعه تست در بلوکی از هوا با ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی ۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۲ هندسه سیستم شبیه‌سازی شده

شکل ۳ منحنی مغناطیس شوندگی استیل ایکس ۵۲ را نشان می‌دهد که مقدار شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر و مقدار القای مغناطیس برحسب تسلا می‌باشد. در این نمودار مقدار چگالی شار مغناطیسی در حالت اشباع حدود ۲ تسلا می‌باشد. مقادیر این نمودار در نرم‌افزار کامسول وارد شد تا رفتار مغناطیسی قسمت‌های دارای جنس استیل ایکس ۵۲، طبق آن باشد.



شکل ۳ منحنی مغناطیس شوندگی استیل ایکس ۵۲ [۹]

برای به دست آوردن خواص مغناطیسی پوشش قیر پایه ذغال سنگی با نوار پشم شیشه، تست مغناطیس سنجی بر روی آن انجام گرفت. بر اساس نتایج تست مغناطیس سنجی مقدار نفوذپذیری نسبی مغناطیسی این پوشش ۱/۰۰۴۸ اندازه‌گیری شد و در نرم‌افزار وارد شد و شبیه‌سازی انجام شد. جدول ۱، جنس هریک از قسمت‌های سیستم و رفتار مغناطیسی آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ جنس و رفتار مغناطیسی مواد مورد استفاده در این پژوهش

قطعه	ماده	رفتار مغناطیسی
یوک	Steel X52	منحنی مغناطیس شوندگی
آهنرباها	Nd-Fe-B	پارا مغناطیس
کوپلینگ‌ها	Steel X52	منحنی مغناطیسی شوندگی
هوا	هوا	پارا مغناطیس
قطعه تست	Steel X52	منحنی مغناطیس شوندگی
پوشش	قیر پایه ذغال سنگی	نفوذپذیری نسبی

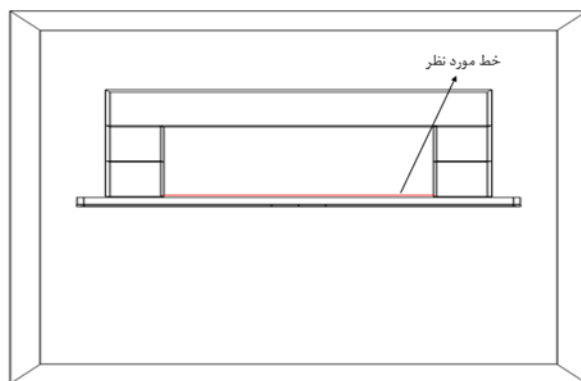
در شبیه‌سازی این فرآیند از نرم‌افزار المان محدود کامسول مالتی فیزیکس استفاده شد. روش المان محدود دوبعدی برای

مدل کردن عیوب پیتینگ سه بعدی مناسب نیست. همچنین، روش المان محدود دوبعدی قادر به تعیین دقیق میزان اشباع مغناطیسی ایجاد شده در قطعه نیست [۱۱]. بنابراین، این روش برای طراحی سیستم مغناطیس کننده مناسب نمی باشد. در این پژوهش از روش المان محدود سه بعدی استفاده شد. عیبی که در این طراحی بر روی لوله و پوشش در نظر گرفته شد به شکل استوانه می باشد چراکه شباهت بیش تری به عیوب ایجاد شده در خطوط لوله مدفون دارد و بررسی شار نشتی در آن آسان تر است. محل قرارگیری، نوع و ابعاد عیب در جدول ۲ آمده است.

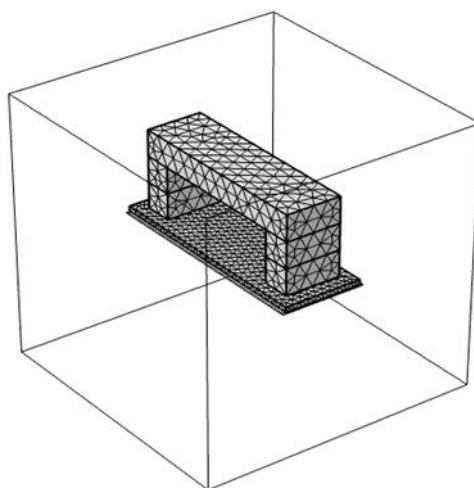
جدول ۲ محل قرارگیری، نوع و ابعاد عیب

محل عیب	نوع عیب	قطر عیب (میلی متر)	ضخامت عیب (میلی متر)
عیب در قطعه تست	استوانه ای	۵۰	۴
عیب در پوشش	استوانه ای	۵۰	۲
عیب در قطعه و پوشش به صورت مشترک	استوانه ای	۵۰	۷

در این مقاله برای بررسی نشت شار مغناطیسی در نواحی دارای عیب، یک خط بافاصله ی ۳ میلی متر (به منظور در نظر گرفتن فاصله سنسور از سطح قطعه) در امتداد طول و در وسط عرض قطعه کار در نظر گرفته شد و چگالی ی شار مغناطیسی در امتداد آن به صورت نمودار به دست آمد (شکل ۴).



شکل ۴ نمایش محل خط مورد نظر برای بررسی چگالی ی شار مغناطیسی در امتداد این خط



شکل ۵ نمایش هندسه مش اعمال شده به مدل

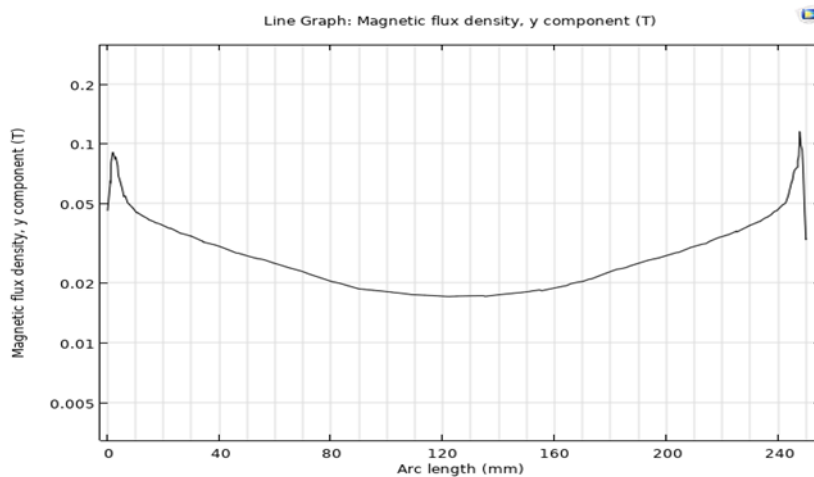
تست نشت شار مغناطیسی به صورت یک مسئله مگنت و استاتیک در نظر گرفته شد. پس از اعمال مواد برای المانها، شرایط مرزی هر المان باید مشخص شود. در این شبیه سازی کل سیستم توسط هوا با نفوذپذیری مغناطیسی ۱ احاطه شده است. رفتار آهنرباها با قانون پایستاری شار شبیه سازی شده است. پس از تعیین شرایط مرزی، گام بعد تعریف نوع مش و رزولوشن آن است.

در این شبیه‌سازی مش با المان Free tetrahedral استفاده شد. چون در نواحی دارای عیب استوانه‌ای انحنای وجود دارد، این نوع مش شبکه منظم‌تری در این قسمت‌ها ایجاد می‌کند. برای رسیدن به نتایج بهتر هندسه مش در قطعه تست و پوشش در حالت Extremely Fine (با توجه به بررسی نمودار استقلال پاسخ از اندازه مش) نرم‌افزار تعریف شد. شکل ۵ مش اعمال شده به مدل را نمایش می‌دهد. پس‌ازاینکه هندسه، مواد، شرایط مرزی و مش تعیین شد، حل با روش المان محدود انجام می‌شود.

۳-۱- حالات مختلف وجود عیب در لوله و پوشش

۳-۱-۱- لوله سالم - بدون پوشش

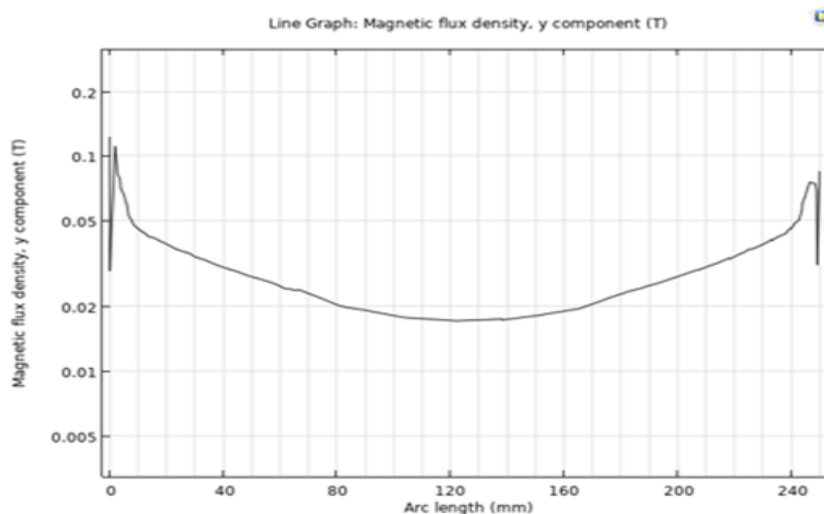
در این حالت شبیه‌سازی هیچ عیبی در قطعه تست که همان قسمتی از لوله گاز می‌باشد، وجود ندارد و در این حالت پوششی روی لوله وجود ندارد. این حالت همان حالت پایه است و همه نمودارهای به‌دست‌آمده از این تحلیل با نمودار به‌دست‌آمده از این حالت مقایسه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، حداقل مقدار چگالی مغناطیسی در این نمودار تقریباً ۰.۰۱۷ تسلا می‌باشد.



شکل ۶ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم بدون پوشش

۳-۱-۲- لوله سالم - پوشش سالم

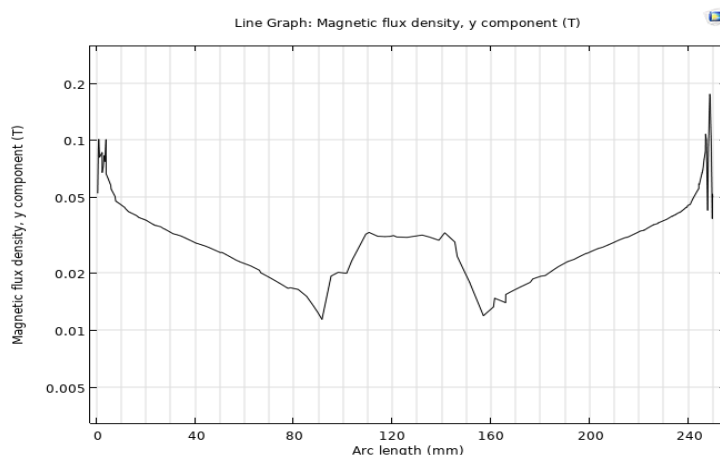
این حالت شبیه‌سازی هم مانند حالت قبل است با این تفاوت که پوشش روی لوله قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، حداقل چگالی شار مغناطیسی تقریباً ۰.۰۱۷ تسلا می‌باشد.



شکل ۷ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش سالم

۳-۱-۳- لوله معیوب - بدون پوشش

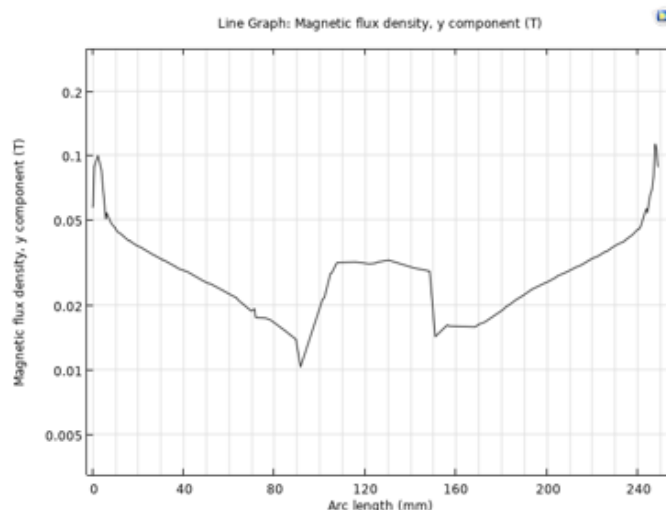
در این حالت شبیه‌سازی هیچ پوششی روی لوله وجود ندارد و عیب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر، طبق جدول ۲، در لوله شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، حداقل چگالی شار مغناطیسی در محلی که عیب استوانه‌ای وجود دارد، ۰.۰۱۱ تسلا و حداکثر مقدار آن ۰.۰۳۳ تسلا می‌باشد و نمودار در محل عیب دارای شکستگی است که به‌خوبی نشان‌دهنده وجود عیب در این قسمت قطعه می‌باشد.



شکل ۸ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله معیوب - بدون پوشش

۳-۱-۴- لوله معیوب - پوشش سالم

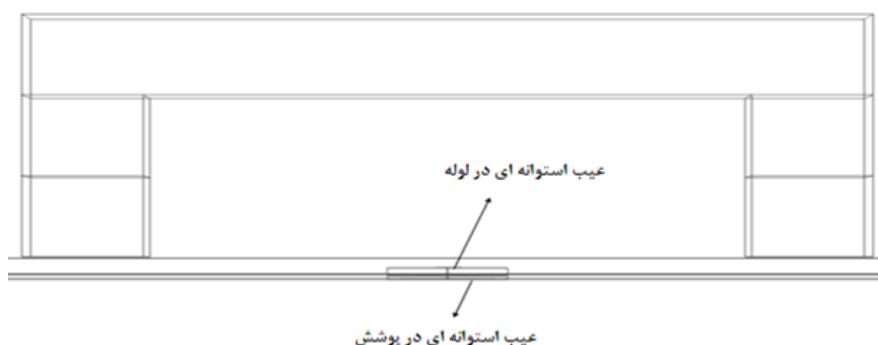
در این حالت شبیه‌سازی عیب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر مانند حالت لوله معیوب - بدون پوشش در لوله موجود است، با این تفاوت که لوله دارای پوشش می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، حداقل چگالی شار مغناطیسی در محلی که عیب استوانه‌ای وجود دارد، ۰.۰۱۱ تسلا و حداکثر مقدار آن ۰.۰۳۳ تسلا می‌باشد، که نشان‌دهنده وجود عیب در این قسمت قطعه می‌باشد و مشابه نمودار حالت لوله معیوب - بدون پوشش می‌باشد.



شکل ۹ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله معیوب - پوشش سالم

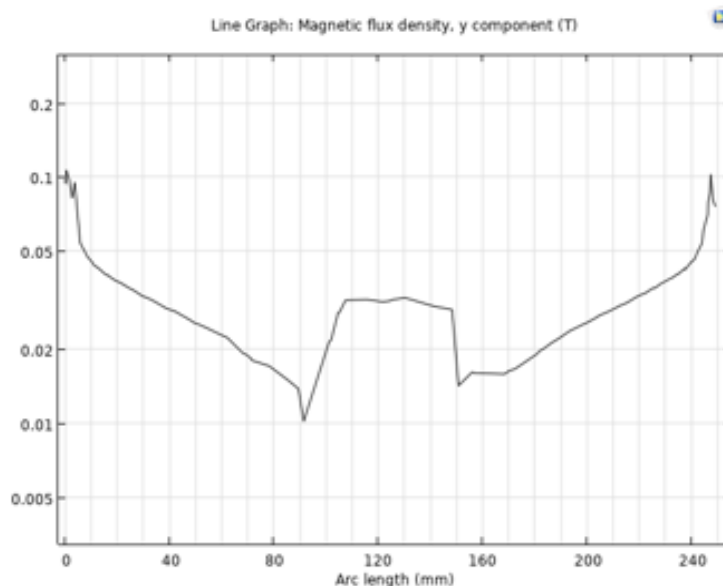
۳-۱-۵- لوله معیوب - پوشش معیوب

در این حالت شبیه‌سازی، عیب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر در لوله و قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر طبق جدول ۲، در پوشش طراحی شد. شکل ۱۰ هندسه سیستم شبیه‌سازی شده در این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ سیستم شبیه‌سازی شده در حالت لوله معیوب - پوشش معیوب

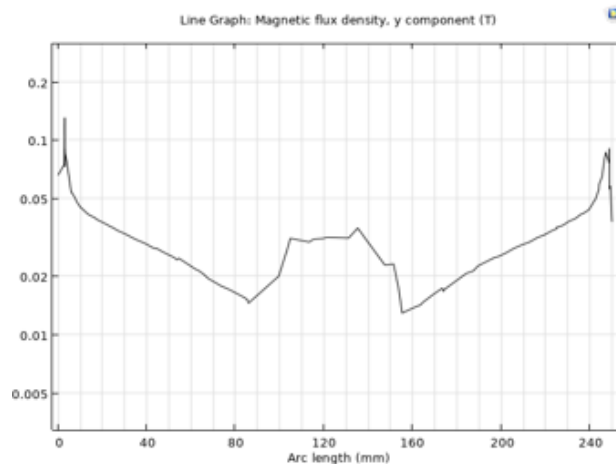
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، حداقل چگالی شار مغناطیسی در محلی که عیب استوانه‌ای وجود دارد، ۰.۰۱۱ تسلا و حداکثر مقدار آن ۰.۰۳۳ تسلا می‌باشد. نتایج این حالت کاملاً مشابه با حالت لوله معیوب - پوشش سالم می‌باشد و وجود عیب در پوشش تغییر معناداری در نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست ایجاد نکرده است.



شکل ۱۱ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله معیوب - پوشش معیوب

۳-۱-۶- لوله و پوشش معیوب با یک عیب مشترک

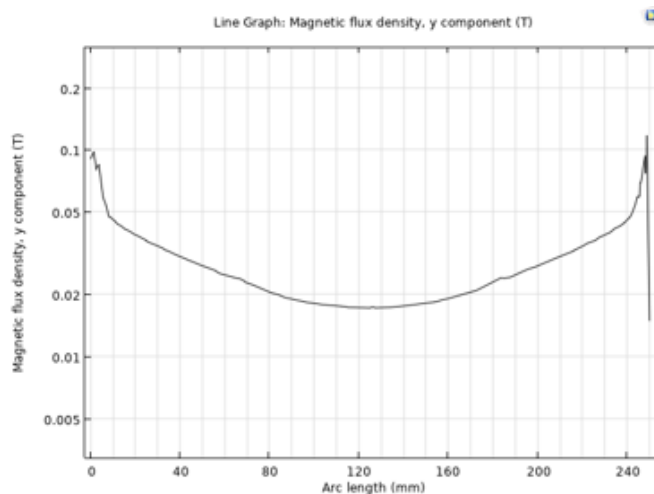
در این حالت یک عیب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۷ میلی‌متر به صورتی که از پوشش شروع شده و تا داخل لوله ادامه یابد، طبق جدول ۲، طراحی شد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، حداقل چگالی شار مغناطیسی در محل عیب ۰.۰۱۳ تسلا و حداکثر مقدار آن ۰.۰۳۵ تسلا می‌باشد که با حالت‌های قبل که عیب در لوله وجود داشت تفاوت چشم‌گیری ندارد. یعنی وجود عیب پیوسته در پوشش و قطعه تفاوت چندانی با وجود عیب در لوله از لحاظ نتایج خروجی ندارد.



شکل ۱۲ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله و پوشش معیوب با یک عیب مشترک

۳-۱-۷- لوله سالم - پوشش معیوب

در این حالت شبیه‌سازی، هیچ عیبی در لوله وجود ندارد و تنها یک عیب استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر، طبق جدول ۲ در پوشش طراحی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، حداقل چگالی شار مغناطیسی در این نمودار تقریباً ۰.۰۱۷ تسلا می‌باشد و تفاوت معناداری با نمودار حالت لوله سالم - پوشش سالم ندارد؛ یعنی عیبی که در پوشش وجود دارد تغییر قابل‌اندازه‌گیری در نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۳ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب

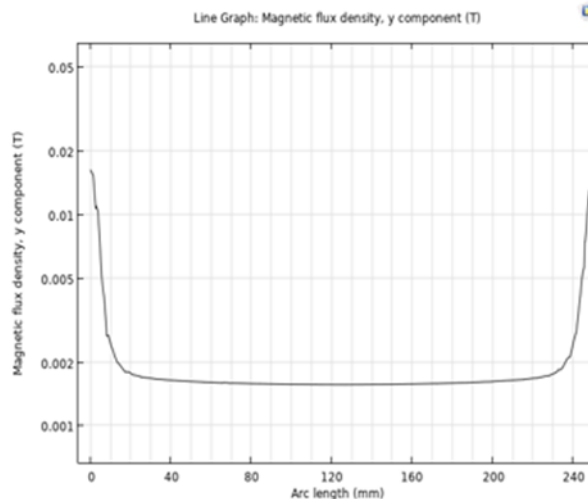
۳-۲- تغییر شدت میدان مغناطیسی در شبیه‌سازی با پوشش قیر پایه زغال‌سنگی

در این قسمت، شبیه‌سازی به این صورت می‌باشد که هیچ عیبی در لوله وجود ندارد و فقط یک عیب استوانه‌ای طبق جدول ۲ در پوشش وجود دارد و در این قسمت با تغییر مقدار مغناطش در آهنرباها، مقدار شدت میدان مغناطیسی در سیستم تغییر می‌کند تا مشخص شود که آیا تغییر شدت میدان مغناطیسی در تشخیص عیب در پوشش قیر پایه زغال‌سنگی خط لوله مؤثر است یا خیر. مقدار مغناطش در حالت لوله سالم - پوشش معیوب برای آهنرباها، $\pm 1e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد. در این حالت شبیه‌سازی مقدار مغناطش را در آهنرباهای ثابت به ترتیب برابر $\pm 0.5e^6, \pm 2e^6, \pm 5e^6$ و $\pm 5e^6$ آمپر بر متر قرار داده

شد و نتایج را با نتایج حالتی که مقدار مغناطش آهنرباها $\pm 1e^6$ آمپر بر متر بود، مقایسه شد.

۳-۲-۱- شبیه‌سازی با مغناطش $e^6/2 \pm$ آمپر بر متر در آهنرباها

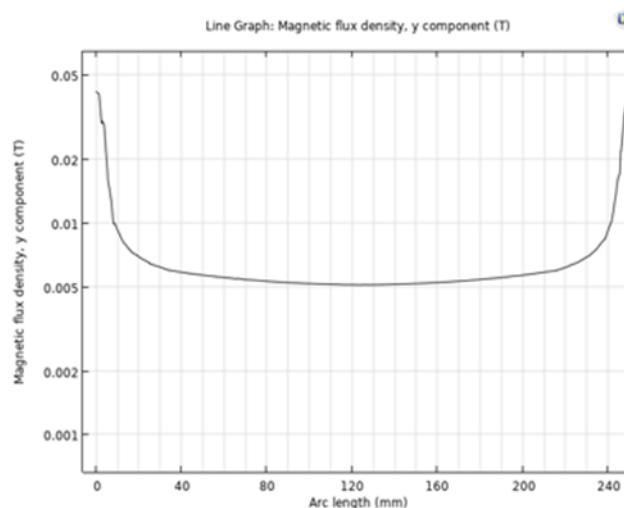
در این حالت مغناطش آهنرباها برابر $\pm 0.2 e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد و نتایج در ادامه آمده است. در شکل ۱۴، نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست آمده است که مقدار کمینه چگالی شار مغناطیسی برابر با 0.0016 تسلا می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در نواحی دارای عیب، شکستگی وجود ندارد و عیب در پوشش قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۴ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب با مغناطش $\pm 0.2 e^6$ آمپر بر متر

۳-۲-۲- شبیه‌سازی با مغناطش $e^6/5 \pm$ آمپر بر متر در آهنرباها

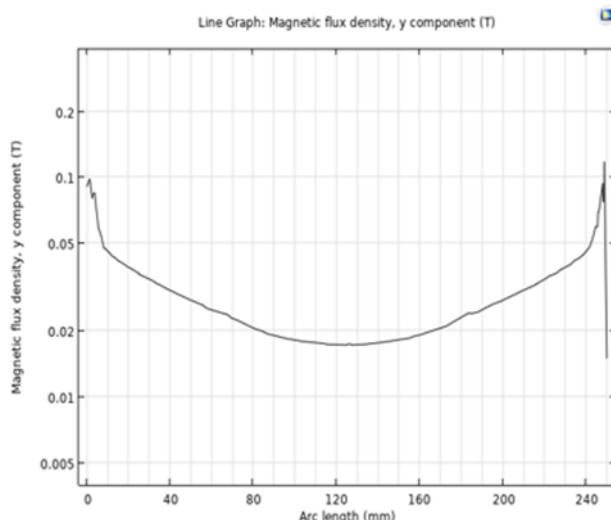
در این حالت مغناطش آهنرباها برابر $\pm 0.5 e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد و نتایج در ادامه آمده است. در شکل ۱۵، نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست آمده است که مقدار کمینه چگالی شار مغناطیسی برابر با 0.005 تسلا می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در نواحی دارای عیب، شکستگی وجود ندارد و عیب در پوشش قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۵ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب با مغناطش $\pm 0.5 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباها

۳-۲-۳- شبیه‌سازی با مغناطش $\pm 1 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباها

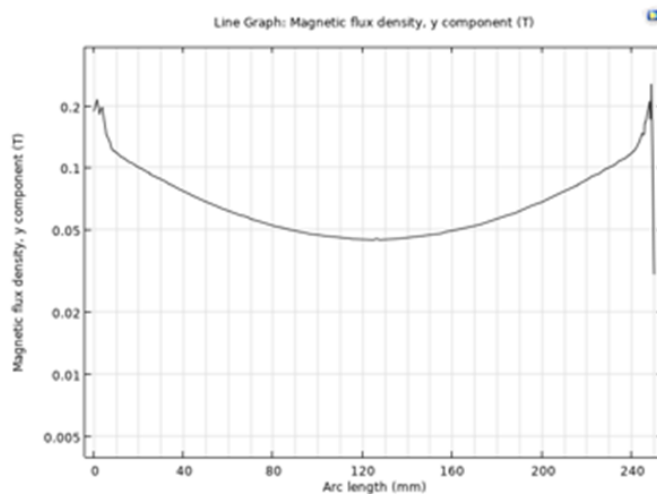
در این حالت مغناطش آهنرباها برابر $\pm 1 e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد که کاملاً مشابه حالت لوله سالم - پوشش معیوب در قسمت قبل است و فقط برای مقایسه باحالت‌های مختلف شبیه‌سازی با مغناطش‌های مختلف در آهنرباها در این قسمت آورده شده است. در شکل ۱۶، نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست آمده است که مقدار کمینه چگالی شار مغناطیسی برابر با 0.017 تسلا می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در نواحی دارای عیب، شکستگی وجود ندارد و عیب در پوشش قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۶ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب با مغناطش $\pm 0.5 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباها

۳-۲-۴- شبیه‌سازی با مغناطش $\pm 2 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباها

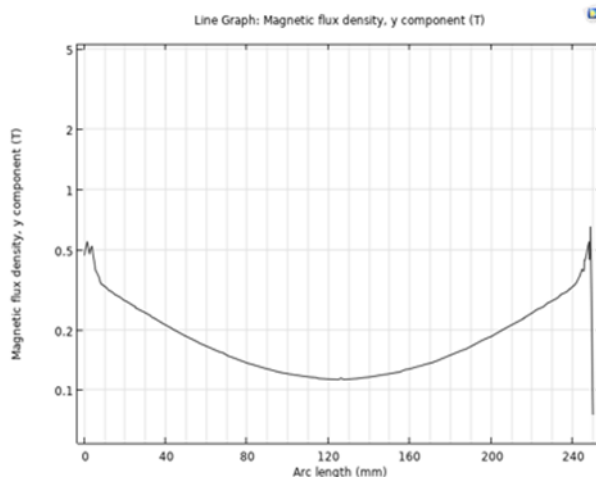
در این حالت مغناطش آهنرباها برابر $\pm 2 e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد و نتایج در ادامه آمده است. در شکل ۱۷، نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست آمده است که کمینه چگالی شار مغناطیسی برابر با 0.045 تسلا می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در نواحی دارای عیب، شکستگی وجود ندارد و عیب در پوشش قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۷ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب با مغناطش $\pm 2 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباها

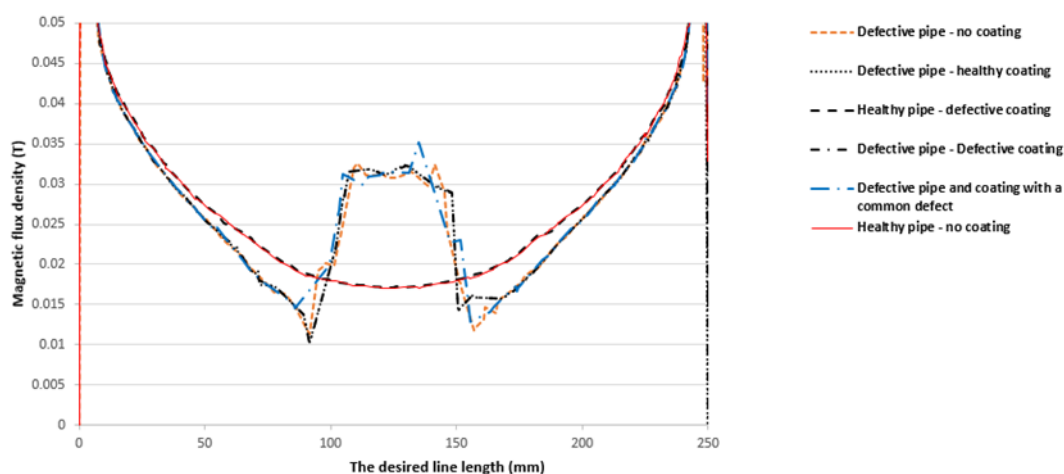
۳-۲-۵- شبیه‌سازی با مغناطش $\pm 5 e^6$ آمپر بر متر در آهنرباهای ثابت

در این حالت مغناطش آهنرباها برابر $\pm 5 e^6$ آمپر بر متر در نظر گرفته شد و نتایج در ادامه آمده است. در شکل ۱۸، نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست آمده است که مقدار کمینه چگالی شار مغناطیسی برابر با ۰.۱۱ تسلا می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، در نواحی دارای عیب، شکستگی وجود ندارد و عیب در پوشش قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۸ نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه تست در حالت لوله سالم - پوشش معیوب با مغناطش $\pm 5 e^6$ آمپر بر متر در آهنربا

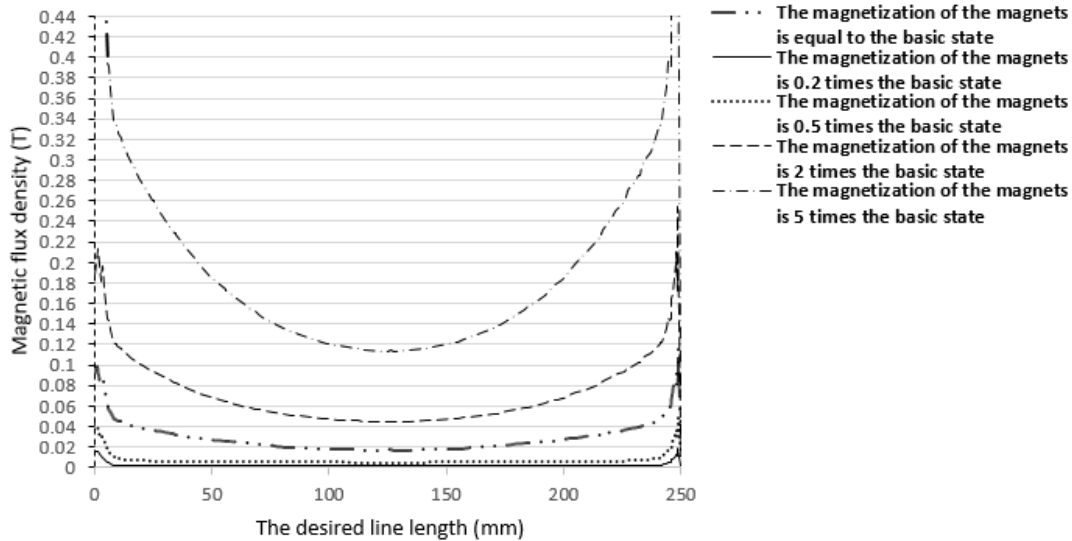
در شکل ۱۹، نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی بر روی لوله با پوشش قیر پایه زغال‌سنگی با حالات مختلف وجود عیب در لوله و پوشش، در یک نمودار رسم شده است. در حالت لوله سالم - بدون پوشش و لوله سالم - پوشش معیوب، چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول خط موردنظر برابر است و وجود عیب در پوشش قیر پایه زغال‌سنگی باعث ایجاد شکستگی در این نمودار نشده است. در واقع با مقایسه این دو حالت که نمودار آن‌ها کاملاً روی هم قرار گرفته است مشخص می‌شود که در نمودار، وجود داشتن و وجود نداشتن پوشش روی لوله تغییری ایجاد نمی‌کند. در باقی حالات، شکستگی ایجاد شده در نمودار، به خاطر وجود عیب در لوله می‌باشد و وجود عیب در پوشش قیر پایه زغال‌سنگی تغییری در آن ایجاد نکرده است. برای جلوگیری از شلوغ شدن نمودار، فقط برخی از حالات در این نمودار آورده شده است. باید توجه داشت که حالت پایه حالتی است که در آن مقدار مغناطش در آهنرباها برابر $\pm 1 e^6$ می‌باشد.



شکل ۱۹ نمودارهای دانسیته شار مغناطیسی در امتداد طول خط مورد نظر برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی با پوشش قیر پایه زغال‌سنگی و مغناطش برابر حالت پایه در آهنرباها

در شکل ۲۰، مقایسه بین نمودارهای به‌دست‌آمده از حالت لوله سالم - پوشش قیر پایه زغال‌سنگی معیوب با تغییر مقدار

مغناطش در آهنرباها صورت گرفته است. با توجه به شکل ۲۰، با تغییر مغناطش آهنرباها، مقدار کل چگالی شار مغناطیسی در امتداد خط مورد نظر تغییر می‌کند، ولی شکستگی در نمودار (که نشان‌دهنده وجود عیب در محل مورد نظر می‌باشد) به وجود نیامد. این موضوع نشان می‌دهد با تغییر مقدار مغناطش آهنرباها، عیب استوانه‌ای موجود در پوشش قیر پایه زغال‌سنگی قابل تشخیص نیست.



شکل ۲۰ نمودارهای دانسیته شار مغناطیسی در امتداد طول خط مورد نظر با تغییر مغناطش آهنرباها در حالت لوله سالم - پوشش قیر پایه زغال‌سنگی معیوب

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تست نشت شار مغناطیسی برای لوله دارای پوشش قیر پایه زغال‌سنگی در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد. نمودارهای چگالی شار مغناطیسی در طول قطعه تست، در حالات مختلفی که در متن مقاله بیان شد با هم مقایسه شد. با توجه به این نمودارها، در قسمت‌هایی از نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه، شکستگی وجود داشت، که با توجه به نمودارهایی که از حالات مختلف وجود عیب در لوله و پوشش آن به دست آمد و مقایسه آن‌ها، مشخص شد که قسمت‌های دارای شکستگی در نمودارهای به‌دست‌آمده، وجود عیب در خود فلز لوله را نشان می‌دهد نه پوشش آن. هم‌چنین برای مشخص شدن تأثیر تغییر مقدار مغناطش آهنرباها بر تشخیص عیب، یک عیب در هر دو پوشش بدون این‌که فلز لوله دارای عیبی باشد در نظر گرفته شد و مقدار مغناطش در آهنرباها تغییر داده شد و مشخص شد که با تغییر مقدار مغناطش در آهنرباها، شکستگی در نمودار چگالی شار مغناطیسی در امتداد طول قطعه که نشان‌دهنده وجود عیب در محل مورد نظر است ایجاد نمی‌شود. پس تغییر مقدار مغناطش در آهنرباها تأثیری روی تشخیص عیب در هر دو پوشش ندارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که وجود عیب در پوشش قیر پایه زغال‌سنگی با روش تست نشت شار مغناطیسی قابل تشخیص نیست. دلیل اصلی آن هم مربوط به ضریب نفوذپذیری نسبی مغناطیسی پوشش است که به ضریب نفوذپذیری نسبی مغناطیسی هوا بسیار نزدیک است و در گذر از پوشش به عیب تغییر محسوسی در چگالی شار مغناطیسی قابل اندازه‌گیری توسط سنسور ایجاد نمی‌کند. روش پیشنهادی جایگزین برای تشخیص عیب در پوشش لوله تست آلتراسونیک می‌باشد که قابلیت اندازه‌گیری ضخامت را با توجه به تفاوت سرعت صوت در لوله و پوشش را دارد.

۵- تشکر و قدردانی

از شرکت گاز استان مرکزی بابت حمایت از این پژوهش طی قرارداد ۱۳۷۰۴۸ تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] Shi, Y.; Zhang, C.; Li, R.; Cai, M.; Jia, G. Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection. *Sensors*, 2015, 15, 31036-31055.
- [2] Al-Naemi F.I, Hall J.P, Moses A.J, FEM modelling techniques of magnetic flux leakage-type NDT for ferromagnetic plate inspections, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006,304:790-793.
- [3] Li, XB., Li, X., Chen, L. et al. Numerical simulation and experiments of magnetic flux leakage inspection in pipeline steel. *J Mech Sci Technol*, 2009, 23: 109–113.
- [4] Okolo, Chukwunonso & Meydan, T. Pulsed magnetic flux leakage method for hairline crack detection and characterization. *AIP Advances*, 2018, 8: 047207.
- [5] Suresh V, Abudhahir A, Jackson D, Development of magnetic flux leakage measuring system for detection of defect in small diameter steam generator tube, *Measurement*, 2017, 95: 273-279.
- [6] Tsukada K. *et al.*, "Detection of Inner Cracks in Thick Steel Plates Using Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage Testing With a Magnetic Resistance Gradiometer," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017,53:1-5.
- [7] Modabberifar M ,Hojjat Y, Abdullah A, Dadkhah M ,Analysis of the Dynamic Characteristics of a Three Phase Panel Type Electrostatic Actuator Using PEM System Identification ,*Sensors & Actuators A: Physical*, 2009, 151:173-178.
- [8] Modabberifar M, Yamamoto A, Higuchi T, An electrostatic induction actuator for dielectric sheet conveying, in: *Proc.: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2010)*, Montréal, Canada, 2010, 551-556.
- [9] Chukwunonso o. & Meydan, T., Pulsed magnetic flux leakage method for hairline crack detection and characterization, *AIP Advances*, 2018, 8: 047207.
- [10] Suresh V, Abudhahir A, Daniel J, Development of magnetic flux leakage measuring system for detection of defect in small diameter steam generator tube, *Measurement*, 2017, 95: 273-279.
- [11] Azizzadeh T, M. S. Safizadeh, Design and Manufacturing of the Magnetic Flux Leakage Inspection System for Detection of Pitting Corrosion in Gas Pipelines, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2018, 5:43-49.