



بررسی تأثیر فاصله بین عیوب خوردگی مجاورهم بر روی سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی

تورج عزیززاده، میرسعید صفی زاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۱۴
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۴-۱۳
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۸-۲۹

کلمات کلیدی:

تست غیرمخرب
ناشتی شار مغناطیسی
خطوط لوله فرومغناطیسی

خلاصه: روش ناشی شار مغناطیسی، متداول‌ترین و مؤثرترین روش برای تشخیص خوردگی در خطوط لوله فرومغناطیسی است. عیوب خوردگی معمولاً به صورت خوشه‌ای رخ می‌دهند و بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند. با این حال به دلیل وجود تداخل در بین سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی، این عیوب با روش ناشی شار مغناطیسی متداول نمی‌توانند به طور دقیق اندازه‌گیری شوند. به منظور تفکیک عیوب تکی و بهبود عملکرد اندازه‌گیری، روش ناشی شار مغناطیسی سه محوره به کار برده می‌شود. در این پژوهش، مدل‌سازی اجزاء محدود استفاده می‌گردد تا توزیع مکانی مربوط به مؤلفه‌های ناشی شار مغناطیسی حاصل از عیوب خوردگی مجاورهم به دست آیند. هندسه عیب مورد بررسی شامل دو پیتینگ است که به حد کافی بهم نزدیک هستند و شار مغناطیسی در ناحیه بین این دو عیب بر هم تأثیر می‌گذارند. با تغییر فاصله بین دو پیتینگ، درجه‌های متفاوتی از همجواری در نظر گرفته می‌شوند. پس از شبیه‌سازی‌ها، تست‌های آزمایشگاهی ناشی شار مغناطیسی بر روی صفحات فولادی که شامل عیوب پیتینگ هستند، انجام می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ترکیب داده‌های محوری، شعاعی و محیطی ناشی شار مغناطیسی می‌تواند عیوب پیتینگ مجاورهم را تفکیک کرده و اندازه‌گیری نماید. نهایتاً، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و اعتبار سنجی می‌شوند.

۱- مقدمه

در حضور یک عیب تکی بررسی می‌گردد. با این حال در کاربردهای واقعی، چندین عیوب مجاورهم بسیار بیشتر از عیوب تکی رخ می‌دهند. خوردگی‌های پیتینگ مجاورهم بطور عمده در خطوط لوله گاز ایجاد می‌شوند [۵]. چنین عیوبی نرخ رشد خوردگی در جداره خط لوله را افزایش می‌دهند [۶-۸] و می‌توانند منجر به تخریب و فروپاشی لوله زودتر از عیوب پیتینگ تکی گردند [۹]. بنابراین، وقوع عیوب پیتینگ مجاورهم در سطح داخلی خطوط لوله، یک دغدغه و نگرانی اصلی برای صاحبان خط لوله گاز است. متأسفانه این نوع از پیتینگ‌ها به دلیل هندسه خود، نمی‌توانند با استفاده از روش ناشی شار مغناطیسی متداول به طور دقیق شناسایی و ارزیابی شوند [۱۰ و ۱۱].

بر طبق روش‌های بازرسی خطوط لوله، مؤلفه‌ای از روش ناشی شار مغناطیسی سه محوره که در راستای محور لوله است مؤلفه محوری ناشی شار مغناطیسی^۳ نامیده می‌شود. مؤلفه‌ای که در راستای عمود بر

روش ناشی شار مغناطیسی^۱ متداول‌ترین و مؤثرترین روش برای تشخیص و تعیین ابعاد عیوب خوردگی در خطوط لوله انتقال گاز است [۱ و ۲]. در این روش، جداره لوله تحت بازرسی تا نقطه اشباع مغناطیسی در جهت محوری مغناطیس می‌گردد. از آنجایی که تراوایی (پرمابلتته^۲) مغناطیسی لوله فرومغناطیس معمولاً بزرگتر از فضای آزاد اطراف است، ماده فرومغناطیسی دارای دانسیته شار مغناطیسی بیشتری از فضای آزاد است. بنابراین، وجود عیب خوردگی همانند یک ناحیه با مقاومت مغناطیسی بالا عمل کرده و سبب افزایش ناشی شار مغناطیسی می‌گردد. مقدار این شار ناشی بوسیله حسگرهای مغناطیسی (معمولاً حسگرهای اثر هال) اندازه‌گیری شده و برای تعیین اندازه و مکان عیب استفاده می‌گردد [۳ و ۴]

معمولاً در اکثر پژوهش‌ها، رفتار سیگنال ناشی شار مغناطیسی

1 Magnetic Flux Leakage (MFL)

2 Permeability

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: safizadeh@iust.ac.ir

3 Axial MFL component



۲- مدل‌سازی اجزاء محدود روش نشتی شار مغناطیسی سه محوره

برای توسعه و بهبود عملکردی روش بازرسی نشتی شار مغناطیسی، یک درک کامل و صحیح از مغناطیس‌کننده مورد استفاده در این روش ضروری است. دو روش برای مدل کردن روش نشتی شار مغناطیسی وجود دارد: (۱) روش اجزاء محدود هوانگ و لرد [۱۹] و (۲) روش دو قطبی مغناطیسی زاتسپین و شربینین [۲۰]. هر دوی این روش‌های محاسباتی بر اساس حل معادلات الکترومغناطیس ماکسول هستند [۲۱]. در این پژوهش، از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی روش نشتی شار مغناطیسی استفاده می‌شود. روش اجزاء محدود یک ابزار توانا برای تحلیل عملکرد سیستم مغناطیس‌کننده در روش نشتی شار مغناطیسی است. این روش شامل حل معادلات غیرخطی حاکم بر رفتار فیزیکی سیستم مغناطیس‌کننده است و مقادیر مؤلفه‌های نشتی شار مغناطیسی در هر نقطه‌ای از آن بدست آورده می‌شود. نرم افزار کامسول برای مدل‌سازی اجزاء محدود سه بعدی روش نشتی شار مغناطیسی استفاده می‌گردد. این پژوهش عمدتاً به بررسی سیگنال‌های نشتی شار مغناطیسی در حضور پیتینگ‌های مجاور هم می‌پردازد.

۲-۱- انجام شبیه‌سازی

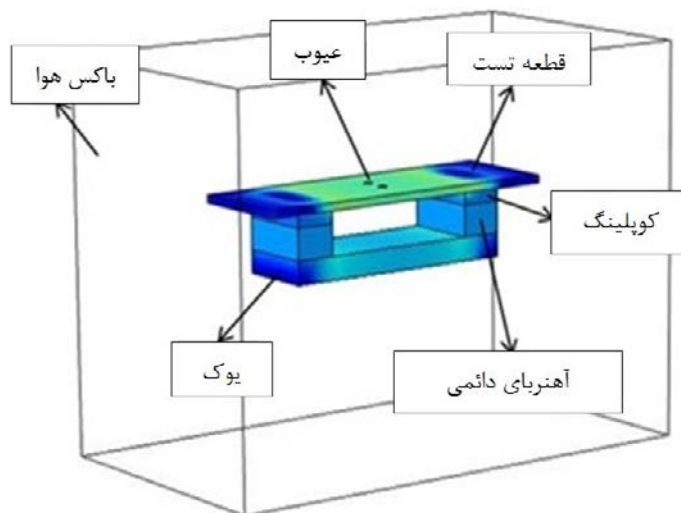
مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده شامل آهنرباها، کویلینگ‌ها و یوک است [۲۲]. شکل ۱ هندسه سه بعدی سیستم مغناطیس‌کننده و قطعه تحت تست را نشان می‌دهد. آهنرباهای دائمی برای ایجاد شار مغناطیسی تا نقطه اشباع مغناطیسی در قطعه تحت تست بکار می‌روند. کویلینگ‌های فرومغناطیسی، شار مغناطیسی را به داخل قطعه تست انتقال می‌دهند. یوک مغناطیسی مدار مغناطیسی ایجاد شده را کامل می‌کند. به منظور کاربرد مؤثرتر روش نشتی شار مغناطیسی در تشخیص عیوب، سطح مغناطیس‌کنندگی مناسبی باید به قطعه تحت تست اعمال شود [۲۳]. ابعاد، مواد و خواص مغناطیسی قطعات مختلف که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. ماده مربوط به قطعات یوک، کویلینگ‌ها و قطعه تحت تست، فولاد X52 است. رفتار میدان مغناطیسی در ماده فرومغناطیسی بوسیله منحنی مغناطیسی‌کنندگی تعریف می‌شود. منحنی مغناطیس‌کنندگی

سطح لوله است، مؤلفه شعاعی نشتی شار مغناطیسی^۱ نامیده می‌شود. نهایتاً مؤلفه‌ای که در راستای گرداگرد لوله است، مؤلفه محیطی نشتی شار مغناطیسی^۲ نامیده می‌شود. با این حال اکثر پژوهش‌های قبلی به بررسی مؤلفه‌های محوری و شعاعی نشتی شار مغناطیسی پرداخته‌اند. اهمیت مؤلفه محیطی نشتی شار مغناطیسی نادیده گرفته شده است. سی برت [۱۲] و لی [۱۳] اولین افرادی بودند که روش نشتی شار مغناطیسی سه محوره را بررسی کردند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که بکارگیری ویژگی‌ها و توزیع مکانی مربوط به هر سه مؤلفه نشتی شار مغناطیسی، می‌تواند دقت تخمین ابعاد عیوب را بهبود دهد [۱۴-۱۸]. اسکن سطحی با رزولوشن بالا، یک مفهوم نسبتاً جدید در زمینه روش نشتی شار مغناطیسی است. بر طبق اطلاعات نویسندگان این پژوهش، توزیع و ویژگی‌های مکانی مربوط به هر سه مؤلفه نشتی شار مغناطیسی در حضور عیوب پیتینگ مجاور هم و همچنین مرتبط کردن این ویژگی‌ها با ابعاد هندسی پیتینگ‌ها در پژوهش‌های قبلی بررسی نشده است.

نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از: الف- به دست آوردن سی-اسکن‌های نشتی شار مغناطیسی سه محوره در حالت اشباع مغناطیسی قطعه و در حضور عیوب پیتینگ مجاور هم با استفاده از هر دو روش تحلیل اجزاء محدود و روش آزمایشگاهی، ب- بررسی تأثیر فاصله بین پیتینگ‌های مجاور هم بر روی توزیع مکانی و تداخل سیگنال‌های نشتی شار مغناطیسی سه محوره، ج- بررسی توانایی مؤلفه‌های نشتی شار مغناطیسی سه محوره در تفکیک این عیوب و تخمین ابعاد آنها و نهایتاً د- بهبود دادن قابلیت تشخیص شکل و اندازه طول و عرض این عیوب با استفاده از ترکیب داده‌های حاصل از مؤلفه‌های محوری، محیطی و شعاعی نشتی شار مغناطیسی. به همین منظور، در ابتدا روش تحلیل اجزاء محدود استفاده می‌گردد تا توزیع فضایی مربوط به مؤلفه‌های نشتی شار مغناطیسی در حضور عیوب پیتینگ مجاور هم بررسی گردد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، بررسی‌های آزمایشگاهی روش نشتی شار مغناطیسی سه محوره انجام می‌گردند و از سیگنال‌های و سی-اسکن‌های بدست آمده برای تعیین ابعاد عیوب استفاده می‌گردد. نهایتاً نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند.

1 Radial MFL component

2 Circumferential MFL component



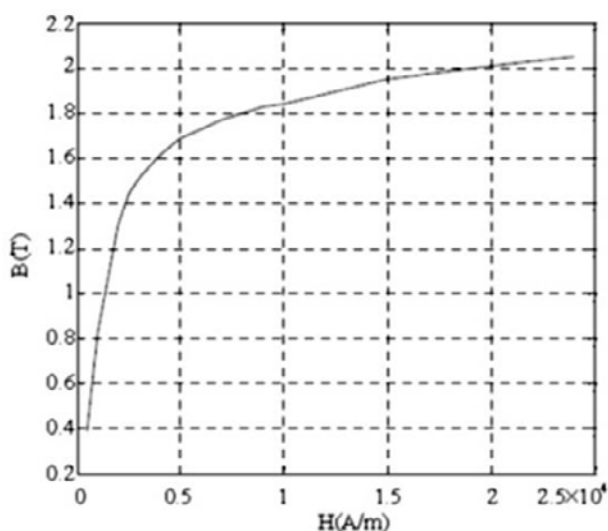
شکل ۱: مدل سه بعدی روش نشتی شار مغناطیسی

Fig. 1. Three-dimensional geometry of the magnetic flux leakage method

جدول ۱: ابعاد و معادلات حاکم بر قطعات

Table 1. Sizes and equations of the MFL parts

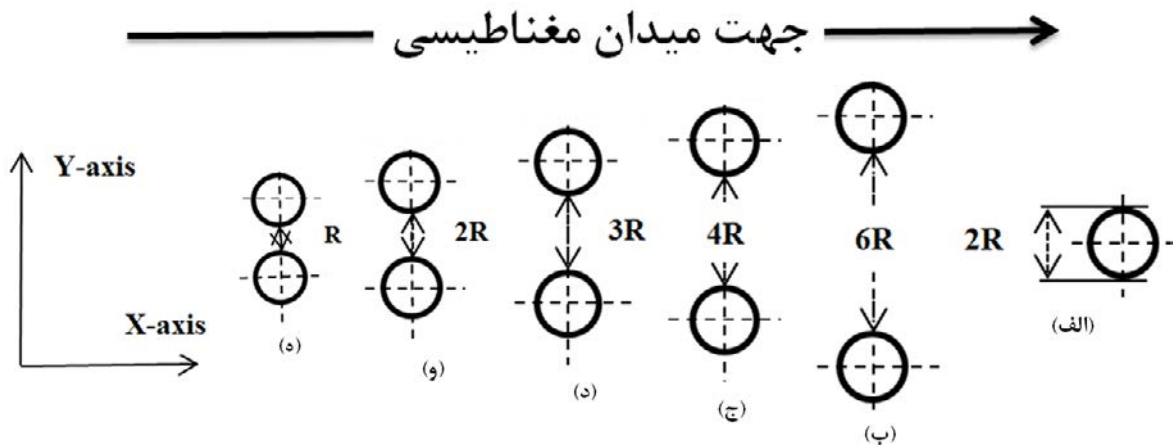
معادله حاکم [۲۱ و ۲۴]	ارتفاع، میلی متر	عرض، میلی متر	طول، میلی متر	ماده	قطعه
$ H = f(B)$	۱۰	۱۴۰	۴۰۰	فولاد X52	قطعه تحت تست
$ H = f(B)$	۲۰	۱۰۰	۵۰	فولاد X52	کوپلینگ
$B = \mu_0 H + \mu_0 M$	۴۰	۱۰۰	۵۰	Nd-Fe-B	آهنربا
$ H = f(B)$	۳۰	۱۰۰	۳۰۰	فولاد X52	یوک
$B = \mu_0 \mu_r H$	۵۰۰	۳۶۰	۶۴۰	هوا	باکس هوا



شکل ۲: منحنی مغناطیس‌کنندگی فولاد X52

Fig. 2. Magnetization curve of steel X52

فولاد X52 در شکل ۲ نشان داده شده است. آهنرباهای دائمی از ماده Nd-Fe-B ساخته شده اند و دارای خواص مغناطیسی خطی و پایدار هستند. در این مدل‌سازی، سیستم مغناطیس‌کننده و قطعه تست با هوا احاطه شده اند. تراوایی نسبی هوا یک در نظر گرفته می‌شود. عیوب تحت بررسی شامل یک پیتینگ تکی و مجموعه‌ای از پیتینگ‌های مجاور هم می‌باشند. این عیوب در صفحات فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر شبیه‌سازی می‌شوند. عیوب در ناحیه مرکزی قطعه تحت تست قرار دارند. قطر پیتینگ‌ها ۱۰ میلی‌متر و عمق آنها ۸۰%t و ۳۰%t می‌باشد (t: ضخامت صفحه فلزی). عیوب پیتینگ مجاور هم شامل دو پیتینگ است که به حد کافی بهم نزدیک هستند، به طوری که سیگنال‌های نشتی شار مغناطیسی در ناحیه بین دو پیتینگ با هم تداخل دارند. با تغییر دادن فاصله بین دو پیتینگ، انواع



شکل ۳. نمایش شماتیک عیب پیتینگ تکی و عیوب پیتینگ مجاور هم

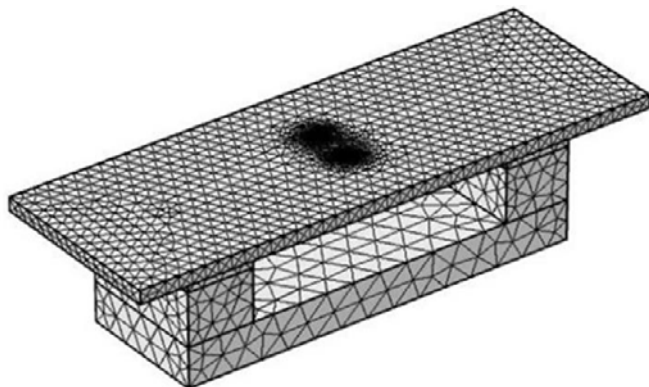
Fig. 3. Schematic illustration of the individual pit and nearby pits

ایجاد شده در قطعه تحت تست را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل، نحوه حرکت خطوط شار مغناطیسی در داخل قطعات سیستم مغناطیس‌کننده و در داخل قطعه تحت تست نشان داده شده است. با عملیات پس پردازش مناسب نتایج مدل اجزاء محدود، مقادیر مؤلفه‌های ناشی شار مغناطیسی در ناحیه عیب بدست آورده می‌شوند.

جدول ۲. انواع راستای قرارگیری پیتینگ‌ها نسبت به جهت میدان مغناطیسی

Table 2. Orientation of the pits with respect to the magnetic field direction

راستای عمودی	راستای افقی	راستای قطری



شکل ۴: هندسه شبکه‌بندی شده

Fig. 4. Meshed geometry

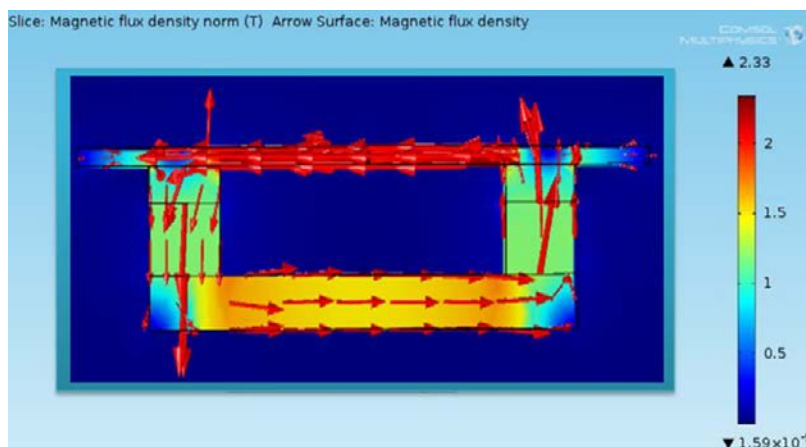
مختلفی از دو پیتینگ مجاور هم در نظر گرفته می‌شوند.

شکل ۳ به طور شماتیک عیب پیتینگ تکی و پیتینگ‌های مجاور هم با فواصل لبه تا لبه ۳۰، ۲۰، ۱۵، ۱۰ و ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. در حالت کلی، راستای قرارگیری پیتینگ‌های مجاور هم نسبت به جهت میدان مغناطیسی اعمالی شامل سه نوع افقی، عمودی و قطری است که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. سیگنال ناشی شار مغناطیسی معمولاً در جهت محیطی (Y-axis) گسترده و پخش می‌شود که باعث می‌شود میدان شار ناشی بیشتر از خود عیب به صورت بیضوی شود. این اثر به نام بیضوی شدن^۱ معروف است. بنابراین زمانی که راستای قرارگیری پیتینگ‌ها نسبت به میدان مغناطیسی حالت عمودی دارد، سیگنال‌های حاصل از دو عیب پیتینگ با هم تداخل بیشتری دارند و این پدیده سبب می‌شود که تعیین دقیق عرض این عیوب دشوار گردد. در این پژوهش، عیوب پیتینگ مجاور هم در راستای عمود بر میدان مغناطیسی قرار دارند.

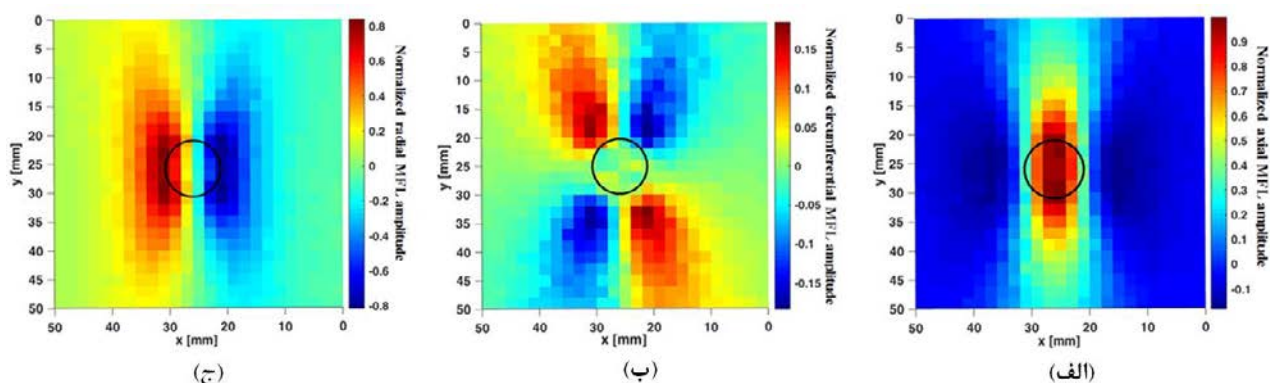
در مرحله بعدی شبیه‌سازی، شبکه و نوع آن تعیین می‌گردد. شکل ۴ هندسه سه بعدی و شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، شبکه با المان فری تتراهدرال^۲ استفاده شد. برای دستیابی به نتایج دقیق، شبکه‌ها در ناحیه عیوب ریزتر انتخاب شدند. انتخاب تعداد شبکه مناسب و انتخاب شرایط مرزی مناسب دو پارامتر ضروری برای دستیابی به نتایج عددی دقیق هستند.

پس از تعریف هندسه، مواد، شرایط مرزی و شبکه، مدل اجزاء محدود سه بعدی حل می‌شود. شکل ۵ سطح اشباع مغناطیسی

- 1 Blooming effect
- 2 Free tetrahedral



شکل ۵: رفتار شار مغناطیسی در مغناطیس کننده و قطعه تحت تست
 Fig. 5. Magnetic flux lines in the magnetizer assembly and the specimen



شکل ۶: سی-اسکن های ناشتی شار مغناطیسی برای پیتینگ تکی با عمق ۸ میلی متر: الف-مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشتی شار مغناطیسی

Fig. 6. MFL C-scans for the individual pit with the depth of 8mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal

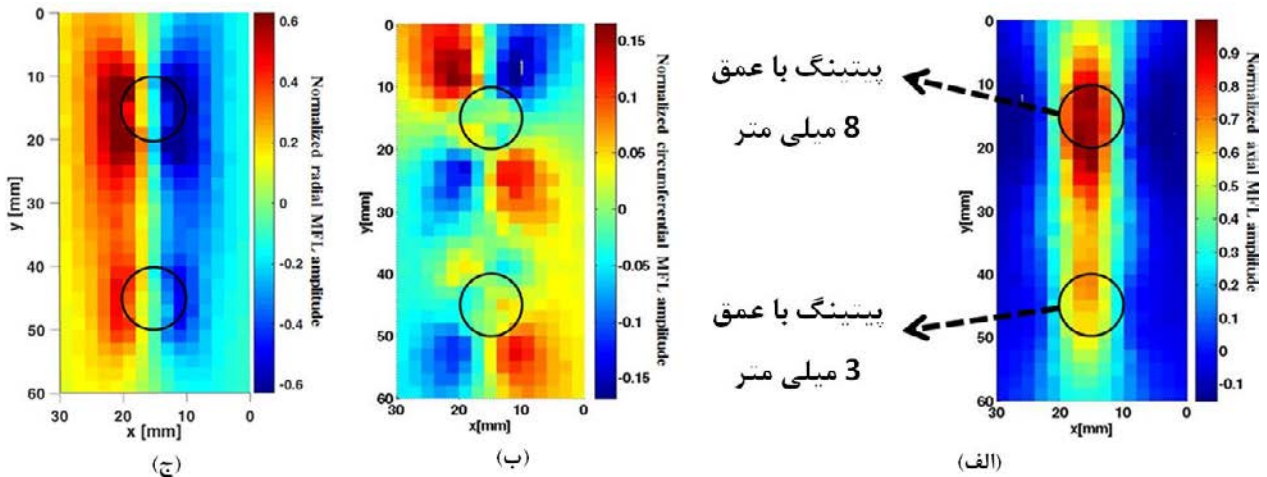
۲-۲- نتایج شبیه سازی و بحث

ناشتی شار مغناطیسی شامل چهار پیک (دو پیک مثبت و دو پیک منفی) است. با توجه به شکل ۶ (الف) تا (ج)، کاملاً مشهود است که ناشتی شار مغناطیسی در جهت عرض عیب گسترده و پخش می شود. این اثر به نام بیضوی شدن معروف است و برای عیوبی با عمق بیشتر مقدار گستردگی و پخش ناشتی شار در جهت عرض عیب بیشتر است [۲۵].

شکل ۷ (الف) تا (ج) سی-اسکن های مربوط به سه مؤلفه ناشتی شار مغناطیسی برای پیتینگ های مجاور هم با فاصله لبه تا لبه ۲۰ میلی متر را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۷ (الف) تا (ج) مشاهده می شود، سیگنال های ناشتی شار مغناطیسی حاصل از دو پیتینگ با هم تداخل دارند. با این حال، ویژگی های مکانی مؤلفه های محوری و شعاعی ناشتی شار مغناطیسی در ترکیب با مؤلفه محیطی می توانند برای تعیین ابعاد این عیوب استفاده شوند.

نرم افزار کامسول امکان نمایش مقادیر مؤلفه های ناشتی شار مغناطیسی در ناحیه اسکن بصورت تصویر سی-اسکن را میسر می سازد. شکل ۶ (الف) تا (ج) تصاویر سی-اسکن مربوط به مؤلفه های محوری، محیطی و شعاعی ناشتی شار مغناطیسی برای عیب پیتینگ تکی را نشان می دهد. مکان واقعی عیب با یک دایره در تصاویر سی-اسکن نشان داده شده است. فاصله برخیزش حسگر از سطح قطعه ۳ میلی متر در نظر گرفته می شود. سیگنال های ناشتی شار مغناطیسی نسبت به مقدار بیشینه نرمالیزه شده اند.

همانطور که در شکل ۶ (الف) تا (ج) مشاهده می شود، مؤلفه محوری ناشتی شار مغناطیسی دارای شکل موج تک قطبی است. مؤلفه شعاعی ناشتی شار مغناطیسی به صورت شکل موج دو قطبی است و شامل یک پیک مثبت و یک پیک منفی است. مؤلفه محیطی



شکل ۷: سی-اسکن‌های ناشی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۲۰ میلی‌متر: الف-مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 7. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 20mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal

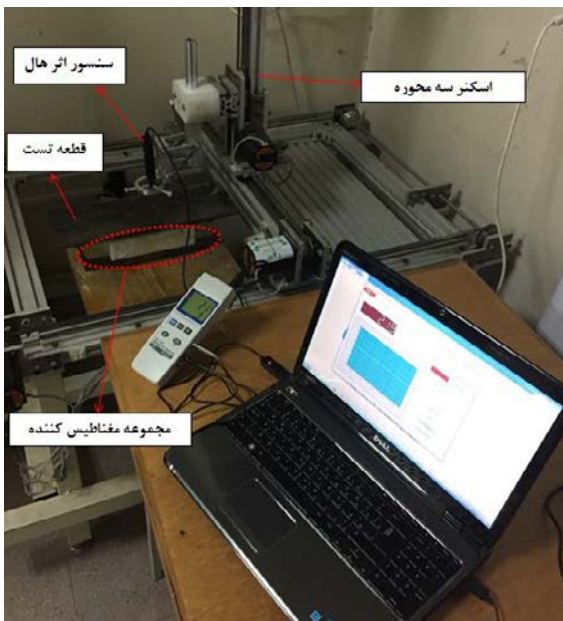
به اسکنر منتقل شد. ناحیه اسکن به صورت یک ناحیه مستطیلی تعریف شد که عیوب پیتینگ در ناحیه مرکزی مستطیل قرار داشتند و از هر لبه عیب یک سانتی‌متر فاصله در نظر گرفته شد. گام حرکتی اسکنر در هر دو جهت طولی و عرضی، ۲ میلی‌متر تنظیم شد. انتخاب این اندازه‌ها، بر طبق اندازه سطح مقطع حساس حسگر اثر هال صورت گرفت. اندازه سطح مقطع حساس مربوط به حسگر اثر هال مورد استفاده، $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ بود.

۳- بررسی آزمایشگاهی روش ناشی شار مغناطیسی سه محوره

پس از تحلیل اجزاء محدود روش ناشی شار مغناطیسی، مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده ساخته شد و برای بازرسی قطعات فرومغناطیسی دارای عیوب پیتینگ مجاور هم استفاده گردید. به منظور شبیه‌سازی فرآیند خوردگی واقعی، تمامی عیوب به روش ماشین‌کاری الکتروشیمیایی ایجاد شدند. قابل ذکر است که ماشین‌کاری مکانیکی سبب ایجاد تنش‌های پسماند در اطراف عیوب می‌شود و این پدیده می‌تواند سبب تغییر در توزیع ناشی شار مغناطیسی گردد. اگرچه تأثیر تنش بر روی خواص مغناطیسی ماده با قطعیت نمی‌تواند تعیین شود، مؤثرترین روش برای کاهش دادن اثرات تنش بر روی سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی اشباع مغناطیسی قطعه است. در حالت اشباع مغناطیسی، تراوایی مغناطیسی فولاد کاهش یافته و به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود. همچنین، در حالت اشباع مغناطیسی، میزان تغییرات و ناهمگنی در تراوایی مغناطیسی فولاد کاهش یافته و مقدار آن یکنواخت می‌گردد [۲۳ و ۲۸-۲۶].

۳-۱- مجموعه آزمایشگاهی

شکل ۸ سیستم آزمایشگاهی برای انجام بازرسی ناشی شار مغناطیسی را نشان می‌دهد. سیستم بازرسی شامل مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده، اسکنر سه محوره، سیستم تحویل داده‌ها و سایر قطعات مرتبط می‌باشد. برای کنترل حرکت حسگر اثر هال از اسکنر استفاده شد. بوسیله پورت موازی، دستورات حرکتی توسط کامپیوتر



شکل ۸: سیستم آزمایشگاهی روش ناشی شار مغناطیسی
Fig. 8. Experimental system of the magnetic flux leakage method

سطح ماده و عمود بر میدان مغناطیسی اعمالی است. همچنین، مؤلفه شعاعی عمود بر سطح ماده است. دواپر در شکل‌های ۹ (الف) تا (ج) و ۱۳ (الف) تا (ج) مکان واقعی پیتینگ‌ها را نشان می‌دهند.

سیگنال‌های آزمایشگاهی نشستی شار مغناطیسی، رفتار و روند تغییر مشابه با سیگنال‌های بدست آمده از شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. همچنین در حالت کلی، تطابق مکانی خوبی بین داده‌های نشستی شار مغناطیسی اندازه‌گیری شده و موقعیت پیتینگ‌ها بر روی قطعه تحت تست وجود دارد.

نتایج نشان می‌دهند که فاصله بین پیتینگ‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی دامنه و توزیع سیگنال‌های نشستی شار مغناطیسی می‌گذارد. با توجه به شکل ۹ (الف) تا (ج)، کاملاً مشهود است که سیگنال‌های دو پیتینگ با فاصله جدایش ۳۰ میلی‌متر تداخل کمی با هم دارند. همانطور که در شکل‌های ۱۱ (الف)، (ب)، ۱۳ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، سیگنال‌های پیتینگ‌ها با فواصل جدایش ۱۵، ۱۰ و ۵ میلی‌متر تداخل شدیدی با هم دارند. در این موارد، سیگنال‌های محوری و شعاعی نشستی شار مغناطیسی به وضوح وجود عیب خوردگی را تشخیص می‌دهند؛ اما نمی‌توانند دو عیب پیتینگ را از هم متمایز نشان دهند. با استفاده از مؤلفه‌های محوری و شعاعی، یک تحلیلگر داده ممکن است به اشتباه دو عیب پیتینگ مجاور هم را به عنوان یک پیتینگ عریض تفسیر کند. در حالی که اگر علاوه بر مؤلفه‌های محوری و شعاعی، مؤلفه محیطی نشستی شار مغناطیسی نیز در تفسیر عیوب استفاده شود، اطلاعات مفیدی درباره ابعاد عیوب بدست می‌آید. همانطوری که در شکل‌های ۹ (ب) تا ۱۳ (ب) مشاهده می‌شود، شکل واقعی دو پیتینگ مجاور هم با استفاده از مؤلفه محیطی نشستی شار مغناطیسی بهتر شناسایی می‌شود. با این حال، مؤلفه محیطی نشستی شار مغناطیسی در روش نشستی شار مغناطیسی متداول نادیده گرفته شده بود.

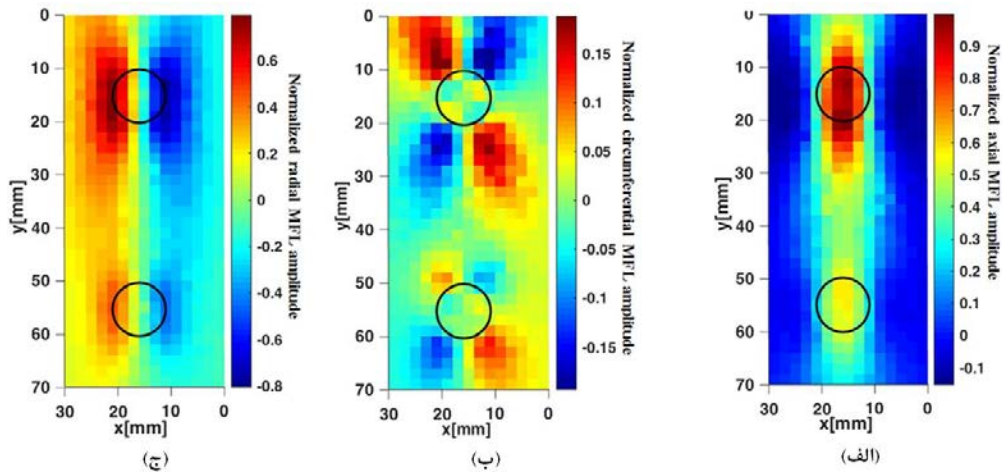
در این پژوهش، تفکیک و اندازه‌گیری پیتینگ‌های مجاور هم با استفاده از ترکیب سیگنال‌های محوری، محیطی و شعاعی نشستی شار مغناطیسی انجام می‌شود. معیارهای زیر برای تخمین طول پیتینگ‌های مجاور هم با استفاده از سیگنال‌های نشستی شار مغناطیسی استفاده می‌گردد:

- نقاط تلاقی مؤلفه محوری و محور x برای تخمین طول عیب استفاده می‌گردد.

۵ نمونه آزمایشگاهی، برای بررسی‌های آزمایشگاهی استفاده شدند. جنس قطعات تست از فولاد X52 بود. طول، عرض و ضخامت این قطعات تست به ترتیب ۴۰۰ میلی‌متر، ۱۴۰ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر بود. پیتینگ‌های مجاور هم با فواصل جدایش متفاوت (مطابق با شکل ۳) در ناحیه مرکزی این قطعات ایجاد شدند. قطر پیتینگ‌های مجاور هم ۱۰ میلی‌متر و عمق آنها $t \cdot 30\%$ (۳ میلی‌متر) و $t \cdot 80\%$ (۸ میلی‌متر) بود. در هر موقعیت $x-y$ بر روی ناحیه اسکن، داده‌های نشستی شار مغناطیسی با دقت بدست آمده و در کامپیوتر برای پردازش‌های بعدی ذخیره شدند. قابل ذکر است که در هر نقطه از ناحیه اسکن، ابتدا داده‌های مؤلفه محوری (B_x) مربوط به دانسیته نشستی شار مغناطیسی (B) بر حسب گوس اندازه‌گیری شدند. سپس با چرخاندن حسگر اثر هال در راستاهای y و z ، به ترتیب مؤلفه‌های محیطی (B_y) و مؤلفه‌های شعاعی (B_z) مربوط به دانسیته نشستی شار مغناطیسی (B) بر حسب گوس اندازه‌گیری شدند. اسکن‌ها هم به صورت اسکن خطی (اسکن در امتداد یک خط) و هم به صورت اسکن سطحی (اسکن در یک سطح دو بعدی) برای هر گروه از پیتینگ‌های مجاور هم انجام شدند. از آنجایی که حرکت حسگر بوسیله اسکنر انجام شد، فاصله برخیزش حسگر از سطح قطعه در حین انجام اسکن‌ها ثابت بود.

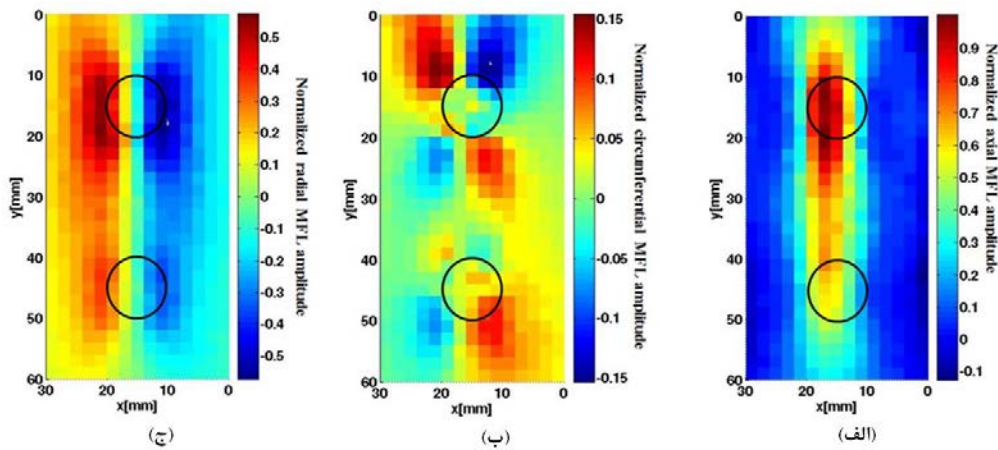
۲-۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

برای آشکارسازی جزئیات ناحیه عیب، داده‌های اندازه‌گیری نشستی شار مغناطیسی پردازش شده و سیگنال‌های پس زمینه از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده کم شدند. سپس برای دستیابی به تباین (کنتراست) بیشینه، دامنه سیگنال‌های نشستی شار مغناطیسی نسبت به مقدار بیشینه نرمالیزه شدند. به منظور مشاهده بهتر نتایج بازرسی، داده‌های نشستی شار مغناطیسی به صورت تصاویر سی-اسکن و به کمک نرم‌افزار متلب ترسیم شدند. این سی-اسکن‌ها توزیع مکانی سیگنال‌های نشستی شار مغناطیسی را در ناحیه عیوب و اطراف آن نشان می‌دهند. شکل‌های ۹ (الف) تا (ج) و ۱۳ (الف) تا (ج) تصاویر سی-اسکن مربوط به مؤلفه‌های محوری، محیطی و شعاعی نشستی شار مغناطیسی برای عیوب پیتینگ با فواصل جدایش مختلف را نشان می‌دهند. مؤلفه محوری نشستی شار مغناطیسی موازی با سطح ماده و در راستای میدان مغناطیسی اعمالی است. مؤلفه محیطی موازی با



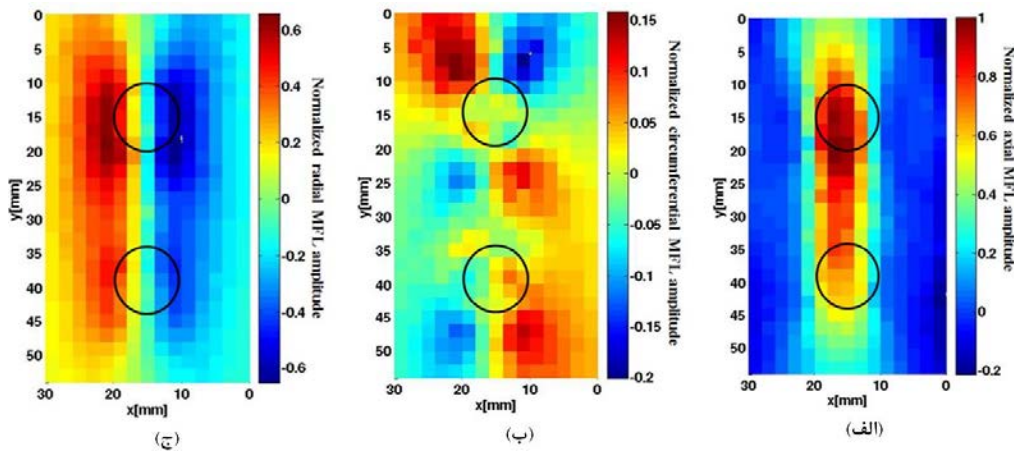
شکل ۹: سی-اسکن‌های ناشی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۳۰ میلی متر: الف-مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 9. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 30mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal



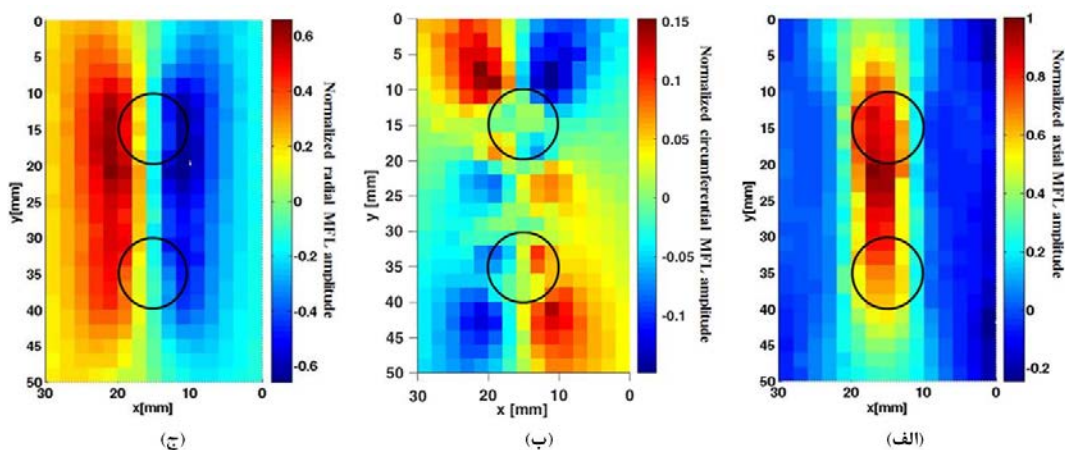
شکل ۱۰: سی-اسکن‌های ناشی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۲۰ میلی متر: الف-مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 10. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 20mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal



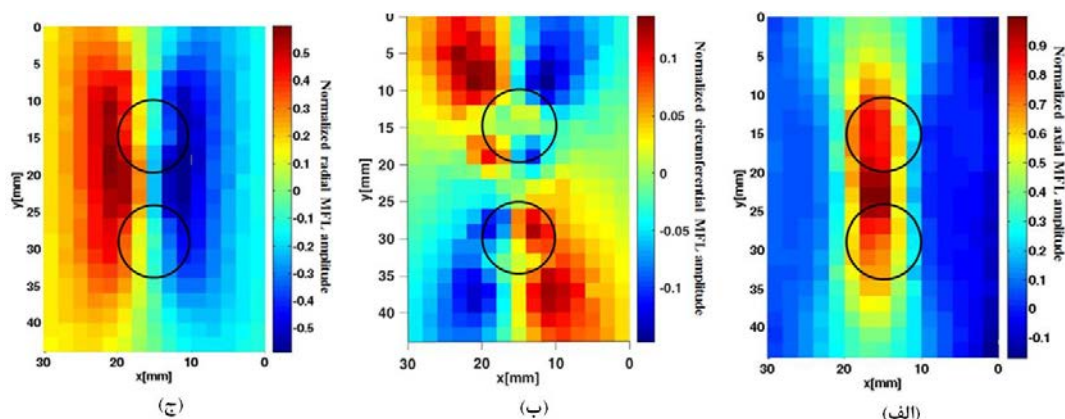
شکل ۱۱: سی-اسکن‌های ناشی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۱۵ میلی متر: الف-مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 11. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 15mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal



شکل ۱۲: سی-اسکن‌های ناشتی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۱۰ میلی متر: الف- مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشتی شار مغناطیسی

Fig. 12. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 10mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal



شکل ۱۳: سی-اسکن‌های ناشتی شار مغناطیسی برای پیتینگ‌های مجاور هم با فاصله جدایش ۵ میلی متر: الف- مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشتی شار مغناطیسی

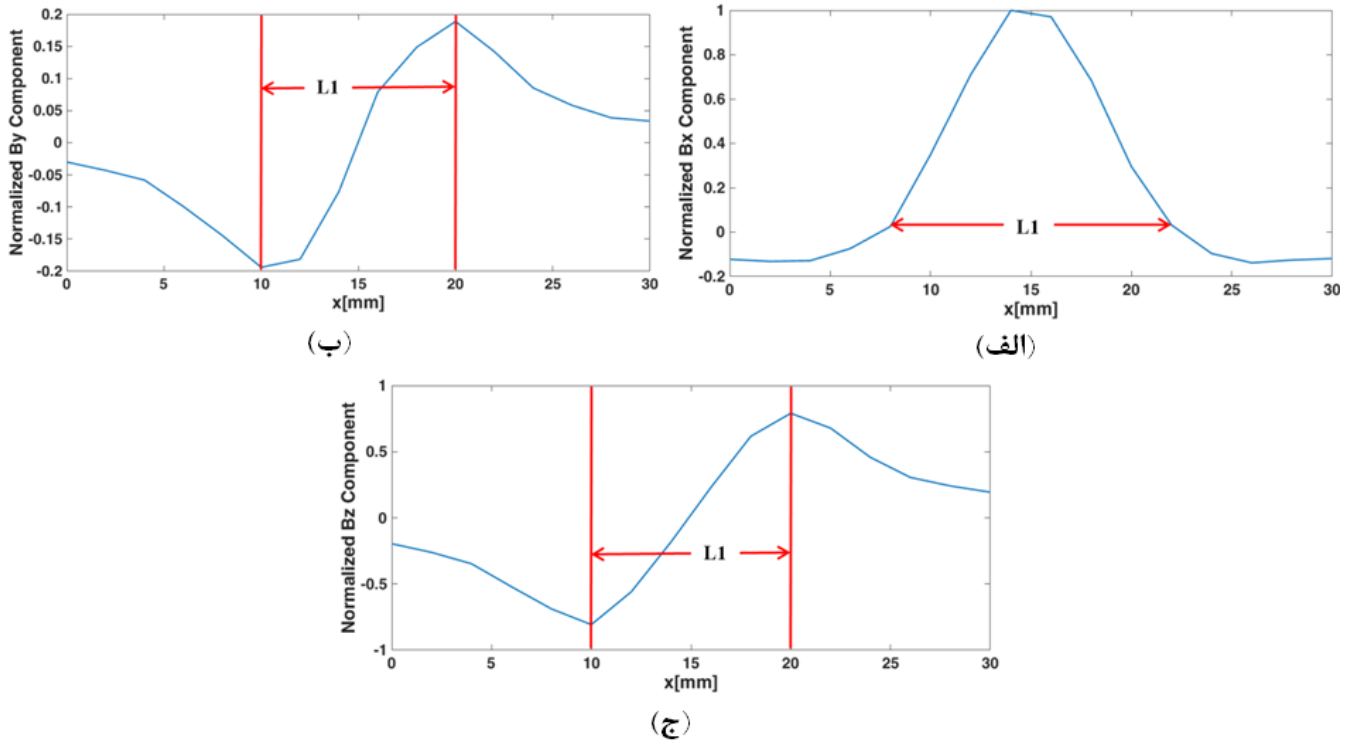
Fig. 13. MFL C-scans for the nearby pits with the spacing of 5mm: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal

مؤلفه شعاعی مزیت نسبی نسبت به مؤلفه محیطی دارد. زمانیکه از مؤلفه محوری برای تخمین طول عیوب استفاده می‌شود، خطاهای تخمین طول بین ۴ و ۷ میلی‌متر هستند. همانطور که در شکل‌های ۱۴ (ب) و ۱۴ (ج) نشان داده شده است، مؤلفه‌های محیطی و شعاعی ناشتی شار مغناطیسی قطبش (پلاریته) معکوس در لبه‌های عیوب در جهت محوری (جهت x) نشان می‌دهند و در نتیجه اندازه‌گیری مستقیم و دقیق از طول عیوب را بدست می‌دهند. معیارهای زیر برای تخمین عرض پیتینگ‌های مجاور هم با استفاده از سیگنال‌های ناشتی شار مغناطیسی بکار برده می‌شوند:

- عرض سیگنال در ۸۰٪ دامنه پیک مؤلفه محوری برای تخمین عرض عیب استفاده می‌گردد.

- فاصله بین دو پیک مثبت و منفی مؤلفه شعاعی در جهت محوری برای تخمین طول عیب استفاده می‌گردد.
 - فاصله بین دو پیک مثبت و منفی مؤلفه محیطی در جهت محوری برای تخمین طول عیب استفاده می‌گردد.
- شکل ۱۴ (الف) تا (ج)، سیگنال‌های ناشتی شار مغناطیسی محوری، محیطی و شعاعی مربوط به پیتینگ با عمق ۸ میلی متر را نشان می‌دهد. این شکل به طور شماتیک معیارها برای تخمین طول پیتینگ‌ها با استفاده از سیگنال‌های ناشتی شار مغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۳ نتایج تخمین طول برای پیتینگ‌های مجاور هم را نشان می‌دهد. همانطوری که جدول نشان می‌دهد، هر دو مؤلفه محیطی و شعاعی ناشتی شار مغناطیسی نتایج دقیقی بدست می‌دهند، البته



شکل ۱۴: تخمین طول پیتینگ‌ها با استفاده از مؤلفه‌های ناشی شار مغناطیسی: الف- مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 14. Length sizing of the nearby pits using the tri-axial MFL signals: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal

جدول ۳: نتایج تخمین طول پیتینگ‌های مجاور هم

Table 3. Length sizing results of the nearby pits

تخمین طول با مؤلفه شعاعی (میلی‌متر)	تخمین طول با مؤلفه محیطی (میلی‌متر)	تخمین طول با مؤلفه محوری (میلی‌متر)	طول واقعی (میلی‌متر)	عمق پیتینگ (میلی‌متر)	فاصله جدايش (میلی‌متر)
۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۸	۳۰
۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۳	
۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۸	۲۰
۱۰	۱۰	۱۶	۱۰	۳	
۱۰	۱۰	۱۵	۱۰	۸	۱۵
۱۰	۱۰	۱۷	۱۰	۳	
۱۰	۱۲	۱۵	۱۰	۸	۱۰
۱۰	۱۰	۱۶	۱۰	۳	
۱۰	۱۰	۱۴	۱۰	۸	۵
۱۰	۱۰	۱۶	۱۰	۳	

روی دامنه سیگنال ناشی شار مغناطیسی دارد (هرچه عیب عریض تر باشد، دامنه سیگنال ناشی شار مغناطیسی بزرگتر است)، با تخمین نادرست عرض در فرآیند تحلیل داده‌ها عمق نهایی عیب کمتر از مقدار واقعی تخمین زده خواهد شد [۳۲-۲۹]. این پدیده، منجر به عدم شناسایی تهدید بالقوه برای سلامتی خط لوله می‌گردد. با این حال، مؤلفه محیطی ناشی شار مغناطیسی در ترکیب با مؤلفه‌های محوری و شعاعی می‌تواند برای تفکیک و اندازه‌گیری ابعاد عیوب پیتینگ مجاور هم (به ویژه اندازه‌گیری عرض عیوب) بکار رود.

۳-۳- مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، نتایج مدل اجزاء محدود با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. شکل ۱۶ (الف) و (ب) به ترتیب سیگنال‌های محوری و محیطی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای پیتینگ‌های مجاور هم را نشان می‌دهد. فاصله جدایش بین پیتینگ‌ها ۲۰ میلی‌متر است.

همانطوری که در شکل ۱۶ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. مقایسه عددی نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. خطای نسبی حدود ۷٪ است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی عملکرد روش ناشی شار مغناطیسی سه محوره در تشخیص و تعیین ابعاد عیوب پیتینگ مجاور هم پرداخته است. عیوب پیتینگ در راستای عمود بر میدان مغناطیسی اعمالی قرار داشتند. در انجام این کار پژوهشی، انواع مختلفی از پیتینگ‌های مجاور هم بر طبق فواصل جدایش بین پیتینگ‌ها در نظر گرفته شدند. مدل اجزاء محدود سه بعدی مربوط به روش ناشی شار مغناطیسی ایجاد شد و بر مبنای آن توزیع مکانی مؤلفه‌های محوری، محیطی و شعاعی ناشی شار مغناطیسی برای عیوب معین محاسبه شدند.

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، بررسی‌های آزمایشگاهی مربوط به روش ناشی شار مغناطیسی سه محوره انجام شدند و از سیگنال‌ها و تصاویر سی-اسکن بدست آمده برای تعیین ابعاد عیوب استفاده گردید. مشاهده گردید که به محض کاهش فاصله بین پیتینگ‌ها، مؤلفه‌های محوری و شعاعی ناشی شار مغناطیسی حاصل از عیب‌ها

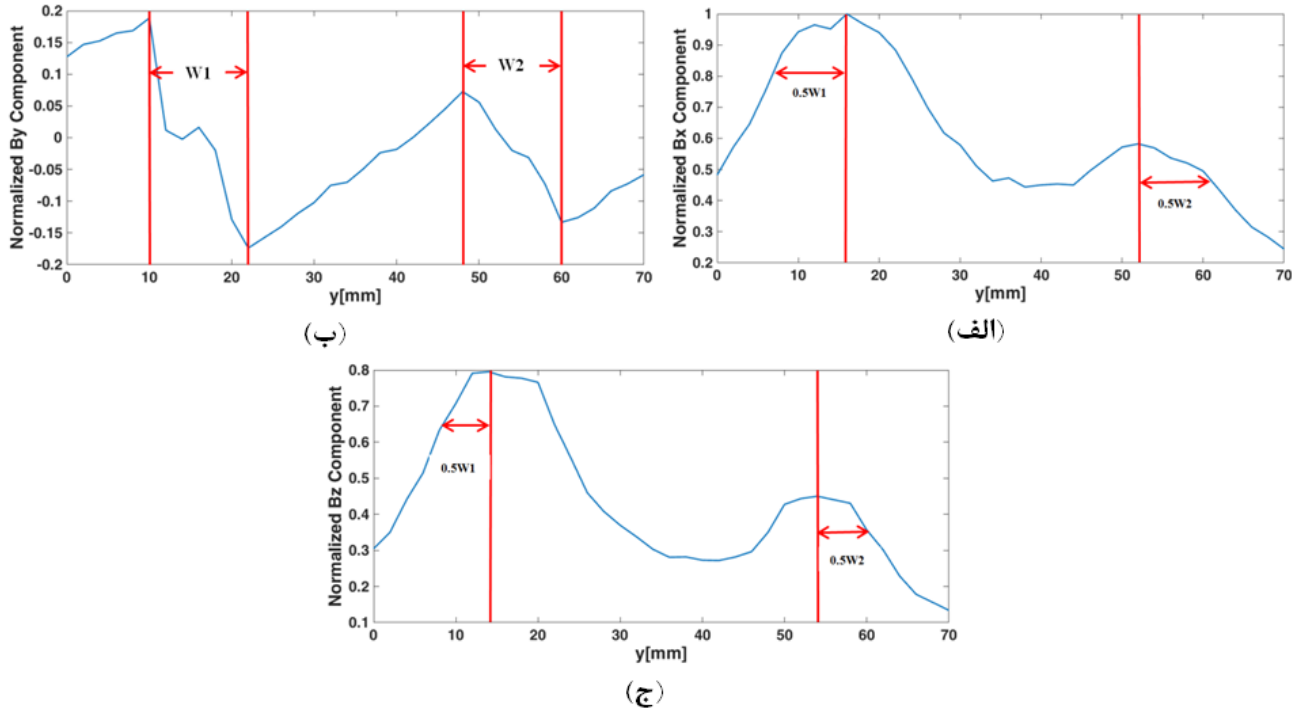
• عرض سیگنال در ۸۰٪ دامنه پیک مؤلفه شعاعی برای تخمین عرض عیب استفاده می‌گردد.

• فاصله بین پیک‌های مثبت و منفی مؤلفه محیطی در جهت عرضی برای تخمین عرض عیب استفاده می‌گردد.

شکل ۱۵ (الف) تا (ج) سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی محوری، محیطی و شعاعی برای عیوب پیتینگ مجاور هم با فاصله لبه تا لبه ۳۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. این شکل به طور شماتیک معیارها برای تخمین عرض پیتینگ‌ها با استفاده از سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۴، نتایج تخمین عرض برای پیتینگ‌های مجاور هم را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مؤلفه محیطی ناشی شار مغناطیسی، مناسب‌ترین مؤلفه برای تخمین عرض پیتینگ‌ها است. با استفاده از مؤلفه محیطی، خطای تخمین عرض پیتینگ‌ها بین ۲ تا ۶ میلی‌متر است. همانطوری که در شکل ۱۵ (ب) نشان داده شده است، مؤلفه محیطی ناشی شار مغناطیسی قطبش معکوس در لبه‌های عیب در جهت عرضی (جهت y) را نشان می‌دهد. بنابراین، فاصله بین پیک‌های مثبت و منفی در جهت عرضی می‌تواند برای تخمین عرض پیتینگ‌ها استفاده گردد. به دلیل تداخل بین سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی، دقت تخمین عرض پیتینگ‌ها با کاهش فاصله بین پیتینگ‌ها کاهش می‌یابد. مؤلفه محوری ناشی شار مغناطیسی نمی‌تواند عرض پیتینگ‌ها با فاصله جدایش کمتر از ۲۰ میلی‌متر را تخمین بزند. همچنین، مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی نمی‌تواند عرض پیتینگ‌ها با فاصله جدایش کمتر از ۱۵ میلی‌متر را تخمین بزند.

از آنجاییکه ناشی‌های شار مغناطیسی در جهت عرضی گسترده و پخش می‌شوند، تخمین عرض پیتینگ‌های مجاور هم که در راستای عمود بر میدان مغناطیسی قرار دارند دشوار است. در روش ناشی شار مغناطیسی و به ویژه در مورد مؤلفه‌های محوری و شعاعی، سیگنال‌های عیوب نزدیک به هم با هم تداخل کرده و ترکیب می‌شوند. زمانی که فاصله بین پیتینگ‌ها کوچک‌تر گردد، تداخل بین سیگنال‌های ناشی شار مغناطیسی شدیدتر است. بنابراین با استفاده از مؤلفه‌های محوری و شعاعی، سیگنال ناشی شار مغناطیسی حاصل ممکن است در عوض دو پیتینگ تکی به اشتباه به عنوان یک پیتینگ عریض تفسیر گردد. از آنجایی که عرض عیوب تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر



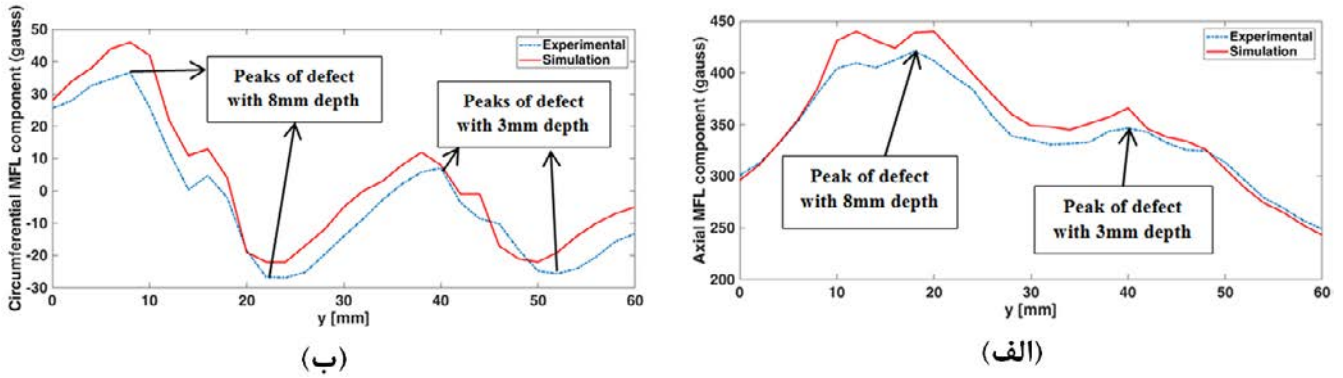
شکل ۱۵: تخمین عرض پیتینگ‌ها با استفاده از مؤلفه‌های ناشی شار مغناطیسی: الف- مؤلفه محوری، ب- مؤلفه محیطی و ج- مؤلفه شعاعی ناشی شار مغناطیسی

Fig. 15. Width sizing of the nearby pits using the tri-axial MFL signals: (a) axial signal, (b) tangential signal, and (c) radial signal

جدول ۴: نتایج تخمین عرض پیتینگ‌های مجاور هم

Table 4. Width sizing results of the nearby pits

تخمین عرض با مؤلفه شعاعی (میلی‌متر)	تخمین عرض با مؤلفه محیطی (میلی‌متر)	تخمین عرض با مؤلفه محوری (میلی‌متر)	عرض واقعی (میلی‌متر)	عمق پیتینگ (میلی‌متر)	فاصله جدایش (میلی‌متر)
۱۴	۱۲	۱۶	۱۰	۸	۳۰
۱۴	۱۲	۱۶	۱۰	۳	
۱۷	۱۳	۱۸	۱۰	۸	۲۰
۱۶	۱۲	۱۸	۱۰	۳	
۱۶	۱۴	-	۱۰	۸	۱۵
۱۶	۱۲	-	۱۰	۳	
-	۱۵	-	۱۰	۸	۱۰
-	۱۲	-	۱۰	۳	
-	۱۶	-	۱۰	۸	۵
-	۸	-	۱۰	۳	



شکل ۱۶: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی: الف- مؤلفه محوری و ب- مؤلفه محیطی نشتی شار مغناطیسی
 Fig. 16. Comparison of the FEM and experimental results: (a) axial signal and (b) tangential signal

جدول ۵: مقایسه عددی نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی

Table 5. The numeric comparison of the FEM and experimental results

خطا (%)	مقدار پیک- پیک (گوس) آزمایشگاهی	مقدار پیک- پیک (گوس) شبیه‌سازی	مقدار پیک (گوس) شبیه‌سازی	مقدار پیک (گوس) آزمایشگاهی	عمق پیتینگ (میلی‌متر)	قطر پیتینگ (میلی‌متر)	مؤلفه نشتی شار مغناطیسی
۴/۵	-	-	۴۴۰	۴۲۰	۸	۱۰	مؤلفه محوری
۵/۵	-	-	۳۶۰	۳۴۰	۳	۱۰	مؤلفه محوری
۷/۳	۶۸	۶۳	-	-	۸	۱۰	مؤلفه محیطی
۵/۸	۳۴	۳۲	-	-	۳	۱۰	مؤلفه محیطی

magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline, Ndt & E International, 35(7) (2002) 449-457

- [3] J.W. Smith, B.R. Hay, Magnetic flux leakage inspection tool for pipelines, in, Google Patents, 2000
- [4] M.B. Ignagni, Apparatus and method for accurate pipeline surveying, in, Google Patents, 2003
- [5] Y. Gunaltun, D. Supriyatman, J. Achmad, Top-offline corrosion in gas lines confirmed by condensation analysis, Oil & gas journal, 97(28) (1999) 64-64
- [6] C. Argent, Macaw's pipeline defects. sl: Yellow Pencil Marketing, 2003, ISBN 0-9544295-0-8
- [7] D.V. Pugh, S.L. Asher, J. Cai, W.J. Sisak, J.L. Pacheco, F.C. Ibrahim, E.J. Wright, A. Dhokte, S. Venai, D. Robson, Top-of-line corrosion mechanism for sour wet gas pipelines, in: CORROSION 2009, NACE International, 2009

به شدت با هم تداخل پیدا کردند و این منجر به دشوار شدن تخمین اندازه عیوب (بویژه عرض پیتینگ‌ها) شد. نتایج نشان داد که مؤلفه محیطی نشتی شار مغناطیسی مناسب‌ترین مؤلفه برای تخمین اندازه عرض پیتینگ‌های مجاور هم بود. همچنین، نتایج خوبی برای تخمین طول پیتینگ‌ها با استفاده از مؤلفه شعاعی نشتی شار مغناطیسی بدست آمد.

نهایتاً، نتایج مدل اجزاء محدود سه بعدی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که بازرسی نشتی شار مغناطیسی پتانسیل خوبی برای تشخیص و تعیین ابعاد عیوب مجاور هم دارد.

مراجع

- [1] Y. Bai, Pipelines and risers, Elsevier, 2001
- [2] M. Afzal, S. Udpa, Advanced signal processing of

- M. Baarkavi, Theoretical Analysis of the Rectangular Defect Orientation using Magnetic Flux Leakage, *Measurement Science Review*, 18(1) (2018) 28-34
- [19] Hwang, W. Lord, Finite element modeling of magnetic field/ defect interactions, *Journal of Testing and Evaluation*, 3(1) (1975) 21 -25
- [20] V. Shcherbinin, N. Zatsepin, Calculation of the magneto static field of surface defects. 1. Field topography of defect models, *Defectoscopy*, 5 (1966) 385-393
- [21] J. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York) (1998), Google Scholar, 78
- [22] Z. Wang, Y. Gu, Y. Wang, A review of three magnetic NDT technologies, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(4) (2012) 382-388
- [23] H. Jansen, P. van de Camp, M. Geerdink, Magnetization as a Key Parameter of Magnetic-Flux Leakage Pigs for Pipeline Inspection, *NDT & E International*, 1(30) (1997) 35
- [24] G.S. Park, E.S. Park, Improvement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing (NDT), *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(2) (2002) 1277-1280
- [25] T. Bubenik, J. Neštroth, R. Eiber, B. Saffell, Magnetic flux leakage (MFL) technology for natural gas pipeline inspection, *NDT and E International*, 1(30) (1997) 36
- [26] L. Clapham, D.L. Atherton, Stress effects on MFL signals, in: *CORROSION 2002*, NACE International, 2002
- [27] A. Belanger, Managing HIC-Affected Pipelines Using Multiple-Technology Hard-Spot Tools, in: *Conference Proceedings Pipeline Pigging, Integrity assessment & Repair*, 2004
- [28] K. Reber, Reliability of flaw size calculation based on magnetic flux leakage inspection of pipelines, (2006)
- [29] J. Qi, S. Qingmei, L. Nan, Z. Paschalis, W. Jihong, Detection and estimation of oil-gas pipeline corrosion defects, in: *Proceedings of the 18th international*
- [8] M. Singer, D. Hinkson, Z. Zhang, H. Wang, S. Nešić, CO₂ top-of-the-line corrosion in presence of acetic acid: a parametric study, *Corrosion*, 69(7) (2013) 719-735
- [9] A. Benjamin, J. Freire, R. Vieira, Part 6: Analysis of pipeline containing interacting corrosion defects, *Experimental Techniques*, 31(3) (2007) 74-82
- [10] Y. Gunaltun, R. Piccardino, D. Vinazza, Interpretation of MFL and UT inspection results in case of top of line corrosion, *CORROSION/2006*, paper, (6170) (2006)
- [11] N.A. Jemari, J. Palmer, T. Beuker, J. Baker, B. Wimolsukpirakul, J. Onderdonk, A. van Roodselaar, L. Huyse, Improvements in the accurate estimation of top of the line internal corrosion of subsea pipelines on the basis of in-line inspection data, in: *2010 8th International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2010, pp. 75-82
- [12] M.A. Siebert, J.E. Sutherland, Application of the circumferential component of magnetic flux leakage measurement for in-line inspection of pipelines, *BJ Pipeline Inspection Services*, Calgary, Alberta (CA), 1999
- [13] Y. Li, J. Wilson, G. Y. Tian, Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterization, *NDT and E International*, 40(2) (2007) 179-184
- [14] S.M. Dutta, F.H. Ghorbel, R.K. Stanley, Dipole modeling of magnetic flux leakage, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(4) (2009) 1959-1965
- [15] G. Kopp, H. Willems, Sizing limits of metal loss anomalies using tri-axial MFL measurements: A model study, *NDT & E International*, 55 (2013) 75-81
- [16] J. Chen, S. Huang W. Zhao, Three-dimensional defect inversion from magnetic flux leakage signals using iterative neural network, *IET Science Measurement & Technology*, 9(4) (2015) 418-426
- [17] M. Layouni, M.S. Hamdi, S. Tahar, Detection and sizing of metal-loss defects in oil and gas pipelines using pattern-adapted wavelets and machine learning, *Applied Soft Computing*, 52 (2017) 247-261
- [18] J.S. Alaric, V. Suresh, A. Abudhahir, M.C. Sobia,

estimation in natural gas pipelines using MFL signals, in: Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian, IEEE, 2013, pp. 1-6
[32] J.-W. Kim, S. Park, Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation, Sensors, 18(1) (2018) 109.

conference on systems engineering (ICSE 2006), 2006, pp. 173-177

[30] A. Joshi, L. Udpa, S. Udpa, A. Tamburrino, Adaptive wavelets for characterizing magnetic flux leakage signals from pipeline inspection, IEEE transactions on magnetics, 42(10) (2006) 3168-3170
[31] M.R. Kandroodi, F. Shirani, B.N. Araabi, M.N. Ahmadabadi, M.M. Bassiri, Defect detection and width

