



## طراحی و ساخت سیستم بازرسی نشتی شار مغناطیسی برای تشخیص خوردگی پیتینگ در خطوط انتقال گاز

تورج عزیززاده<sup>1</sup>، میرسعید صفی زاده<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16887، safizadeh@iust.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اسفند 1396

پذیرش: 7 خرداد 1397

ارائه در سایت: شهریور 1397

### کلیدواژگان:

مدل سازی المان محدود

نشتی شار مغناطیسی

خطوط انتقال گاز

### چکیده

روش نشتی شار مغناطیسی متداولترین روش برای تشخیص خوردگی در خطوط انتقال گاز است. بازرسی خطوط لوله معمولاً با استفاده از پیگ‌های هوشمند انجام می‌شود. پیگ هوشمند دارای تعدادی سیستم مغناطیس کننده برای مغناطیس کردن جداره لوله می‌باشد. در مکان‌هایی که عیوب وجود دارند، میدان مغناطیسی نشت می‌کند. مقدار این میدان نشتی توسط سنسورهای اثرهال اندازه‌گیری شده و برای تحلیل عیوب استفاده می‌گردد. در پژوهش‌های اخیر، طراحی مغناطیس کننده مناسب جهت بهبود احتمال تشخیص عیوب در روش نشتی شار مغناطیسی بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش، ابتدا شبیه‌سازی تست نشتی شار مغناطیسی بر اساس معادلات ماکسول در نرم‌افزار کامسول انجام شد. قطعه تحت بررسی از جنس کربن استیل با ضخامت 10 میلی‌متر بود و بر روی آن دو خوردگی پیتینگ با عمق‌های متفاوت (4 و 6 میلی‌متر) شبیه‌سازی شدند. سپس سیگنال‌های نشتی شار مغناطیسی بدست آمده از این عیوب بررسی شدند. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و بدست آوردن ابعاد سیستم مغناطیس کننده، سیستم نشتی شار مغناطیسی طراحی و ساخته شد. ابتدا به منظور اعتبار سنجی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. خطای نسبی حدود 9% است. در نهایت تست نشتی شار مغناطیسی بر روی قطعه حاوی عیوب پیتینگ با عمق‌های متفاوت انجام شده و تصویر سی-اسکن بدست آمد. تصویر سی-اسکن بدست آمده، برای شناسایی نوع عیب و تعیین ابعاد آن استفاده می‌گردد.

## Design and manufacturing of the magnetic flux leakage inspection system for detection of pitting corrosion in gas pipelines

Turaj Azizzadeh, Mir Saeed Safizadeh\*

Department of mechanical engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16887 Tehran, Iran, safizadeh@iust.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 07 March 2018  
Accepted 28 May 2018  
Available Online September 2018

### Keywords

Finite element modeling  
MFL  
Gas pipelines

### Abstract

The magnetic flux leakage technique (MFL) is a widely used method for corrosion detection in the gas pipelines. The inspection of pipelines is typically performed using intelligent PIGs. The MFL intelligent PIG is equipped with an array of magnetizers responsible for inducing a magnetic field in the pipeline wall. The magnetic field leaks out of the pipeline wall at the locations where defects are present. The magnitude of the leakage magnetic field is measured by Hall-effect sensors and used for analysis of defects. In recent studies, the design of the appropriate magnetizer, as a technique to improve the probability of detection of the MFL, has been of great interest to the researchers. In this study, the simulation of the MFL technique was carried out based on Maxwell equations and in 3D using COMSOL software. The specimen under test was a carbon steel plate with a thickness of 10mm, which contained two pitting defects with various depths of 4mm and 6mm. Then, the MFL signals obtained from the defects were analyzed. Following the finite element modeling and obtaining the magnetizer dimensions, MFL system was designed and manufactured. First, the FEM results were experimentally validated. The results of the comparison indicated that there was a good agreement between experiments and FEM. The mean error was below 9%. Finally, MFL experiments were carried out and C-scans from the defects of different depths were obtained. The C-scans can be used for characterization of the defects.

### 1- مقدمه

روش نشتی شار مغناطیسی متداولترین روش برای بازرسی خطوط لوله انتقال گاز جهت شناسایی عیوب خوردگی و تعیین عمر باقی‌مانده لوله است [1]. در حین تست خطوط لوله

Please cite this article using:

T. Azizzadeh, 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*, Vol. 5, No. 2, pp. 43-49, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش تحلیلی یک راه حل بسته و تحلیل ساده‌ای از ناحیه عیب ارائه می‌دهد [9-13]. بدلیل محدودیت‌های روش‌های تحلیلی در مدل کردن انواع مختلف عیوب و در نظر گرفتن خواص غیرخطی مواد فرومغناطیسی، روش عددی (روش مدل المان محدود) بطور گسترده توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی روش نشتی شار مغناطیسی استفاده می‌گردد.

در روش عددی، نشتی شار با حل معادلات ماکسول و با اعمال شرایط مرزی مناسب بدست آورده می‌شود. روش عددی قادر به مدل‌سازی مسائل غیرخطی و هندسه‌های پیچیده است. در پژوهش‌های قبلی، روش المان محدود دوبعدی برای شبیه‌سازی روش نشتی شار مغناطیسی استفاده شده و اثبات کرده که روش موثری است. در مدل المان محدود دوبعدی، عیوب بصورت دو بعدی (همانند عیوب ترک) در نظر گرفته می‌شوند. روش المان محدود دو بعدی 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. بنابراین این روش برای طراحی سیستم مغناطیسی کننده، مناسب نمی‌باشد [14-17].

اعمال سطح مغناطیس‌کنندگی مناسب، پایه و اساس روش بازرسی نشتی شار مغناطیسی است. طراحی و تحلیل سیستم‌های نشتی شار مغناطیسی مستلزم ایجاد یک مدلی است که توانایی ارزیابی دقیق برهم کنش‌ها، بین میدان مغناطیسی اعمالی، نشتی شار مغناطیسی و عیوب سه بعدی را داشته باشد. در این پژوهش، ابتدا شبیه‌سازی سه بعدی تست نشتی شار مغناطیسی در نرم افزار کامسول انجام شده و ابعاد سیستم مغناطیس‌کننده و پارامترهای تست تعیین گردیدند. سیستم نشتی شار مغناطیسی طراحی و ساخته شد. سنسور اثرهال مناسبی برای اندازه‌گیری داده‌های نشتی شار مغناطیسی تهیه گردید. به‌منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. در نهایت تست نشتی شار مغناطیسی بر روی قطعه تست انجام شده و تصویر سی-اسکن بدست آمد. از تصویر سی-اسکن بدست آمده می‌توان برای تعیین ابعاد عیوب استفاده کرد.

## 2- معادلات ساختاری حاکم بر رفتار سیستم مغناطیسی

### کننده در روش نشتی شار مغناطیسی

قبل از انجام شبیه‌سازی، معادلات ساختاری حاکم بر رفتار

فرومغناطیس با روش نشتی شار مغناطیسی<sup>1</sup>، فرایند القای مغناطیس به جداره لوله‌ها توسط تعدادی از مغناطیس‌کننده‌ها انجام می‌شود. یک سیستم مغناطیس‌کننده متشکل از یک یوک فرومغناطیس، دو کوپلینگ فرومغناطیس و دو آهنربای دائمی می‌باشد [۲،۳].

آهنرباهای دائمی به‌عنوان منابع مغناطیسی بکار می‌روند و دانسیته مغناطیسی پسماند آنها، قدرت میدان مغناطیسی را تامین می‌کند. کوپلینگ‌های مغناطیسی نیز از مواد فرومغناطیس هستند و شار مغناطیسی را مابین آهنرباهای دائمی و قطعه تحت تست، انتقال می‌دهند. یوک نیز از مواد فرومغناطیس بوده و مدار مغناطیسی را می‌بندد.

نشتی شار مغناطیسی در مکان‌هایی که کاهش فلز و خوردگی در آنها ایجاد شده، رخ می‌دهد، (شکل 1). نشتی شار مغناطیسی بوجود آمده توسط سنسورهای اثرهال تشخیص داده می‌شوند. زمانی عیوب موجود در قطعه مورد بازرسی توسط روش نشتی شار مغناطیسی قابل تشخیص هستند که المان‌های سیستم مغناطیس‌کننده، سطح مغناطیس‌کنندگی مناسبی را به قطعه تست اعمال نمایند. بنابراین یکی از مهمترین چالش‌ها در روش نشتی شار مغناطیسی، طراحی مغناطیس‌کننده مناسب است تا قویترین سیگنال در حضور عیب ایجاد شود و در نتیجه سیگنال نشتی شار مغناطیسی حاصل از عیب، توسط سنسورها قابل تشخیص باشد [4-6]. طراحی و ساخت سیستم‌های مغناطیس‌کننده با ابعاد مختلف و مقایسه عملکرد آنها و در نهایت انتخاب یک مغناطیس‌کننده بهینه، به روش آزمایشگاهی کاری دشوار و پرهزینه است. با این وجود، روش تحلیل المان محدود مناسبترین روش برای این منظور می‌باشد [۷،۸].

در حالت کلی، دو روش (روش تحلیلی و روش عددی) برای شبیه‌سازی و بدست آوردن سیگنال‌های نشتی شار مغناطیسی وجود دارند. در روش تحلیلی، عیوب به‌عنوان دو قطبی‌های مغناطیسی در نظر گرفته می‌شوند و این دو قطبی‌ها در دیواره‌های عیب ایجاد می‌شوند.

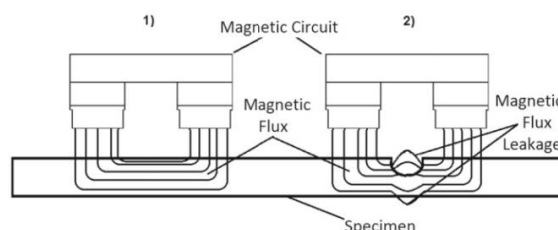


Fig. 1 Magnetic field lines: (1) without defect, (2) with defect

شکل 1 خطوط میدان مغناطیسی در حالات: (1) بدون عیوب، (2) با عیب [4]

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

سیستم مغناطیس کننده در روش نشتی شار مغناطیسی تشریح می‌شود.

به‌عنوان یک تقریب اولیه، تست نشتی شار مغناطیسی بصورت یک مسئله مگنتواستاتیک در نظر گرفته می‌شود. معادلات ماکسول معادلات حاکم بر رفتار فیزیکی میدان مغناطیسی در مدار هستند. این معادلات بصورت معادلات (1) و (2) می‌باشند:

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

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

در این معادلات B[T] بردار دانسیته شار مغناطیسی و H[A/m] بردار شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. علاوه بر این، معادلات ساختاری (3) باید استفاده شوند:

$$B = \begin{cases} \mu_0 H \\ \mu_0 (H + M) \end{cases} \quad (3)$$

در معادلات (3)، معادله اولی برای فضای آزاد بکار برده می‌شود. معادله دومی بیانگر رابطه بین دانسیته و شدت میدان مغناطیسی در مواد فرومغناطیس و همچنین آهنرباهای دائمی نفوذیوم می‌باشد. در معادلات (3)،  $\mu_0$  پرمابلیته فضای آزاد بوده و برابر با  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$  می‌باشد، همچنین  $M$  بیانگر سطح مغناطیس کنندگی برای آهنرباهای دائمی است (در شبیه‌سازی‌های انجام شده مقدار  $M$  برابر با  $\pm 1e6 \text{ A/m}$  در نظر گرفته شد). رابطه بین بردار پتانسیل مغناطیسی و دانسیته شار مغناطیسی طبق معادله (4) می‌باشد.

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

بنابراین معادلات سیستم مغناطیس کننده بصورت زیر تعریف می‌شوند. معادله (5) برای مواد فرومغناطیس و آهنرباهای دائمی بکار می‌رود و معادله (6) برای فضای آزاد بکار 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، بصورت (7) می‌باشند:

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

معادلات (5) و (6) همراه با شرایط مرزی (معادلات 7) حل می‌شوند تا دانسیته شار مغناطیسی در تمام مکان‌ها بدست آیند [19,18].

### 3- شبیه‌سازی روش نشتی شار مغناطیسی

در حالت کلی، شبیه‌سازی شامل سه مرحله است:  
- مدل‌سازی شامل مدل‌سازی آهنرباها و مواد فرومغناطیس و

هندسه هر یک از آنها.

- حل کردن میدان مغناطیسی بر اساس خواص تعریف شده در تمام مکان‌ها در مدل.

- بدست آوردن نتایج و نمودار دانسیته شار مغناطیسی. این نتایج شبیه‌سازی در نقاطی از قطعه تست بدست آورده شدند که دقیقاً در همان نقاط، نتایج آزمایشگاهی بدست آمدند (برای مقایسه نتایج).

سیستم مغناطیس کننده شبیه‌سازی شده شامل: (1) یک یوک، (2) دو آهنربای دائمی و (3) دو کوپلینگ می‌باشد (شکل 2).

مواد مورد استفاده برای یوک، قطعه تست، و کوپلینگ‌ها، آلیاژ کربن استیل X52 می‌باشد. مواد و رفتار مغناطیسی هر قطعه از سیستم مغناطیس کننده در جدول 1 آورده شده‌اند. رفتار میدان مغناطیسی در یوک، کوپلینگ‌ها و قطعه تست توسط منحنی مغناطیس کنندگی B-H تعیین می‌شوند. منحنی مغناطیس کنندگی برای مواد این المان‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به شکل 3، مقدار دانسیته شار مغناطیسی در حالت اشباع برای ماده X52 حدود 2 تسلا می‌باشد. دو آهنربای دائمی نفوذیوم با گرید N42 برای القای شار مغناطیسی استفاده شدند.

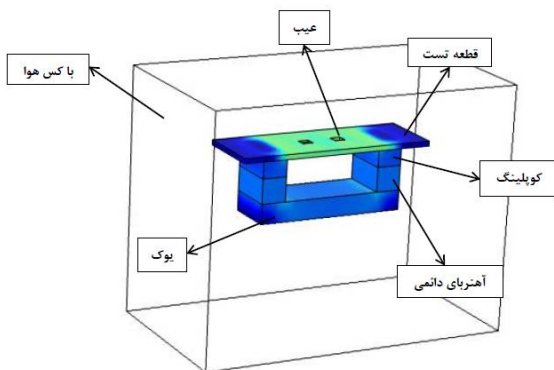


Fig. 2 Magnetizing system

شکل 2 سیستم مغناطیس کننده

جدول 1 خواص مواد مربوط به المان‌های تشکیل دهنده سیستم مغناطیس کننده

رفتار مغناطیسی	ماده	قطعه
Curve B-H	Steel X52	یوک
پارامغناطیس	Nd-Fe-B	آهنرباها
Curve B-H	Steel X52	کوپلینگ‌ها
پارامغناطیس	Air	هوا
Curve B-H	Steel X52	قطعه تست

نظر را نشان می دهد.

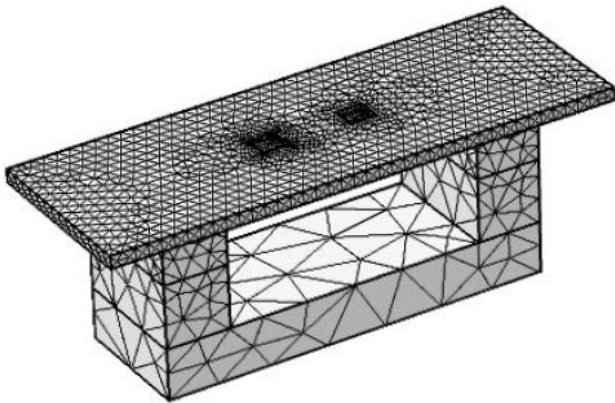


Fig. 4 The mesh generation of the 3D model

شکل 4 ایجاد مش مربوط به مدل سه بعدی

جدول 2 ابعاد قطعه تست و عیوب ایجاد شده بر روی آنها

Table 2 The dimensions of the specimen and defects

ضخامت (t)	عرض (w)	طول (L)	
10 mm	140 mm	400 mm	قطعه تست
40% t	20 mm	20 mm	خوردگی پیتینگ 1
60% t	20 mm	20 mm	خوردگی پیتینگ 2

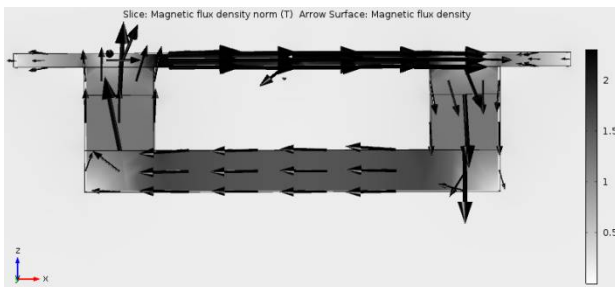


Fig. 5 Magnetic flux density in magnetizing system

شکل 5 دانسیته شار مغناطیسی در سیستم مغناطیس کننده

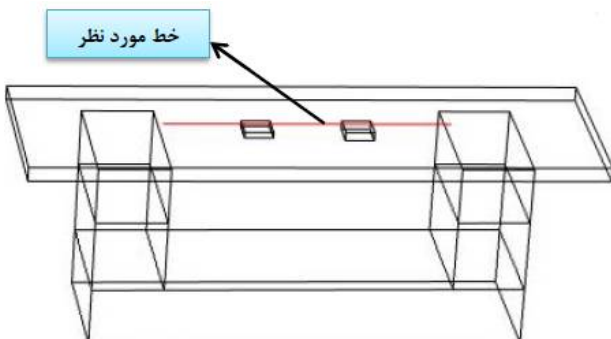


Fig. 6 The specified line for computation of MFL data

شکل 6 خط مورد نظر برای محاسبه داده های نشتی شار مغناطیسی

شکل 7، نمودار دانسیته شار مغناطیسی در امتداد خط و برای

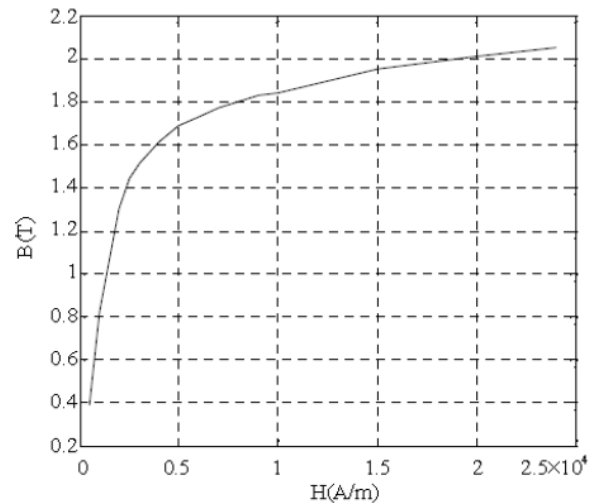


Fig. 3 Magnetizing curve of the steel X52

شکل 3 منحنی مغناطیس کنندگی استیل X52

بعد از تعیین مواد سیستم، شرایط مرزی برای هر المان باید مشخص شوند. در شبیه سازی انجام شده، سیستم مغناطیس کننده بوسیله هوا با پرمابلیته 1 احاطه شده است. رفتار آهنرباهای دائمی با قانون پایستاری شار شبیه سازی شده است. پس از تعیین شرایط مرزی، گام بعدی تعریف نوع مش و رزولوشن آن است. در این شبیه سازی مش با المان Free Tetrahedral استفاده شد. هندسه مش بندی شده در شکل 4 نشان داده شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق تر، المان های مش نزدیک عیوب ریزتر انتخاب شدند.

پس از اینکه هندسه، مواد، شرایط مرزی و مش تعیین شدند، سپس حل با روش المان محدود محاسبه می شود. در شبیه سازی های انجام شده، عیوب پیتینگ مربعی در سطح قطعه در نظر گرفته شده اند ابعاد این خوردگی ها در جدول 2 آورده شده اند.

#### 4- نتایج شبیه سازی

شکل 5 نشان می دهد که چگونه دانسیته میدان مغناطیسی در داخل قطعه به اشباع می رسد. مقدار دانسیته شار مغناطیسی در حالت اشباع حدود 2 تسلا است. همچنین جهت حرکت خطوط شار مغناطیسی در داخل هر المان از سیستم مغناطیس کننده در شکل 5 مشاهده می شود.

برای بدست آوردن سیگنال نشتی شار مغناطیسی در نواحی دارای عیب، یک خط با فاصله 3 میلی متر از سطح قطعه (به منظور در نظر گرفتن فاصله سنسور از سطح قطعه) تعریف می شود و دانسیته شار مغناطیسی در امتداد این خط بدست آورده شده و رسم می گردد. شکل 6 موقعیت مکانی خط مورد

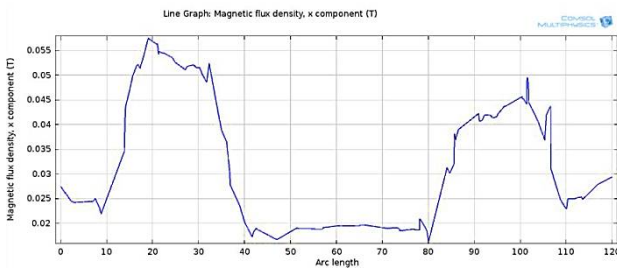


Fig. 7 MFL plot in location of the pitting corrosions

شکل 7 نمودار دانسیته شار مغناطیسی در مکان عیوب خوردگی حفره‌ای (حالت شبیه‌سازی)

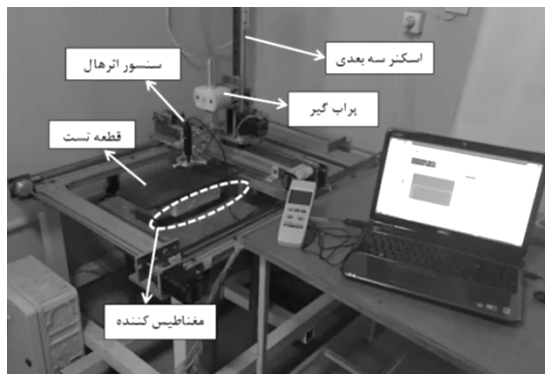


Fig. 8 Experimental setup of the MFL technique

شکل 8 مجموعه آزمایشگاهی روش نشتی شار مغناطیسی

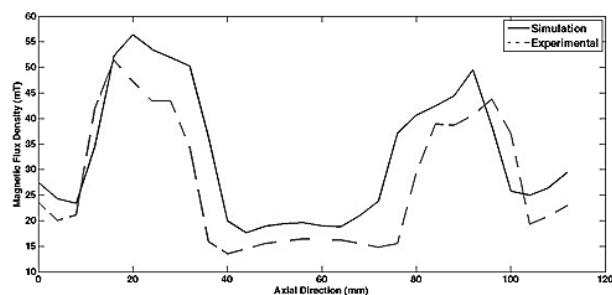


Fig. 9 Comparison of the simulation and test data

شکل 9 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی

جدول 3 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی

Table 3 Comparison of the simulation and test data

ابعاد عیوب	عمق عیوب	Experiment MFL <sub>peak</sub> (T)	FEM MFL <sub>peak</sub> (T)	خطای نسبی
20mm*20mm	%40 <sub>t</sub> (4mm)	0/044	0/049	%8/9
20mm*20mm	%60 <sub>t</sub> (6mm)	0/052	0/057	%9/1

پس از اتمام اسکن و ذخیره داده‌ها در کامپیوتر، داده‌های MFL می‌توانند بصورت سه بعدی نمایش داده شوند بطوریکه سیگنال MFL تابعی از موقعیت مکانی x-y سنسور اثرهال می‌باشد. اندازه گام حرکت سنسور در جهات طولی و عرضی

عیوب خوردگی حفره‌ای با ابعاد 20mm\*20mm و عمق‌های 40% (4 میلی‌متر) و 60% (6 میلی‌متر) را نشان می‌دهد. مقادیر پیک سیگنال شار مغناطیسی در عیوب با عمق‌های 4 میلی‌متر و 6 میلی‌متر به ترتیب برابر با 49 میلی‌تسلا و 57 میلی‌تسلا می‌باشند. در شکل 7 واحد محور عمودی بر حسب تسلا می‌باشد.

## 5- انجام تست نشتی شار مغناطیسی و بدست آوردن

### نتایج

مجموعه آزمایشگاهی در شکل 8 نشان داده شده است. سیستم اندازه‌گیری نشتی شار مغناطیسی شامل سیستم مغناطیس‌کننده، قطعه تست، پراب گیر، سنسور اثرهال، اسکنر سه بعدی و لپ‌تاپ می‌باشد. سنسور اثرهال برای اندازه‌گیری توزیع دانسیته شار مغناطیسی بر روی قطعه تحت تست استفاده می‌شود. این سنسور از مدل mg-3002 و ساخت کشور تایوان می‌باشد. قابل ذکر است که عیوب پیتینگ توسط ماشین فرز بر روی قطعه تست ماشینکاری شدند. از اسکنر سه بعدی، برای کنترل حرکت سنسور اثرهال بر روی قطعه تست استفاده می‌شود. برای ثابت نگه داشتن فاصله بین سنسور و سطح قطعه (Lift-off)، این سنسور بر روی پراب گیر نصب می‌شود. داده‌های خروجی سنسور اثرهال از طریق پورت USB به کامپیوتر منتقل شده و برای پردازش‌های بعدی ذخیره می‌شوند.

ابتدا به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی انجام شده، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. بدین منظور داده‌های دانسیته شار مغناطیسی در امتداد خط گذرنده از مرکز عیوب خوردگی حفره‌ای با استفاده از سنسور اثرهال بدست آورده شده و نمودار دانسیته شار مغناطیسی رسم می‌گردد. نمودار مقایسه دانسیته شار مغناطیسی برای هر دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل 9 نشان داده شده است.

جدول 3 مقادیر پیک دانسیته شار مغناطیسی برای دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، خطای نسبی حدود 9% است. خطای بوجود آمده عمدتاً به دلیل عدم یکسان بودن خواص مغناطیسی تعریف شده در شبیه‌سازی با خواص مغناطیسی واقعی مواد مورد استفاده در آزمایشات است. اگر خواص مغناطیسی مواد (مثلاً منحنی مغناطیس‌کنندگی) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند، دقت نتایج شبیه‌سازی می‌تواند بهبود داده شود. در مرحله بعدی عملیات اسکن کردن سطح قطعه با سیستم نشتی شار مغناطیسی برای کل ناحیه اسکن انجام می‌گردد.

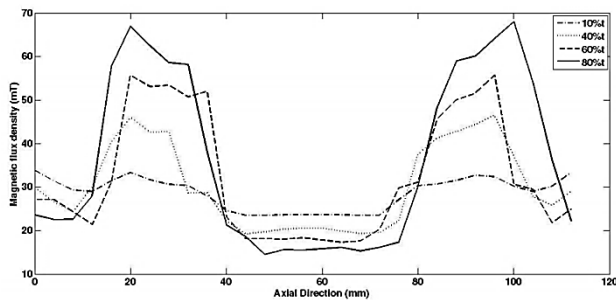


Fig. 12 MFL signals of pitting corrosion with different depths

شکل 12 سیگنال نشتی شار مغناطیسی برای خوردگی‌های پیتینگ با عمق‌های مختلف

### 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا شبیه‌سازی تست نشتی شار مغناطیسی در نرم‌افزار کامسول انجام شده و ابعاد سیستم مغناطیس کننده و پارامترهای تست تعیین گردیدند. قطعه تحت بررسی از جنس کربن استیل با ضخامت 10 میلی‌متر بود و بر روی آن دو خوردگی پیتینگ با عمق‌های متفاوت (4 میلی‌متر و 6 میلی‌متر) شبیه‌سازی شدند. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، سیستم نشتی شار مغناطیسی طراحی و ساخته شد. سنسور اثرهال مناسبی برای اندازه‌گیری داده‌های نشتی شار مغناطیسی تهیه گردید. ابتدا به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. خطای نسبی حدود 9% است. در نهایت تست نشتی شار مغناطیسی بر روی قطعه تست انجام شده و تصویر سی-اسکن بدست آمد. از تصویر سی-اسکن بدست آمده می‌توان برای شناسایی و تعیین ابعاد عیوب (طول، عرض و عمق) استفاده کرد.

### 7- مراجع

- [1] M. Nikpay, Evaluation of Shell and Tube Heat Exchangers with Magnetic Leakage Method, *Proceedings of The 2th International Conference on Technical Inspection and NDT*, Tehran, Iran, October 21-22, 2008. (in Persian)
- [2] T. Bubenec, D. Veritas, *Electromagnetic methods for detecting corrosion in underground pipelines: magnetic flux leakage (MFL)*, USA Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [3] Z. D. Wang, Y. Gu, Y. S. Wang, A review of three magnetic NDT technologies, *J. Magn. and Magn. Mater.*, Vol. 4, pp.382-388, 2012.
- [4] A. Jaime, P. Raad, S. Prada, Multi-Objective Optimization of a Magnetic Circuit for Magnetic Flux

بترتیب برابر با 4 و 5 میلی‌متر تنظیم شدند. شکل 10 نمودار سه بعدی دانسیته شار مغناطیسی بدست آمده را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عمق عیب، دامنه سیگنال دانسیته شار مغناطیسی افزایش می‌یابد.

تصویر سی-اسکن از ناحیه اسکن شده در شکل 11 نشان داده شده است. در این شکل، مکان واقعی عیوب با مربع سفید رنگ نشان داده شده اند. اندازه طول پیتینگ از گستردگی سیگنال نشتی شار مغناطیسی در راستای محوری بدست آورده می‌شود. اندازه عرض عیب پیتینگ نیز با این تصویر سی-اسکن قابل تعیین است. از دامنه سیگنال نیز برای تعیین عمق عیوب استفاده می‌گردد.

عمق خوردگی پیتینگ مهمترین پارامتر برای تعیین میزان ایمنی خطوط لوله است. سیگنال‌های دانسیته شار مغناطیسی برای عمق‌های مختلف عیب پیتینگ در شکل 12 نشان داده شده است. با توجه به شکل 12، مغناطیس کننده طراحی شده و همچنین سیستم نشتی شار مغناطیسی ساخته شده حتی قادر به تشخیص عیوب پیتینگ با عمق 10% (1 میلی‌متر) می‌باشد. مقدار دامنه سیگنال برای پیتینگ با عمق 1 میلی‌متر برابر با 100 گوس است که براحتی با استفاده از سنسورهای مغناطیسی مانند اثرهال قابل تشخیص می‌باشد.

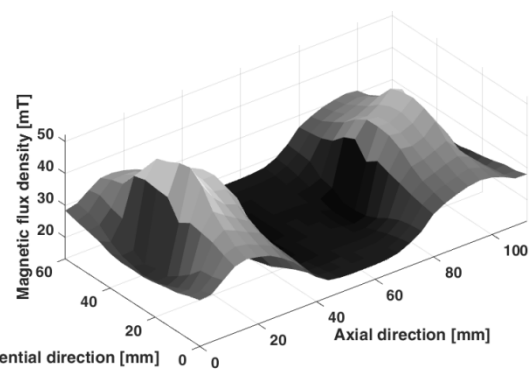


Fig. 10 MFL 3D plot

شکل 10 نمودار سه بعدی دانسیته شار مغناطیسی

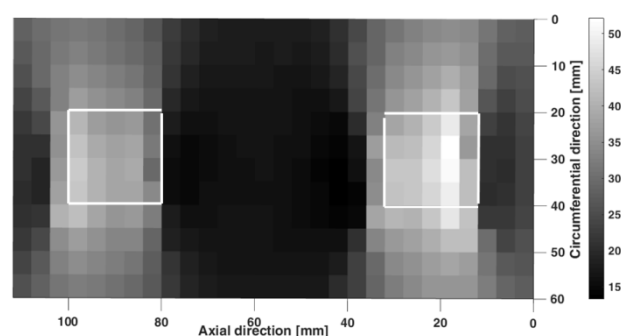


Fig. 11 2D C-scan

شکل 11 تصویر سی-اسکن دو بعدی

- Vol. 28, No. 2, pp. 67–71, 1995.
- [12] C. Mandache, L. Clapham, A model for magnetic flux leakage signal predictions, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, pp. 2437-2421, 2003.
- [13] J.T. Conway, Trigonometric Integrals for the magnetic field of the coil of rectangular cross section, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 42, No. 5, pp. 1538-1548, 2006.
- [14] X. M. Wu, M. L. Qian, Application of finite-element method to magnetic flux leakage inspection of pipelines, *Nondestructive Testing*, Vol. 22, pp. 147-150, 2000.
- [15] W. Mao, C. Mandache, L. Clapham, D. L. Atherton, The effect of bulk stresses on magnetic flux leakage signals, *Insight*, Vol. 43, pp. 88-91, 2001.
- [16] K. Mitsuaki, M. Noritaka, N. Kazumasa, Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite elements, *NDT E Int.*, Vol. 36, pp. 479-486, 2003.
- [17] V. Babbar, B. Shiari, L. Clapham, Mechanical Damage Detection With Magnetic Flux Leakage Tools: Modeling the Effect of Localized Residual Stresses, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 40, pp.43-49, 2004.
- [18] H. Zuoying, Q. Peiwen, C. Liang, 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method, *NDT & E International*, Vol. 39, pp. 61-66, 2006.
- [19] E. Bray, R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation - A tool in Design, Manufacturing, and Service*, CRC Press Inc, 1997.
- Leakage-Type Non-destructive Testing, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 35, pp. 15-27, 2016.
- [5] Z. Zhang, L. Upda, S. S. Upda, Y. Sun, J. Si, An equivalent linear model for magnetostatic nondestructive evaluation, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No. 3, 1996.
- [6] S. Xiao-chun, H. Song-ling, Z. Wei, Optimization of the magnetic circuit in the MFL inspection system for storage-tank floors, *Russian journal of nondestructive testing*, Vol.43, pp. 326-331, 2007.
- [7] M. Augustyniak, Z. Usarek, Finite element method applied in electromagnetic NDTE: A review, *J. Nondestructive Eval.*, Vol. 35, No. 39, 2016.
- [8] V. Suresh, A. Abudhahir, J. Daniel, Development of magnetic flux leakage measuring system for detection of defect in small diameter steam generator tube, *Measurement*, Vol. 95, pp. 273-279, 2017.
- [9] N.N. Zatsopin, V.E. Shcherbinin, Calculation of the magneto static field of surface defects. I. Field topography of defect models, *Defektoskopiya*, Vol. 5, pp. 50-59, 1966.
- [10] F. Forster, New findings in the field of nondestructive magnetic leakage field inspection, *NDT & E International*, Vol. 19, No. 1, pp. 3-14, 1986.
- [11] Y. Zhang, K. Sekine, S. Watanabe, Magnetic leakage field due to sub-surface defects in ferromagnetic specimens, *NDT & E International*,