

Effect of Field Factors on the Evaluation of Corrosion of Storage Tanks Floor by Magnetic Flux Leakage Method

Reza Taghavi Jelodar | Majid Abbasi 

Research Laboratory of NDE, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran. E-mail: abbasim@nit.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 02 February 2023

Revised 11 February 2023

Accepted 21 Feb. 2023

Keywords:

Storage Tank, Oil, Corrosion, Nondestructive Evaluation, Magnetic Flux leakage.

ABSTRACT

In this paper, the effects of some field factors in the non-destructive evaluation of the corrosion rate of the floor of oil storage tanks have been investigated using the magnetic flux leakage method at the industrial level. For this purpose, the effect of factors such as the cathodic protection system on the tank, the presence of waste, the presence of metal attachments (spot welding or spatter), distortion of the tank and the coating thickness of plate on the accuracy of the assessment of the size of defects in different situations have been studied. The field inspections were carried out in two oil tanks using the MFL3DiM magnetic flux leakage unit on the detected defects. Two standard steel blocks with thicknesses of 6 and 8 mm and 4 specific defects in different sizes (20, 40, 60 and 80% of the plate thickness) was used for setting and calibrating the device. Ultrasonic thickness measurement was also used to verify the results of MFL measurement. In addition, the MFL results were clarified by an ultrasonic thickness measuring unit. The results of the evaluations showed that when the cathodic protection system is turn on, it caused a decrease in the measurement accuracy and the corrosion defects with a less than 22 mass loss percent are not identified. Also, the presence of a metal attachments (welding spot) with a height of 5 mm caused defects with a corrosion depth of less than 25% not to be detected. On the other hand, it was observed that the presence of attachments and waste on the bottom of the tank caused the error in detecting the depth of corrosion to be greater than the length and width of the defect. The presence of waste on the bottom of the tank caused defects with a corrosion depth of less than 18% not to be detected. Distortion in the bottom sheet of the tank caused false defects to be detected in the sheet and the dimensions of the real defects were reported completely wrongly. The presence of a coating with a thickness of more than 3000 micrometers made the defects of the calibration plates undetectable. Additional investigations showed that if the difference in the thickness of the non-magnetic coating on the sheet is higher than 500 micrometers, the dimensions of the detected defects are unrealistic and unreliable.

Cite this article: Taghavi Jelodar R. & Abbasi M., (2023). Effect of Field Factors on the Evaluation of Corrosion of Storage Tanks Floor by Magnetic Flux Leakage Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 27-38. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.391625.1116>

اثر عوامل میدانی در ارزیابی خوردگی کف مخازن نفت به روش نشت شار مغناطیسی

رضا تقوی جلودار، مجید عباسی ✉

آزمایشگاه تحقیقاتی ارزیابی غیرمخرب، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران، رایانامه: abbasim@nit.ac.ir

چکیده:

در این مقاله، اثرات برخی عوامل میدانی در ارزیابی غیرمخرب میزان خوردگی کف مخازن نفتی به روش نشت شار مغناطیسی در سطح صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، اثر روشن بودن سامانه حفاظت کاتدی، وجود آلودگی، وجود زائده‌های فلزی (خال جوش یا پاشش جوش)، اعوجاج ورق کف مخزن و ضخامت پوشش غیرفلزی (رنگ) بر دقت ارزیابی ابعاد عیوب در موقعیت‌های مختلف بررسی شده است. بازرسی‌ها به صورت میدانی در دو مخزن نفتی با استفاده از دستگاه نشت شار مغناطیسی با برند MFL3DiM روی عیوب شناسایی شده، انجام شد. از بلوک‌های فولادی استاندارد با ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متر و ۴ عیب خوردگی مصنوعی در اندازه‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ضخامت برای تنظیم و کالیبراسیون دستگاه استفاده شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که روشن بودن سامانه حفاظت کاتدی سبب کاهش دقت اندازه‌گیری شده و عیوب خوردگی با مقدار کمتر از ۲۲ درصد تلفات جرم شناسایی نمی‌شوند. همچنین وجود زائده فلزی (خال جوش) با ارتفاع ۵ میلی‌متر باعث شد که عیوب با عمق خوردگی کمتر از ۲۵ درصد، شناسایی نشوند. از طرفی مشاهده شد که وجود زائده و زباله در کف مخزن باعث شده است که خطای ایجاد شده در تشخیص اندازه‌ی عمق خوردگی بیشتر از طول و عرض آن باشد. عدم تمیزی و وجود زباله روی کف مخزن باعث شد که عیوب با عمق خوردگی کمتر از ۱۸ درصد شناسایی نشود. ایجاد اعوجاج در ورق کف مخزن باعث شد که عیوب کاذب در ورق شناسایی شده و ابعاد عیوب واقعی نیز با خطا گزارش شوند. وجود پوشش با ضخامت بیشتر از ۳۰۰۰ میکرومتر باعث شد که عیب‌های ورق‌های کالیبراسیون قابل شناسایی نباشد. بررسی‌های تکمیلی نشان داد که اگر اختلاف ضخامت پوشش غیرمغناطیسی روی ورق کف مخازن بالاتر از ۵۰۰ میکرومتر باشد، ابعاد عیوب مشاهده شده در دستگاه غیرواقعی است و قابل اتکا نیست.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۲/۰۲

کلیدواژگان:

مخازن ذخیره، نفت، خوردگی، ارزیابی غیرمخرب، نشت شار مغناطیسی.

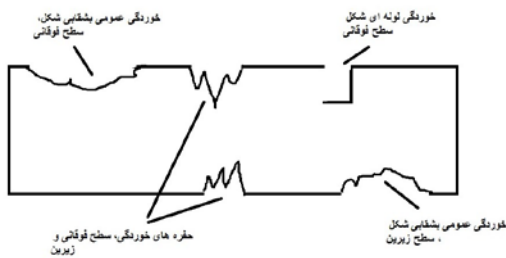
استناد: تقوی جلودار، رضا و عباسی، مجید. (۱۴۰۱) اثر عوامل میدانی در ارزیابی خوردگی کف مخازن نفت به روش نشت شار مغناطیسی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۲)، ۲۷-۳۸. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.391625.1116>

۱- مقدمه

امروزه برای استفاده صحیح از مخازن بزرگ منابع انرژی و یا مواد شیمیایی، نگاه‌های راهبردی و فعالیت‌های نوآورانه زیادی صورت می‌گیرد. در این بین برای جلوگیری از نشت مواد شیمیایی و هدر رفت منابع انرژی و از همه مهم‌تر جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی، نیاز فراوانی به بازرسی‌های متنوع و مکانیزه غیرمخرب از این مخازن است. نوع و روش بازرسی به نوع عیب و هدف از بازرسی مرتبط است [۱-۴].

خوردگی مهم‌ترین عیب و چالش اصلی بازرسی‌های غیرمخرب کف مخازن ثابت نفت و گاز است [۵]. عیوب معمول در کف مخازن عبارت‌اند از خوردگی عمومی در سطح بالایی و زیرین کف مخزن، خوردگی موضعی در سطح زیرین، خوردگی‌های حفره‌ای کوچک در سطح بالایی و زیرین و خوردگی ناشی از باکتری احیاء کننده سولفور^۱ که معمولاً در سمت فوقانی کف مخزن روی می‌دهد [۶]. خوردگی کف که گاهی اوقات به خوردگی سمت پایین یا خوردگی سمت خاک گفته می‌شود، در سطح زیرین کف مخازن رخ می‌دهند و می‌توانند ناشی از عوامل متعددی باشد که معمولاً با تماس با رطوبت همراه است.

خوردگی در کف اغلب توسط مواد پایه ناهمگن (به اندازه کافی مخلوط نشده) ایجاد می‌شود. توده‌های خاک رس مخلوط شده با ماسه می‌توانند نقطه آغاز مناسبی برای این خوردگی باشند. همچنین در مرحله ساخت‌وساز می‌توان مشاهده کرد که ضایعات فلزی، میله‌های جوشکاری، میخ‌های تسطیح چوبی و حتی اقلامی مانند دستکش‌های مستعمل در زیرزمین (کف مخزن) رها می‌شوند. این موارد می‌توانند شرایط ایده‌آلی برای ایجاد سلول‌های خوردگی فراهم کنند. مخازن مستقر در مناطق خاص با یک ترکیب مشخص، ممکن است رطوبت بیشتری نسبت به مخزن کنار آن به دلیل شرایط موضعی دریافت کنند. رطوبت زیر مخازن در اثر هوادهی باعث خوردگی می‌شود، بنابراین باید از ایجاد فضای خالی (هوادهی) در مواد پایه اجتناب شود، به جز مواردی که اسیدی باشد [۷]. مطابق شکل ۱، عیوب کف مخازن نفتی را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی نمود [۸]:



شکل ۱- تصویر نمادین از عیوب خوردگی در کف مخازن [۸].

- خوردگی عمومی بشقابی شکل با لبه‌های شیب‌دار،
- خوردگی حفره‌ای مخروطی شکل،
- خوردگی لوله‌ای شکل.

تشخیص و تعمیر آسیب‌های خوردگی در مخازن ذخیره‌سازی، بسیار مقرون به‌صرفه‌تر از تخریب و بازسازی مخازن جدید است. هزینه‌های سرمایه‌ای و انسانی مربوط به هنگام نشت کنترل نشده محصول ذخیره شده اغلب غیرقابل محاسبه است. بازرسی‌های خوردگی باید به صورت منظم و کافی بوده و باید برای صاحب یا کاربر مخازن ذخیره، از اهمیت بالایی برخوردار باشد [۹].

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۵ نشان داده شد که تنها در ایالات متحده، هزینه مستقیم سالانه خوردگی روی مخازن ۴.۵ میلیارد دلار است [۱۰]. برای بهره‌برداری صحیح و کاهش هزینه‌های اصلی و جانبی، یک برنامه نگهداری و بازرسی جامع و هدفمند مورد نیاز است. بسته به شرایط عمومی داخل مخزن، معمولاً هر پنج تا ده سال یک بازرسی کلی انجام می‌شود. به منظور پیش‌بینی و جلوگیری از نشت مخازن، آزمایش غیرمخرب به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

بازرسی کف مخازن تا قبل از سال ۱۹۸۸ با استفاده از روش فراصوتی و دستی انجام می‌گرفت که بسیار زمان‌بر و پرهزینه بود. در سال ۱۹۸۸ روش نشت شار مغناطیسی^۲، MFL، به عنوان یک روش مؤثر و سریع معرفی شد. در این روش از القا میدان مغناطیسی با استفاده از آهن‌رباهای دائمی قوی در سطح ورق استفاده می‌شود. در صورت وجود خوردگی در ورق، نشت شار میدان مغناطیسی از سطح ورق توسط آرایه‌ایی از حسگرهای مغناطیسی (به عنوان نمونه حسگر اثر هال) شناسایی و ارزیابی می‌شود. با تحلیل این پاسخ‌های دریافتی، میزان و ابعاد خوردگی ورق مشخص می‌گردد [۱۲].

² Magnetic Flux Leakage

¹ Sulphur reducing bacteria

دلیل خوردگی به خاطر بستر محل نصب مخازن و آب و هوایی گرم و مرطوب (شرجی) است. مکان دوم، شرکت پالایش نفت شهید تندگویان (پالایشگاه تهران) در استان تهران و شهرستان ری با آب و هوایی گرم و خشک بود که ورق‌های کف مخزن دارای ضخامت ۶ میلی‌متر و با نام مخزن TK-2032 و به قطر ۲۵ متر بود.

۲-۳ تجهیزات بازرسی

برای ارزیابی عیوب خوردگی کف مخازن به روش MFL از دستگاه floor map با برند MFL3DiM ساخت شرکت SILVERWING استفاده شد. این دستگاه با سرعت خطی ثابت ۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و با عرض روبش ۳۰۰ میلی‌متر سطح ورق را در هر حرکت مورد ارزیابی قرار می‌دهد. قدرت میدان مغناطیسی دو آهن‌ریا در فاصله ۳ میلی‌متری از سطح کف ورق برابر ۱/۹۶ تسلا است. ۲۵۶ سنسور در محفظه وسط دو آهن‌ریا و در فاصله ۲ میلی‌متری از سطح ورق، قرار دارد. در شکل ۲، تصویری از این دستگاه، قسمت زیرین (چینش آهن‌ریاها و حسگرهای مغناطیسی) و تصویر نمادین آن، صفحه نمایش و تصاویری از نمودارهای مربوط به سیگنال‌های بازرسی نشان داده شد. از دستگاه ضخامت‌سنج فراصوتی مدل EPOCH LCT ساخت شرکت OLYMPUS برای صحنه‌گذاری اندازه‌گیری عمق عیوب مشاهده شده، استفاده شد.

از ورق کالیبراسیون برای تنظیم دستگاه استفاده شد. به این منظور، مطابق استاندارد ASME SEC V article 16 [۱۵] و دستورالعمل سازنده‌ی دستگاه (شرکت SILVERWING) از ورق‌های فولادی با ضخامت‌های ۶ و ۸ حاوی ۴ عیب مصنوعی با اندازه مشخص استفاده شد. روی این ورق‌ها، عیوب مصنوعی به شکل استوانه با عمق ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد ضخامت، ایجاد شد. مشخصات کامل این عیوب در ۰ ارائه شد. ورق با همان جنس صفحات مخازن نفتی از فولاد کربنی ASTM A283 Gr C است که ترکیب شیمیایی استاندارد و نمونه‌های آن در ۰ ارائه شد. شکل ۳-الف، تصویری از این ورق و شکل ۳-ب، تصویری از خروجی دستگاه MFL از آن را نشان می‌دهد. در شکل ۲-د، نمونه‌ای از سیگنال‌های دریافتی از این عیوب توسط دستگاه نشان داده شده است.

به واسطه پیچیدگی هندسی عیوب و اثرات متفاوت متغیرها و عوامل مؤثر بر نشت و تشخیص شار مغناطیسی، تحلیل پاسخ‌های دریافتی از تجهیزات بازرسی MFL چالش‌های مهندسی پیچیده‌ای دارد که کسب دانش آن برای کالیبراسیون تجهیزات و افزایش قابلیت اعتماد به نتایج آن ضروری می‌نماید [۱۳]. لذا تحقیقات متنوع و مستمری برای شناسایی عوامل اصلی با توجه به محیط بازرسی انجام شده و یا مورد نیاز است [۱۴]. در این بین، برخی عوامل میدانی که به محیط بازرسی^۱ مرتبط است، می‌تواند سبب خطاهایی در بازرسی شوند. لذا بهتر است قبل از شروع بازرسی، اثر این عوامل بر شاخص‌های کیفی مورد اندازه‌گیری را مشخص کرد. بنابراین هدف از این مقاله، بررسی و ارزیابی اثرات برخی عوامل میدانی تأثیرگذار بر نتایج بازرسی MFL کف مخازن نفتی است [۱۵].

۲- روش تحقیق

۲-۱ متغیرهای آزمایش و عوامل میدانی

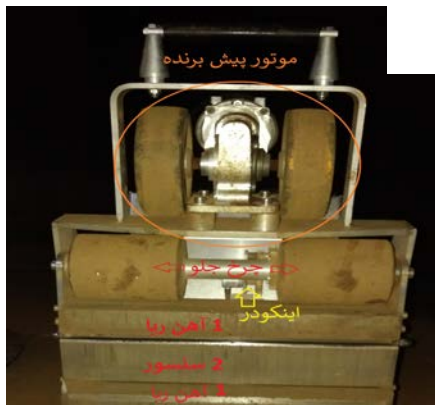
در این مقاله تأثیرگذاری برخی عوامل میدانی بر عملکرد دستگاه MFL در ارزیابی طول، عرض، مساحت و عمق عیوب خوردگی کف مخازن (از بالا و پایین) نفتی بررسی شده است. بر اساس این اندازه‌گیری، میزان تلفات فلز از دست‌رفته ناشی از خوردگی نیز برآورد شد. عوامل میدانی مورد بررسی در این مقاله به شرح زیر است:

- روشن یا خاموش بودن سیستم حفاظت کاتدی،
- وجود آلودگی و رسوبات هیدروکربنی در کف مخزن،
- وجود زائده‌های فلزی در کف مخزن،
- وجود اعوجاج در ورق کف مخزن و
- ضخامت پوشش (رنگ).

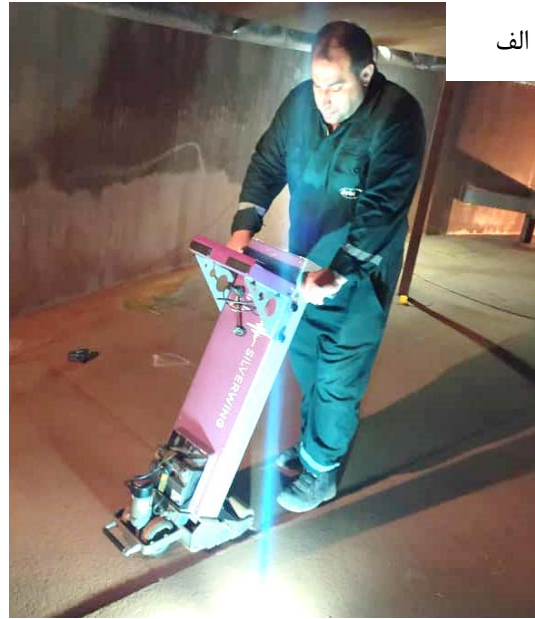
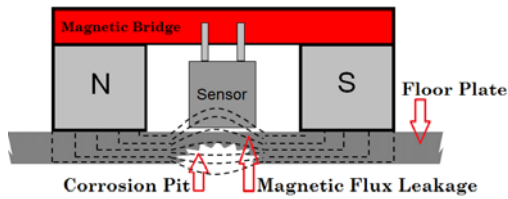
۲-۲ محل بازرسی مخازن

برای آزمایش‌های میدانی دو نقطه از کشور با آب‌وهوا و شرایط محیطی متفاوت انتخاب شد. مکان اول، شرکت پتروشیمی پادجم (با نام ثبتی شرکت توسعه پلیمر پادجم) در استان بوشهر، شهرستان عسلویه با ضخامت ورق ۸ میلی‌متر با نام مخزن TK-3103 و به قطر ۶۰۰۰ میلی‌متر بود. این مناطق، بسیار متأثر از خوردگی بوده و اصلی‌ترین

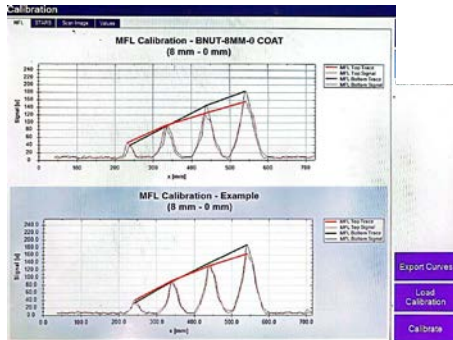
¹ Inspection Medium



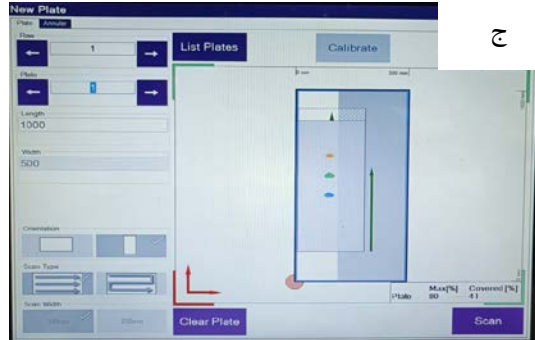
ب



الف



د



ج

شکل ۲- تصاویری از تجهیزات بازرسی نشت شار مغناطیسی: الف) دستگاه اصلی، ب) موقعیت آهن‌رباها و حسگرهای مغناطیسی و تصویر نمادین آن، ج) صفحه نمایش، د) سیگنال‌های دریافتی از ۴ عیب ورق (بلوک) استاندارد کالیبراسیون

جدول ۱- مشخصات کامل عیوب مصنوعی ایجاد شده روی ورق کالیبراسیون دستگاه MFL

شماره عیب (Metal loss)				مشخصه عیب	ضخامت ورق (mm)
۴	۳	۲	۱		
(/۰.۸۰)	(/۰.۶۰)	(/۰.۴۰)	(/۰.۲۰)	عمق (mm)	۶
۴.۸	۳.۶	۲.۴	۱.۲	قطر (mm)	
۱۸.۲	۱۶.۳	۱۳.۷	۱۰.۰	عمق (mm)	۸
۶.۴	۴.۸	۳.۲	۱.۶	قطر (mm)	
۲۰.۰	۱۸.۰	۱۵.۵	۱۱.۵		

مشخص می‌کند، تصاویر به صورت سه بعدی بوده که در آن مقدار عمق، طول، عرض و مساحت عیب و میزان درصد تلفات

با تحلیل داده‌های دریافتی از حسگرهای مغناطیسی، ابعاد، عمق و مساحت عیب و میزان تلفات فلز از دست رفته ناشی از خوردگی در ورق مشخص می‌گردد. همچنین خوردگی به صورت اعداد دیجیتالی، نمودار و تصاویر دو بعدی و سه بعدی در صفحه نمایش دستگاه، در هنگام بازرسی نشان داده می‌شود. در گزارش نهایی که از دستگاه برداشت و ماحصل بازرسی را

قرار می‌دهد و ابعاد و مساحت عیب شناسایی شده، میزان خوردگی (درصد تلفات فلز) و تعداد عیوب گزارش شده دست‌خوش تغییر قرار می‌گیرد و حساسیت در تشخیص کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل تأثیرگذاری میدان‌های حاصل از جریان الکتریکی حفاظت کاتدی بر میدان‌های القایی اعمال شده توسط دستگاه MFL باشد. نتایج ارزیابی با پراب فراصوتی نشان داده است که ابعاد گزارش شده از دستگاه MFL در حالت خاموش بودن سیستم حفاظت کاتدی به ابعاد واقعی عیوب نزدیک‌تر هستند.

با روشن بودن جریان‌های سیستم حفاظت کاتدی، حسگر دستگاه MFL تحت تأثیر دو میدان مغناطیسی خواهد بود و در نتیجه، حسگر پاسخ متفاوتی را ارائه خواهد کرد. با توجه به این موضوع که اساس عملکرد سیستم MFL بر پایه میدان‌های مغناطیسی است، حضور هر نوع میدان الکتریکی یا مغناطیسی مزاحم می‌تواند در شدت نشت میدان مغناطیسی ناشی از عیوب تأثیرگذار باشد و در نتیجه عملکرد دستگاه را تحت تأثیر قرار دهد [۱۷]. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که فعال بودن سیستم حفاظت کاتدی، ابعاد عیوب یا تلفات تخمین زده شده (EPL) را کوچک‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد به گونه‌ای که عیوب خوردگی با مقدار کمتر از ۲۲ درصد تلفات جرم را نمی‌تواند تشخیص دهد.

جدول ۳- تأثیر خاموش (CP off) و روشن بودن (CP on) سیستم حفاظت کاتدی بر تشخیص چهار عیب مشخص خوردگی کف مخزن توسط MFL.

CP Off

ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 139 Y: 480	54	30	1620	Bottom	84
2	X: 134 Y: 684	45	30	1350	Bottom	40
3	X: 137 Y: 586	50	24	1200	Bottom	59
4	X: 132 Y: 784	12	6	72	Bottom	20

CP On

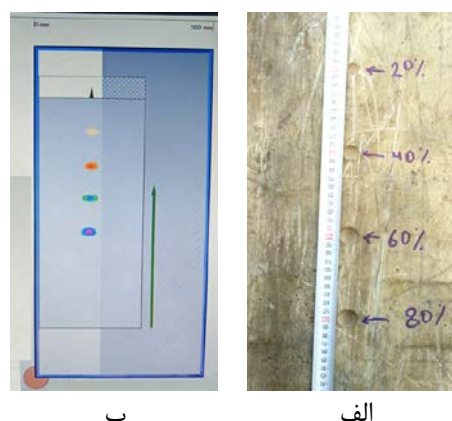
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 139 Y: 480	50	27	1350	Bottom	83
2	X: 134 Y: 684	44	29	1276	Bottom	35
3	X: 137 Y: 586	48	22	1056	Bottom	52
4	X: 132 Y: 784	8	4	41	Bottom	12

² Cathodic Protection (CP)

تخمین زده شده^۱ (EPL) فلز در محل عیب و نحوه خوردگی از بالا یا پایین ورق را نشان می‌دهد.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی ورق فولادی برای کالیبراسیون دستگاه MFL مطابق ASTM A283 Gr C (درصد وزنی) [۱۶].

عنصر	C	Si	Mn	P	S
استاندارد (حداکثر)	۰.۲۴	۰.۴۰	۰.۹۰	۰.۰۳۵	۰.۰۴۰
ورق ۶ میلی‌متر	۰.۰۶۲	۰.۱۶	۰.۷۳	۰.۰۱۳	۰.۰۰۴
ورق ۸ میلی‌متر	۰.۱۳	۰.۱۷	۰.۵۷	۰.۰۲	۰.۰۰۶



شکل ۳- الف) تصویری از ورق کالیبراسیون دستگاه MFL با ضخامت ۸ میلی‌متر و ۴ عیب با عمق و ابعاد مختلف و ب) تصویر دوبعدی از این عیوب به دست آمده از دستگاه MFL.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر روشن بودن سیستم حفاظت کاتدی

جدول ۳، نتایج ارزیابی چهار نقطه معیوب (خوردگی واقعی) در دو حالت خاموش (CP off) و روشن (CP on) سیستم حفاظت کاتدی^۲ (CP) را نشان می‌دهد که روی مخزن TK-3103 انجام شد. طول، عرض، مساحت، موقعیت عیب و درصد تلفات فلز در این نقاط با موقعیت مختلف، مشخص شده است. مشاهده می‌گردد که روشن بودن سیستم حفاظت کاتدی، نتایج ارزیابی MFL را به شدت تحت تأثیر

¹ Estimated Percent Loss

جدول ۴- تأثیر حضور و عدم حضور زائده بر شناسایی عیوب خوردگی توسط MFL.

کف مخزن فاقد هر گونه زائده						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 177 Y:463	54	41	2214	Bottom	70
2	X: 172 Y:486	86	36	3096	Bottom	21
3	X: 174 Y:592	45	34	1530	Bottom	56
4	X: 176 Y:685	97	43	4171	Bottom	74
5	X: 172 Y: 796	36	21	756	Bottom	39
6	X: 173 Y: 834	95	36	3420	Bottom	63

کف مخزن شامل زائده						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 177 Y:463	53	39	2067	Bottom	63
3	X: 174 Y:592	43	31	1333	Bottom	48
4	X: 176 Y:685	95	41	3895	Bottom	71
5	X: 172 Y: 796	34	19	646	Bottom	25
6	X: 173 Y: 834	95	31	2945	Bottom	53

۳-۳ تأثیر وجود آلودگی در کف مخزن

به طور معمول کف مخازن ذخیره شامل رسوبات هیدروکربنی، آهنی و انواع محصولات خوردگی هستند، لذا بخشی از کف مخزن TK-2032 قبل از تمیزکاری زباله‌ها و رسوبات هیدروکربنی ارزیابی شد تا میزان خطای اندازه‌گیری مشخص شود. جدول ۵، نتایج این بررسی در ارزیابی ۶ عیب خوردگی به روش MFL را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که حضور آلودگی‌ها سبب شد که تشخیص عیوب دچار خطا شده و تعداد عیوبی که در حالت با آلودگی‌ها بازرسی شده است، کمتر از مقدار واقعی است. از طرفی دیگر، طول و عرض عیوب تشخیص داده شده در صورت حضور آلودگی‌ها کمی کمتر شده است. مهم‌ترین شاخصی که تغییر معنی‌داری یافت، درصد تلفات فلز ناشی از خوردگی است. به عنوان نمونه این شاخص برای عیب شماره ۶، به جای ۷۵ درصد، به مقدار ۵۳ درصد گزارش شده است که حدود ۲۲ درصد کمتر از مقدار واقعی است. برای عیوب دیگر، خطا کمتر است. این موارد نشان می‌دهد که هرگونه آلودگی و زائده‌ای که سبب بلند شدن یا فاصله گرفتن دستگاه از کف مخزن شود، فاصله حسگر با سطح فلز تغییر می‌یابد، لذا میدان نشتی که روی حسگر تأثیر می‌گذارد، دارای شار ضعیف‌تری خواهد بود. در نهایت باعث ایجاد خطا در تشخیص عیوب می‌گردد.

۳-۲ تأثیر وجود زائده فلزی در کف مخزن

با توجه به بازرسی‌های صورت گرفته مشخص شده است که در برخی از موارد به دلیل تعمیرات صورت گرفته در کف مخزن، جوشکاری‌های تعمیری، نصب برخی قطعات ابزار دقیق و ... یک سری زائده‌هایی در کف مخزن ایجاد می‌شوند. در بعضی موارد از بین بردن این زائده‌ها مقدور نبوده و به ناچار تجهیزات MFL با وجود این زائده‌ها در کف مخزن عمل روبش را انجام می‌دهند.

مخزن TK-2032 برای ارزیابی تأثیر وجود زائده روی کف مخزن بر قدرت تشخیص عیوب، انتخاب شد. ابتدا کف مخزن بدون زائده مورد روبش قرار گرفته و نواحی معیوب شناسایی شد. سپس زائده‌های مصنوعی از جنس فولاد ساده کربنی با ارتفاع ۵ میلی‌متر و طول و عرض متفاوت روی نواحی معیوب مخزن قرار داده شده و عمل روبش مجدد انجام شد. نتایج در جدول ۴ نشان داده شد. مشاهده می‌گردد که حضور زائده با ارتفاع ۵ میلی‌متر، سبب تغییر نتایج در شناسایی عیوب توسط MFL شده است. همچنین مشخص شد که با حضور یک زائده، دقت تشخیص عیوب کمتر شده و عیوبی با ابعاد کمتر از ۲۵٪ عمق خورده شده (عیب شماره ۲)، قابل تشخیص نیست.

به منظور صحت‌گذاری بر نتایج آزمون MFL که بدون زائده انجام شده بود، نواحی معیوب گزارش شده توسط دستگاه فراصوتی (UT) نیز ضخامت‌سنجی شد. نتایج نشان داد که عمق‌های گزارش شده در حالت بدون زائده با نتایج UT هم‌خوانی مطلوبی داشت. به عبارتی مقادیر گزارش شده در حالت وجود زائده از واقعیت دور بوده و نتایج ارائه شده وضعیت کف مخزن را مطلوب‌تر نشان می‌دهد که خطای فریبنده‌ای است. این زائده‌ها سبب بلند شدن یکی از قطب‌های دستگاه MFL می‌شود، در نتیجه فاصله حسگر مغناطیسی از کف مخزن تغییر می‌یابد. لذا روند تشخیص میدان مغناطیسی تغییر یافته و در نهایت تشخیص عیب دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. به عبارت ساده‌تر با توجه به این موضوع که تشخیص عیب در این آزمون بر اساس تشخیص نشت میدان مغناطیسی ناشی از عیوب خوردگی در کف مخزن توسط حسگرهای مغناطیسی است، لذا در صورت تغییر ارتفاع حسگر از کف مخزن، شدت تأثیر میدان‌های نشت کرده از کف مخزن روی حسگر کمتر شده و در نهایت شناسایی عیوب با خطای فریبنده‌ای همراه می‌گردد [۱۸].

جدول ۵- تأثیر حضور و عدم حضور زباله بر شناسایی عیوب توسط MFL.

کف مخزن فاقد هر گونه زباله

ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 220 Y: 113	23	12	276	Bottom	18
2	X: 221 Y: 125	46	22	1012	Bottom	42
3	X: 219 Y: 186	31	19	589	Bottom	35
4	X: 222 Y: 261	34	20	680	Bottom	28
5	X: 221 Y: 296	96	26	2496	Bottom	83
6	X: 219 Y: 430	63	22	1386	Bottom	75

کف مخزن شامل زباله

ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
2	X: 221 Y: 125	49	20	1012	Bottom	35
3	X: 219 Y: 186	28	17	589	Bottom	29
4	X: 222 Y: 261	33	19	680	Bottom	18
5	X: 221 Y: 296	92	22	2496	Bottom	71
6	X: 219 Y: 430	60	20	1386	Bottom	53

شده، مشخص می‌شود که در صورت حضور آلودگی‌ها، تأثیرپذیری عمق نفوذ خوردگی از طول و عرض عیب بیشتر است. از طرفی مشاهده می‌شود که عیوب خوردگی با عمق کمتر از ۱۸٪ شناسایی و گزارش نشده‌اند. بنابراین در صورت وجود آلودگی‌ها در کف مخزن، عیوبی با عمق کمتر از ۱۸٪ خوردگی شناسایی نخواهند شد. همچنین عمق‌های گزارش شده کمتر از مقدار واقعی عمق خوردگی خواهد بود.

در این بخش از پژوهش نیز به منظور صحت‌گذاری بر نتایج آزمون MFL در صورت حضور و عدم حضور زباله‌ها و رسوبات هیدروکربنی از پراب ضخامت‌سنج فراصوتی استفاده شد. به این ترتیب که در این بخش از پژوهش ضخامت نواحی معیوب تشخیص داده شده با پراب UT ضخامت‌سنجی شد و نتایج آن با نتایج MFL در حالت حضور زباله‌ها و عدم حضور زباله‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که عمق‌های گزارش شده در حالت بدون زباله با نتایج UT هم‌خوانی مطلوبی داشت. به عبارتی مقادیر گزارش شده در حالت وجود زباله از واقعیت دور بوده و نتایج ارائه شده وضعیت کف مخزن را مطلوب‌تر نشان می‌دهد.

۳-۴ تأثیر اعوجاج در کف مخزن

به منظور ارزیابی و تأثیر اعوجاج کف مخزن بر رفتار شناسایی عیوب توسط دستگاه MFL، ابتدا یک ورق معیوب از مخزن TK-3103 تهیه شد که به دلیل خوردگی بیش از حد و انجام تعمیرات کف مخزن، از کف برداشته شده بود. پس از تهیه ورق، ابتدا آزمون MFL روی این ورق صورت گرفت. پس از انجام این آزمون در فواصل کوتاه ۵۰ میلی‌متری روی این ورق، ضرباتی با پتک اعمال شد تا این ضربات سبب اعوجاج در ورق شود. در ادامه روی این ورق معوج، آزمون MFL صورت گرفت. نتایج این ارزیابی در جدول ۶، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که پس از ایجاد اعوجاج در ورق، تشخیص عیوب به همراه خطاهای بسیاری بوده و هیچ هم‌خوانی مناسبی با نتایج ارزیابی ورق صاف ندارند و حتی عیوب کاذبی شناسایی شدند که در ورق وجود نداشت. دلیل شناسایی این عیوب عدم تراز بودن پایانه‌های مغناطیسی دستگاه روی ورق است؛ چرا که اعوجاج‌ها سبب ایجاد دره و تپه روی ورق شدند. از طرفی مشاهده می‌گردد که هیچ روند مشخصی در

با توجه به جدول ۵، مشاهده می‌گردد که عیب ID.1 که دارای عرض ۱۲ میلی‌متر و عمق خوردگی ۱۸ درصد است، با حضور آلودگی‌های سطحی تشخیص داده نشده است. از طرفی مشاهده می‌گردد که با حضور آلودگی، میزان عمق‌های خوردگی تشخیص داده شده با یک روند خاصی کاهش پیدا کرده‌اند. به عبارتی دیگر در صورت حضور آلودگی، ارزیابی MFL شرایط کف مخزن را مطلوب‌تر نشان می‌دهد که این موضوع سبب افزایش ریسک بازرسی و کاهش قابلیت اعتماد می‌گردد.

مشاهده می‌گردد در حضور آلودگی‌ها، طول و عرض عیوب تشخیص داده شده با روند مشخصی تغییر پیدا نکردند. به عنوان مثال با توجه به ابعاد عیب ID.2 مشاهده می‌گردد که با حضور آلودگی‌ها، طول عیب تشخیص داده شده، افزایش پیدا کرده است. این در حالی بود که ابعاد سایر عیوب در این شرایط، کاهش پیدا کرده است. این نحوه تغییرات و عدم وجود یک روند مشخص ناشی از زباله‌ها، دلیلی بر ایجاد خطای پیچیده در ارزیابی MFL است. ایجاد چنین خطایی می‌تواند به دلیل اثرات نوع آلودگی‌ها (وجود محصولات خوردگی یا آلودگی‌هایی با رفتار مغناطیسی) و فاصله گرفتن حسگر تشخیص‌دهنده میدان‌های مغناطیسی از کف مخزن باشد. با مشاهده و مقایسه عمق‌های خوردگی تشخیص داده

از طرفی در ضخامت‌های بیشتر از ۳ میلی‌متر عیب قابل شناسایی نیست.

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، اگر پوشش‌های ورق مخزن به یک اندازه و به صورت یکنواخت نباشد، عملکرد دستگاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (تلورانس ± 250 میکرومتر)، به همین منظور، هنگام بازرسی با این روش، می‌بایست اندازه پوشش به صورت دقیق اعلام و هنگام کالیبراسیون دستگاه این میزان در دستگاه ثبت گردد. لازم به ذکر است که شدت میدان مغناطیسی برحسب پوشش و اندازه ضخامت ورق کالیبراسیون تنظیم می‌گردد.

جدول ۷- تأثیر ضخامت پوشش ورق بر شناسایی عیوب توسط MFL.

ورق بدون پوشش						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 174 Y: 143	52	49	2548	Bottom	88

ورق با پوشش ۲ میلی‌متر						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 174 Y: 143	50	47	2499	Bottom	43

ورق با پوشش ۳ میلی‌متر						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 174 Y: 143	47	43	2350	Bottom	28

ورق با پوشش ۴ میلی‌متر						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)

۳-۵-۲ آزمایش دوم: اثر متقابل ضخامت پوشش و اندازه خوردگی

برای بررسی اثر متقابل ضخامت پوشش و اندازه خوردگی، دستگاه MFL با استفاده از ورق کالیبراسیون با ضخامت ۸ میلی‌متر بدون پوشش، کالیبره شده و پس از آن، پوشش‌هایی (از جنس غیرمغناطیسی به شکل طلق پلاستیکی) با ضخامت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ میکرومتر روی ورق قرار داده شد. داده‌های بررسی در جدول ۸ ثبت شدند. مشاهده می‌شود که در پوشش‌هایی با ضخامت بیشتر تشخیص عیوب کوچک‌تر مشکل‌تر شده و با وجود پوشش با ضخامت ۴۵۰۰ میکرومتر، هیچ‌گونه عیبی تشخیص داده نشده است. شکل ۴، تصویر نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.

خطای ایجاد شده در دو حالت صاف یا معوج وجود نداشته و به صورت کاملاً بی‌قاعده عیوب گزارش شدند. این موارد نشان می‌دهد که در صورت معوج بودن ورق کف مخزن، داده‌های آزمایش فاقد اعتبار بوده و می‌تواند همچنین عیوب کاذبی تشخیص داده شوند [۱۹].

جدول ۶- تأثیر اعوجاج ورق بر شناسایی عیوب خوردگی توسط MFL.

ورق صاف خورده شده						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X: 174 Y: 143	20	14	280	Bottom	82
2	X: 170 Y: 184	16	12	192	Bottom	76
3	X: 172 Y: 201	15	10	150	Bottom	90
4	X: 169 Y: 230	22	11	242	Bottom	83
6	X: 173 Y: 263	19	16	304	Bottom	81

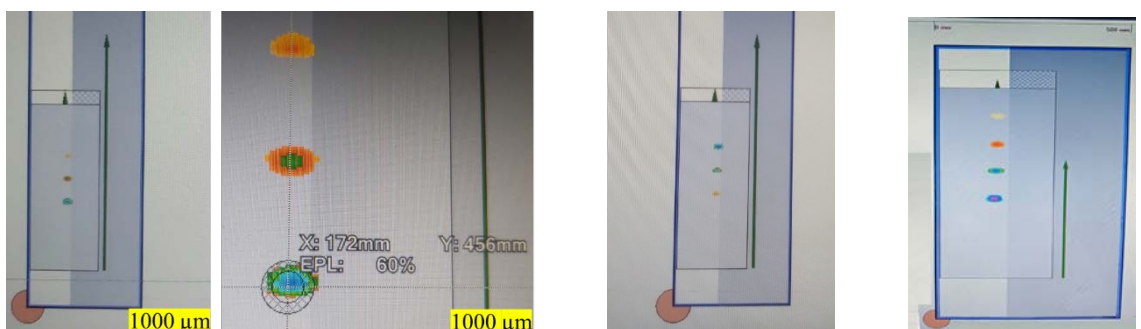
ورق خورده شده شامل اعوجاج						
ID	X,Y (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Top/Bottom	Max. Loss (%)
1	X:169 Y:132	36	17	612	Top	63
2	X:165 Y:153	21	20	420	Bottom	56
3	X:164 Y:169	18	15	270	Bottom	78
4	X:160 Y:189	25	19	475	Bottom	45
5	X:165 Y:203	22	20	440	Bottom	96
6	X:160 Y:220	63	12	756	Top	74
7	X:163 Y:261	20	15	300	Bottom	20
8	X:165 Y:302	43	10	430	Bottom	32

۳-۵-۳ بررسی تأثیر ضخامت پوشش

دو آزمایش برای بررسی تأثیر پوشش انجام شد. آزمایش اول، اثر ضخامت‌های مختلف پوشش با عیب خوردگی ۹۰ درصد و آزمایش دوم، اثر ضخامت‌های مختلف پوشش روی ورق کالیبراسیون ۸ میلی‌متری با چهار عیب ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد بوده است که به ترتیب ارائه می‌شود.

۳-۵-۱ آزمایش اول:

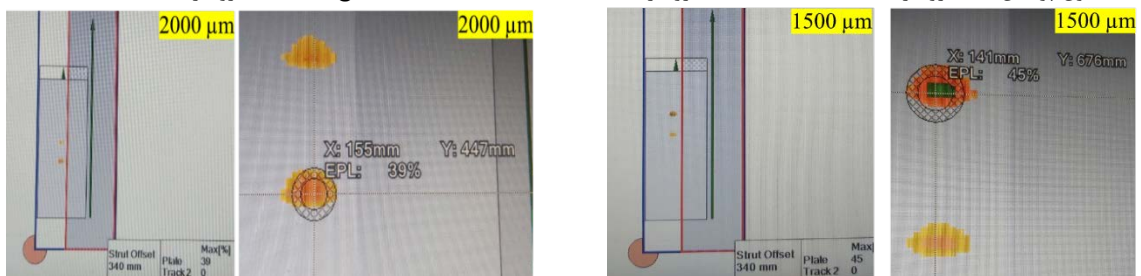
برای بررسی تأثیر پوشش، یک ورق فولادی با یک عیب مصنوعی با پوشش در ضخامت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه، عمق عیب مصنوعی ۹۰٪ ضخامت ورق انتخاب شد. جدول ۷، نتایج ارزیابی در حالت بدون پوشش و پوشش‌دار در ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج مشاهده می‌گردد که با افزایش ضخامت پوشش اعمالی متفاوت، میزان عیب تشخیص داده شده کمتر می‌شود.



ج) ۱۰۰۰ میکرومتر

ب) ۵۰۰ میکرومتر

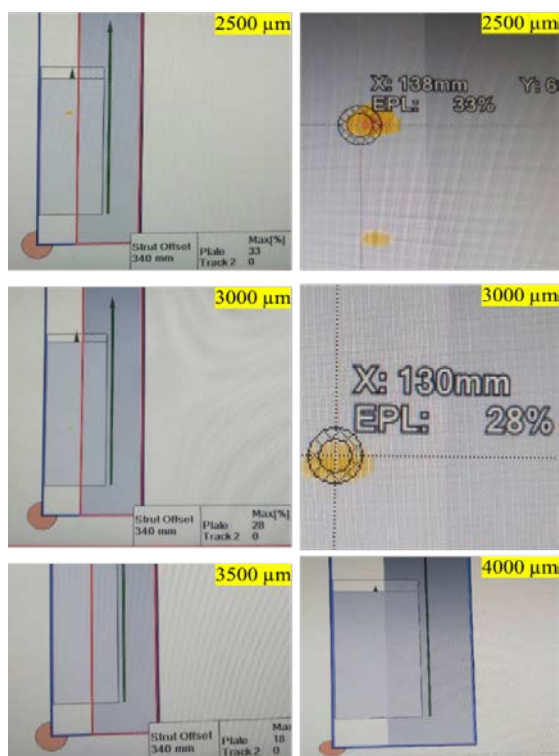
الف) بدون پوشش، ۰ میکرومتر



ه) ۲۰۰۰ میکرومتر

د) ۱۵۰۰ میکرومتر

شکل ۴- تصاویر خروجی دستگاه MFL از عیوب تشخیص داده شده ورق کالیبراسیون با ۴ عیب با ضخامت پوشش های ۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر.



شکل ۵- تصاویر خروجی دستگاه MFL از عیوب تشخیص داده شده ورق کالیبراسیون با ۴ عیب استاندارد با ضخامت پوشش های ۲۵۰۰، ۳۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۴۰۰۰ میکرومتر.

نتایج ارزیابی با حضور پوشش ۱ میلی متری نشان می دهد که حسگرهای اثر هال نتوانسته است عیب مصنوعی ۲۰ درصد را دریافت کند و همچنین عیوب مصنوعی ۴۰ و ۶۰ و ۸۰ درصد را به مقدار خیلی پایین تر نشان داده است. همان گونه که در شکل ۴-ج مشخص است، عیب مصنوعی ۸۰ درصد به میزان ۶۰ درصد ارزیابی شد. شکل ۴-د مشخص می کند که با اعمال پوشش مصنوعی ۱۵۰۰ میکرومتر، دو عیوب مصنوعی ۲۰ و ۴۰ درصد شناسایی نشد و همچنین عیب مصنوعی ۸۰ درصد به میزان ۴۵ درصد ارزیابی شد. شکل ۴-ه مشخص می کند که این بار هم با اعمال پوشش مصنوعی ۲۰۰۰ میکرومتر، دو عیوب مصنوعی ۲۰ و ۴۰ درصد شناسایی نشد ولی عیب مصنوعی ۸۰ درصد به میزان بسیار کمتر از حالت های قبلی و به اندازه ۳۹ درصد ارزیابی شد [۲۰]. شکل ۵، عملکرد دستگاه در نشان دادن عیوب در ضخامت های بیشتر از ۲۵۰۰ تا ۴۵۰۰ میکرومتر را نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می گردد که در ضخامت های بیشتر از ۳۰۰۰ میکرومتر (۳ میلی متر) عملاً هیچ گونه عیبی توسط دستگاه MFL تشخیص داده نمی شود.

پوشش‌های بالاتر از ۳ میلی‌متر، هیچ عیبی تشخیص داده نشده است.

- افزایش ضخامت پوشش به ۴ میلی‌متر باعث شد که عیب با عمق ۹۰ درصد خوردگی شناسایی نگردد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مدیران و کارکنان محترم شرکت‌های بازرسی مهندسی و صنعتی ایران (IEI)، پالایشگاه تهران و پلیمر پادجم بابت حمایت‌های مختلف در اجرای این تحقیق صنعتی صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] N. Kasai, Non-destructive Evaluation method for far-side corrosion type flaws in oil storage tank bottom floors using the magnetic flux leakage technique, Journal of the Japan Petroleum Institute, 2003, 46, (2), 126-132.
- [2] A. R. Ramirez, Experimental study to differentiate between top and bottom defects for MFL tank floor inspections, NDT&E International, 2009, 42, 16-21.
- [3] N. Kasai, Influence of corrosion products on magnetic flux leakage signals in inspection of far-side metal-loss defects in oil storage tank bottom floors, Journal of the Japan Petroleum Institute, 2004, 47(1) 19-26.
- [4] F. LIU, S. Ding, X. Guo, Magnetic flux leakage and acoustic emission testing technique for atmospheric storage tanks, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [5] M. Kircough, How silverwing products and services can assist owner/operators in overcoming corrosion problems associated with carbon steel above ground storage tanks, Silverwing (UK) LTD, Scientific Reports 2015.
- [6] J. T. Lary, Corrosion Control/Cathodic Aboveground Storage Tank, Corpro Companies, inc.1090 Enterprise Drive, Medina, Ohio 44256, 330-723-5082
- [7] Wilhelm Butler Wang, Pitting corrosion in water ballast tanks, University College Buskerud and Vestfold, Faculty of Technology and Maritime Sciences, April 2014

بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از دو آزمایش فوق می‌توان نتیجه گرفت که وجود پوشش‌های با ضخامت‌های مختلف، می‌تواند سبب خطاهایی در بازرسی شود. اختلاف بیش از ۵۰۰ میکرومتر، تأثیر زیادی بر نتایج گزارش شده دارد. لذا بازرسی باید توجه لازم به ضخامت پوشش و میزان خوردگی گزارش شده از عیب شناسایی شده داشته باشد و با بازرسی‌های تکمیلی دقت آزمایش خود را بالا ببرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر برخی عوامل میدانی شامل روشن بودن سیستم حفاظت کاتدی، وجود زائده، وجود آلودگی، اعوجاج و پوشش در ارزیابی خوردگی کف مخزن نفت به روش MFL در دو مخزن نفت بررسی شد. نتایج این ارزیابی به شرح زیر است:

- روشن بودن سیستم حفاظت کاتدی سبب ایجاد خطا در ارزیابی MFL شده و در نتیجه عیوب با ابعادی کمتر از مقدار واقعی خود تشخیص داده می‌شوند. در نتیجه عیوب با میزان تلفات کمتر از ۲۲ درصد قابل تشخیص نیست.
- وجود زائده‌های فلزی در کف مخزن باعث ایجاد خطا در تشخیص عیوب شده و در این شرایط، عیوب با ابعادی کمتر از ۲۰ درصد ضخامت ورق قابل شناسایی نیستند.
- وجود زائده و آلودگی در کف مخزن باعث شده است که خطای ایجاد شده در تشخیص عمق خوردگی بیشتر از خطای ایجاد شده در تشخیص طول و عرض عیب باشد.
- وجود آلودگی در کف مخزن باعث شد که عیوب با عمق خوردگی کمتر از ۱۸ درصد شناسایی نشده و یا عیوب با درصد کمتر گزارش شوند.
- ایجاد اعوجاج در ورق کف مخزن باعث شد که عیوب کاذب در ورق شناسایی شده و ابعاد عیوب واقعی نیز کاملاً با خطا گزارش شوند.
- افزایش ضخامت پوشش منجر به کاهش دقت شناسایی عیوب می‌گردد و عیوب تشخیص داده شده نیز در مقادیر کمتر از مقدار واقعی خود گزارش می‌شوند. در بازرسی ورق کالیبراسیون، در

- [۸] ا. موسی‌نیا، ا. یاری سعدی، ح. کهرتری، مقایسه روش‌های بازرسی خوردگی کف مخازن در شرایط خارج از سرویس، پانزدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، ۱۳۹۳
- [9] E. Ya. Lyublinski, Y. I. Kuznetsov, M. Schultz, Y. Vaks, Corrosion protection of tank product side bottoms, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2013, 2(2) 150–161.
- [10] F. LIU, S. DING, X. GUO, Magnetic Flux Leakage and Acoustic Emission Testing Technique for Atmospheric Storage tanks, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008.
- [11] API STD 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, 2003.
- [12] M. Klann, T. Beuker, Pipeline inspection with the high resolution EMAT ILI-tool, report on field experience, Proceedings of IPC 2006, 6th International Pipeline Conference, September 25-29, 2006, Calgary, Alberta, Canada.
- [13] Y. Shi, C. Zhang, R. Li, M. Cai, G. Jia, Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection, *Sensors*, 2015, 15, 31036–31055.
- [14] J. Wu, W. Wu, E. Li and Y. Kang, Magnetic flux leakage course of inner defects and its detectable depth, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(63) 2-11.
- [15] ASME STD Section V, article 16, Magnetic flux leakage (MFL) examination, 2019
- [16] ASTM A283, Standard specification for low and intermediate tensile strength carbon steel plates, 2015.
- [17] A. Gundogdu, S. Sahin, E.M.I effects of cathodic protection on electromagnetic flowmeters, *Sensors*, 2007, 7(1), 75-83.
- [18] B. Feng, J. Wu, H. Tu, J. Tang, Y. Kang, A review of magnetic flux leakage nondestructive testing, *Materials*, 2022, 15, 7362.
- [19] L. Xiao-meng, D. Hong-sheng, B. Shi-wu, Research on the stress-magnetism effect of ferromagnetic materials based on three-dimensional magnetic flux leakage testing, *NDT&E International*, 2014, 62, 50–54.
- [20] T. Zhang, G. Tian, X. Zuo, Pulsed magnetic flux leakage sensor systems and applications, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, China, 2011.