



Modeling and Experimental Investigation of Pulsed Eddy Current and Magnetic Saturation for Testing of Ferromagnetic Metals with Sub-surface Pitting

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Azizzadeh T.¹ PhD,
Safizadeh M.S.*¹ PhD

How to cite this article

Azizzadeh T, Safizadeh M.S. Modeling and Experimental Investigation of Pulsed Eddy Current and Magnetic Saturation for Testing of Ferromagnetic Metals with Sub-surface Pitting. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):143-149.

¹Mechanical Engineering Department, Mechanical Engineering School, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering School, Iran University of Science & Technology, Narmak, Tehran, Iran.
Postal Code: 1684613114
Phone: +98 (21) 77491228
Fax: +98 (21) 77240488
safizadeh@iust.ac.ir

Article History

Received: April 26, 2018
Accepted: October 09, 2018
ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

Pulsed eddy current (PEC) technique is commonly used for the detection of sub-surface defects in electrically conductive metals. However, due to the limited penetration depth of eddy currents, the detection of sub-surface defects in ferromagnetic metals is limited while using PEC technique. In order to extend the application of PEC technique for the detection of sub-surface defects in ferromagnetic metals, the penetration depth of eddy currents needs to be increased. For deeper penetration of eddy currents in the material, magnetic saturation of the tested specimen is a useful solution. In magnetic saturation state, the magnetic permeability of the ferromagnetic metal is decreased and stabilized and, as a result, the penetration depth of eddy currents is increased. In this paper, the performance of the PECT for detection of sub-surface pitting defects in the magnetized ferromagnetic specimen has been investigated through finite element modeling (FEM) and experimental studies. The tested specimen is a 10mm-thick steel plate, in which sub-surface pitting defects with various depths have been modeled. A probe consisting of a driver coil, a pickup coil, and a ferrite core is used to measure the time-varying PEC signals. Then, the time domain features of the differential PEC signals are extracted and used to detect the sub-surface pittings. The results indicate that PEC technique together with magnetization can effectively detect sub-surface pitting defects.

Keywords Finite Element Modeling; Time-varying Signals; Pitting; Pulsed Eddy Current; Magnetic Saturation

CITATION LINKS

[1] Metallic materials: Physical, mechanical, and ... [2] A differential planar eddy currents probe: Fundamentals, modeling and ... [3] Detection of the subsurface cracks in a stainless steel plate using pulsed ... [4] Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: ... [5] Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing ... [6] Integral formulation and genetic algorithms for defects geometry reconstruction using pulse ... [7] Noncontact evaluation of the dependency of electrical conductivity on stress for various Al alloys as a function of plastic deformation ... [8] Transient eddy current inspection in the presence of ferrous fasteners in multi-layered... [9] Pulsed eddy current detection of cracks in F/A-18 inner wing spar without wing skin removal using modified principal ... [10] Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface ... [11] The pulsed eddy current differential probe to detect a thickness variation in an insulated ... [12] Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed ... [13] Time-frequency analysis of pulsed eddy ... [14] Defect classification based on rectangular pulsed eddy current sensor in ... [15] Transient eddy-current NDE for ageing aircraft - capabilities ... [16] Defect characterization in multi-layered conductive components with pulsed ... [17] Detection of cracks beneath rivet heads via pulsed eddy current technique [18] Transient eddy currents - are they ... [19] Analytical expressions for transient induction voltage in a receiving coil due to a coaxial transmitting coil over a ... [20] Fast analytical modeling for pulsed eddy ... [21] Transient eddy current analysis of pulsed eddy current testing by finite ... [22] Analytical modeling for transient probe response in pulsed eddy ... [23] An inversion scheme for sizing of wall thinning defect from pulsed eddy current ... [24] Uchimoto T. Sizing of wall thinning defects using pulsed eddy current testing signals based on a hybrid inverse ... [25] Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation ... [26] Pulsed eddy current: New developments for corrosion under ... [27] Gas pipeline corrosion mapping using pulsed eddy ... [28] Non-destructive ... [29] Nondestructive evaluation: A tool in design, manufacturing ... [30] Numerical analysis of magnetic flux leakage of transverse defects ...

شبیه‌سازی و بررسی آزمایشگاهی پالس ادی‌کارنت و اشباع مغناطیسی در آزمون فلزات فرومغناطیس دارای پیتینگ زیرسطحی

تورج عزیززاده PhD

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

میرسعید صفی‌زاده* PhD

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

چکیده

روش پالس ادی‌کارنت به‌طور متداول برای تشخیص عیوب زیرسطحی در فلزات رسانا به کار می‌رود. با این حال به دلیل عمق نفوذ محدود ادی‌کارنت، کاربرد پالس ادی‌کارنت برای تشخیص عیوب زیرسطحی در فلزات فرومغناطیس محدود است. به‌منظور تعمیم کاربرد پالس ادی‌کارنت برای تشخیص عیوب زیرسطحی در فلزات فرومغناطیس، عمق نفوذ ادی‌کارنت باید افزایش یابد. برای دستیابی به عمق نفوذ بالا اشباع مغناطیسی قطعه تحت آزمون راه حل مفیدی است. در حالت اشباع مغناطیسی، پرمابلیته مغناطیسی فلز فرومغناطیس کاهش یافته و یکنواخت می‌شود و در نتیجه عمق نفوذ ادی‌کارنت در ماده افزایش می‌یابد. در این مقاله از طریق مدل‌سازی المان محدود و آزمون‌های آزمایشگاهی، عملکرد روش پالس ادی‌کارنت برای تشخیص عیوب پیتینگ زیرسطحی در قطعه مغناطیس‌شده بررسی می‌شود. قطعه تحت آزمون، یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر است و در آن عیوب پیتینگ زیرسطحی با عمق‌های متفاوت ایجاد شده‌اند. پروب پالس ادی‌کارنت شامل کوئل تحریک، کوئل تشخیص و هسته فریتی بوده و برای به‌دست‌آوردن سیگنال‌های زمانی استفاده می‌شود. سپس ویژگی‌های زمانی از سیگنال‌های تفاضلی پالس ادی‌کارنت استخراج شده و برای تشخیص پیتینگ‌های زیرسطحی استفاده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که روش پالس ادی‌کارنت همراه با اشباع مغناطیسی می‌تواند به‌طور موثری عیوب پیتینگ زیرسطحی را تشخیص دهد.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی المان محدود، سیگنال‌های زمانی، پیتینگ، پالس ادی‌کارنت، اشباع مغناطیسی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۷

*نویسنده مسئول: safizadeh@iust.ac.ir

۱- مقدمه

عیوب خوردگی موضعی، جزء تهدیدهای بالقوه برای سلامتی خطوط لوله فرومغناطیسی هستند. این عیوب می‌توانند به‌سرعت رشد کنند و منجر به ازبین‌رفتن یکپارچگی سازه‌های خطوط لوله شوند. بنابراین به‌منظور جلوگیری از این خطرات، آزمون‌های غیرمخرب دوره‌ای و مانیتورینگ ضخامت خطوط لوله ضروری هستند^[1]. از میان روش‌های گوناگون آزمون غیرمخرب، روش‌های الکترومغناطیسی به‌طور متداول برای آزمون قطعات فلزی به کار می‌روند^[2]. به‌ویژه تشخیص عیوب پنهان و زیرسطحی دارای اهمیت صنعتی فوق‌العاده‌ای است^[3].

روش پالس ادی‌کارنت به‌دلیل کاربردهای متنوع در آزمون غیرمخرب از جمله اندازه‌گیری تنش، تشخیص عیوب زیرسطحی در سازه‌های پیچیده، بازسازی عیوب و تعیین عمق عیوب^[4-11]، همواره در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بوده است. در مقایسه با روش ادی‌کارنت تک‌فرکانسی متداول، در روش پالس ادی‌کارنت از پالس‌های باند پهن برای تحریک کوئل پروب استفاده می‌شود. این پالس تحریک در داخل قطعه تحت آزمون منتشر می‌شود. کوئل‌های تشخیص یا سنسورهای مغناطیسی برای دریافت سیگنال‌های پاسخ زمانی به کار می‌روند. از آنجایی که

سیگنال پالس ادی‌کارنت یک سیگنال زمانی است که در داخل قطعه نفوذ می‌کند، تحلیل ویژگی‌های زمانی سیگنال پاسخ می‌تواند برای به‌دست‌آوردن عمق عیوب زیرسطحی به کار رود. ویژگی‌های زمانی سیگنال پالس ادی‌کارنت عبارت از دامنه پیک، زمان رسیدن به پیک و زمان عبور از صفر هستند. این ویژگی‌ها می‌توانند از سیگنال‌های پاسخ زمانی استخراج شوند و برای تشخیص و تعیین ابعاد عیوب به کار روند^[12-14].

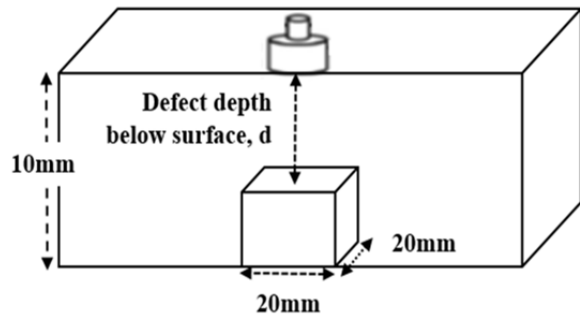
روش پالس ادی‌کارنت به‌طور گسترده‌ای برای بازرسی سازه‌های چندلایه مورد استفاده قرار گرفته است^[15-18]. روش‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی و به‌دست‌آوردن سیگنال‌های پاسخ پالس ادی‌کارنت استفاده شده^[19-22]، روش‌های تحلیل معکوس نیز برای تعیین ابعاد عیوب با استفاده از سیگنال‌های پاسخ پالس ادی‌کارنت توسعه یافته است^[23, 24]. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش پالس ادی‌کارنت، یک روش کارا و نیرومند برای تشخیص و اندازه‌گیری ابعاد عیوب در فلزات غیرفرومغناطیس (مانند آلومینیوم، تیتانیوم و آلیاژهای آنها) است. در دهه اخیر، روش پالس ادی‌کارنت برای ارزیابی عیوب کاهش فلز در لوله‌ها و مخازن فرومغناطیسی عایق‌دار مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، امکان بررسی و ارزیابی خوردگی در لوله‌ها و مخازن عایق‌دار را بدون برداشتن عایق میسر می‌سازد و اثبات کرده که روش کارا و موثری است^[25-27]. با این حال به دلیل خواص مواد فرومغناطیس و پدیده اثر پوسته‌ای، همواره کاربرد روش‌های مبتنی بر ادی‌کارنت برای آزمون فلزات فرومغناطیس چالش‌انگیز بوده است. عمق نفوذ ادی‌کارنت از طریق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

در این معادله، μ پرمابلیته مغناطیسی ماده، σ قابلیت هدایت الکتریکی ماده، f فرکانس تحریک سیگنال و δ عمق نفوذ است. موفقیت روش پالس ادی‌کارنت در تشخیص عیوب زیرسطحی بستگی به عمق نفوذ ادی‌کارنت در داخل قطعه تحت آزمون دارد. برای دستیابی به عمق نفوذ بیشتر ادی‌کارنت در داخل قطعه، اشباع مغناطیسی قطعه فرومغناطیس روش مفیدی است. در حالت اشباع مغناطیسی، پرمابلیته نسبی ماده فرومغناطیسی به سمت عدد یک نزدیک می‌شود و بنابراین عمق نفوذ ادی‌کارنت در داخل قطعه افزایش می‌یابد^[28, 29]. هدف از این کار پژوهشی، بررسی عملکرد روش پالس ادی‌کارنت و اشباع مغناطیسی در تشخیص عیوب زیرسطحی موضعی در فولادهای فرومغناطیسی است. به‌منظور شبیه‌سازی عیوب زیرسطحی در قطعه تحت آزمون، عیوب پیتینگ مربعی با عمق‌های متفاوت و روی یک صفحه فولادی با عمق ۱۰ میلی‌متر ایجاد می‌شوند. در این پژوهش هر دو روش مدل‌سازی المان محدود و روش آزمایشگاهی به کار می‌روند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادشده قادر به تشخیص عیوب زیرسطحی است که در عمق بیش از ۷ میلی‌متر زیر سطح در یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. بنابراین این روش می‌تواند نیاز صنعتی برای بازرسی قطعات فرومغناطیسی را برآورده نماید.

۲- مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود

در این پژوهش، نرم‌افزار کامسول برای مدل‌سازی المان محدود روش پالس ادی‌کارنت در محیط اشباع مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که مدل‌های دو‌بعدی توانایی شبیه‌سازی هندسه عیوب موضعی را ندارند، مدل‌های سه‌بعدی استفاده شدند.



شکل ۳) شماتیک پروب پالس ادی‌کارنت، قطعه مورد آزمون و عیب پیتینگ زیرسطحی

کوئل تحریک پروب با یک پالس ولتاژ مربعی تحریک شد. عرض این پالس ۵ میلی‌ثانیه و دامنه آن ۱۰ ولت بود. پالس ولتاژ مربعی با تعریف یک تابع ریاضی در کامسول ایجاد شد. پالس ولتاژ ایجاد شده در شکل ۴ نشان داده شده است. تنها نیمه اول پالس در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. زمان کل از صفر تا ۵ میلی‌ثانیه و در گام‌های زمانی ۵ میکروثانیه تغییر داده شد.

تنظیمات مدل سه‌بعدی در ماژول AC/DC (magnetic fields) از نرم‌افزار کامسول، انجام و از حلگر زمانی برای حل مدل استفاده شد. در تنظیم شرایط مرزی، مرزهای باکس هوا به‌عنوان عایق مغناطیسی در نظر گرفته شدند. مواد و خواص مواد مربوط به تمامی اجزای مدل در جدول ۱ آورده شده است. چگالی شار مغناطیسی مورد نیاز برای اشباع مغناطیسی فولاد X52 حدود ۲ تسلا است [30]. این مقدار چگالی شار مغناطیسی، مقدار قابل توجهی است و شدت میدان مغناطیسی زیادی می‌طلبد. از این رو آهنربای مورد استفاده باید دارای قدرت و شدت بسیار زیادی باشد. در این پژوهش، دو آهنربای دایمی نئودیموم با گرید N42 و قدرت مغناطیس‌کنندگی $1e6 \text{ A/m}$ برای تولید میدان مغناطیسی استفاده شدند. همان‌طور که در جدول ۱ آورده شده، تعداد دور کوئل تحریک ۶۶۶ دور و تعداد دور کوئل تشخیص ۶۲۵ دور است.

انتخاب تعداد مش مناسب و شرایط مرزی مناسب، دو پارامتر ضروری برای ایجاد نتایج عددی صحیح است. المان‌های مش (المان‌های تتراهدرال) در نزدیکی پروب و ناحیه عیب، ریزتر انتخاب شدند. شکل ۵- الف هندسه مش‌بندی شده و سه‌بعدی مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۱) پارامترهای الکترومغناطیسی قطعات در مدل‌سازی المان محدود

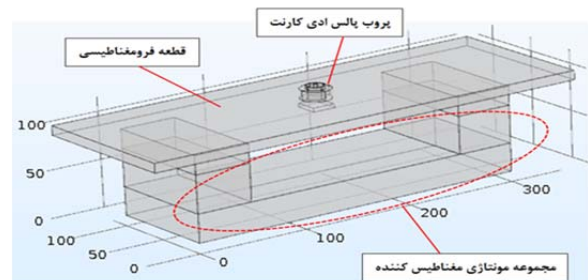
ویژگی‌های مغناطیسی	معادله حاکم	ماده	قطعات
منحنی مغناطیس‌کنندگی	قانون آمپر	استیل X52	قطعه تست، کوپلینگ‌ها و یوک
قدرت مغناطیس‌کنندگی ($z=1e6 \text{ A/m}$)	قانون آمپر	Nd-Fe-B	آهنرباها
تعداد دور=۶۶۶ هدایت الکتریکی سیم پیچ= $6e7 \text{ S/m}$ قطر سیم= ۲۹AWG	کوئل با چندین دور سیم پیچ	مس	کوئل تحریک
تعداد دور=۶۲۵ هدایت الکتریکی سیم پیچ= $6e7 \text{ S/m}$ قطر سیم= ۳۳AWG	کوئل با چندین دور سیم پیچ	مس	کوئل تشخیص
پرمالیتت نسبی (با توجه به ماده)	قانون آمپر	هوا فریت اکریلیک پلاستیک	باکس هوا هسته فریتی عایق

مطابق با شکل ۱- الف، مدل شبیه‌سازی شده شامل پروب پالس ادی‌کارنت، قطعه تحت آزمون، مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده و باکس هوا است. برای ایجاد نمای بهتر و واضح‌تر از مدل سه‌بعدی، باکس هوا در این شکل نشان داده نشده است. همچنین ساختار پروب پالس ادی‌کارنت در شکل ۱- ب قابل مشاهده است.

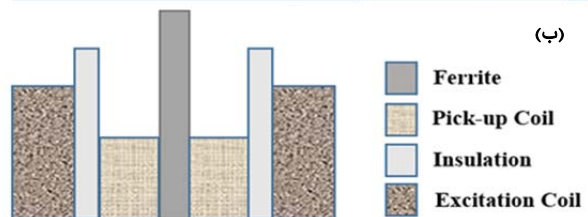
قطعات مجموعه مغناطیس‌کننده در شکل ۲ نشان داده شده است. آهنرباهای دایمی برای ایجاد شار مغناطیسی تا حالت اشباع مغناطیسی در قطعه مورد آزمون به کار می‌روند. کوپلینگ‌های فرومغناطیسی، شار مغناطیسی را به داخل قطعه آزمون انتقال می‌دهند. یوک فرومغناطیسی، مدار مغناطیسی ایجاد شده را می‌بندد. ایجاد سطح مغناطیسی مناسب در قطعه، یک فاکتور مهم در کاربرد موثرتر روش پالس ادی‌کارنت برای تشخیص عیوب زیرسطحی است.

عیوب پیتینگ زیرسطحی در ناحیه مرکزی قطعه تحت آزمون ایجاد شد. طول و عرض پیتینگ‌ها ۲۰ میلی‌متر بود. در انجام شبیه‌سازی‌ها، طول و عرض پیتینگ‌ها ثابت نگه داشته شدند و عمق پیتینگ‌ها از یک میلی‌متر تا ۷ میلی‌متر تغییر و پروب پالس ادی‌کارنت در سطح بالایی قطعه قرار داده شد. در تمام شبیه‌سازی‌ها، فاصله برخیزش پروب از سطح قطعه، ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. جزئیات عیب شبیه‌سازی شده در قطعه آزمون و نحوه قرارگیری پروب پالس ادی‌کارنت در شکل ۳ نشان داده شده است.

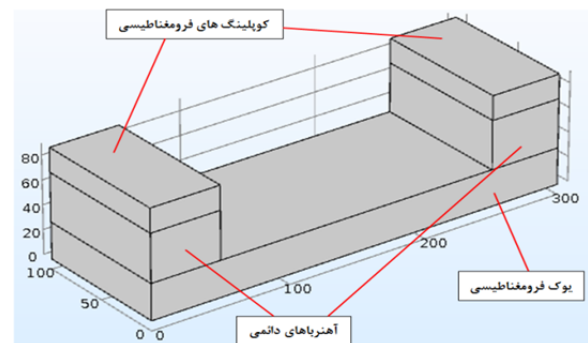
(الف)



(ب)



شکل ۱) مدل سه‌بعدی روش پالس ادی‌کارنت با مغناطیس و جزئیات ساختاری پروب، (الف) مدل سه‌بعدی روش پالس ادی‌کارنت با مغناطیس، (ب) جزئیات ساختاری پروب



شکل ۲) قطعات سیستم مغناطیس‌کننده

جزئیات عیوب ماشین‌کاری شده دقیقاً همانند قسمت مدل‌سازی است (شکل ۵- ب). با استفاده از مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده، قطعه تحت آزمون تا حالت اشباع (۲ تسلا) مغناطیس شد. کوئل تحریک پروب با یک ولتاژ پالسی با دامنه ۱۰ ولت و فرکانس ۱۰۰ هرتز تحریک شد. سیگنال پاسخ دریافت شده توسط کوئل تشخیص، به یک تقویت‌کننده با نویز پایین تغذیه و سیگنال پاسخ با فاکتور بهره ۲ تقویت و سپس سیگنال خروجی از تقویت‌کننده به اسیلوسکوپ دیجیتال داده شد. در طول بازرسی پالس ادی‌کارنت، پروب روی سطح بدون عیب قطعه آزمون حرکت داده شد تا عیوب زیرسطحی را تشخیص دهد. عملیات اسکن خطی با گام حرکتی ۵ میلی‌متر و در امتداد خط گذرنده از مرکز عیوب انجام شد. برای کنترل حرکت پروب از یک اسکنر سه‌محوره استفاده شد که مجهز به سه موتور پله‌ای است. فاصله برخیزش پروب از سطح قطعه، ۰/۵ میلی‌متر تنظیم شد. برای تشخیص عیوب زیرسطحی در این اسکن خطی، از دامنه پیک سیگنال پاسخ تفاضلی استفاده و عملیات پردازش سیگنال‌ها با استفاده از برنامه MATLAB انجام شد. مجموعه آزمایشگاهی برای آزمون پالس ادی‌کارنت قطعه مغناطیس‌شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



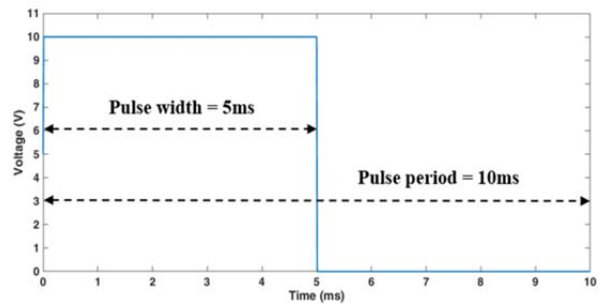
شکل ۶ تصویر مجموعه آزمایشگاهی برای انجام آزمون پالس ادی‌کارنت روی قطعه مورد آزمون

۴- نتایج و بحث

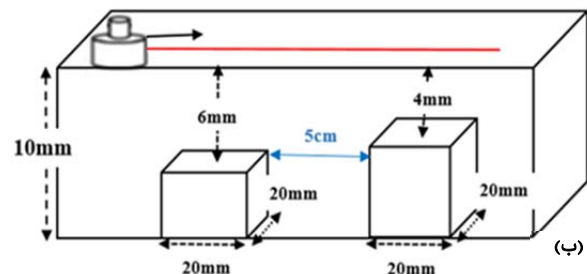
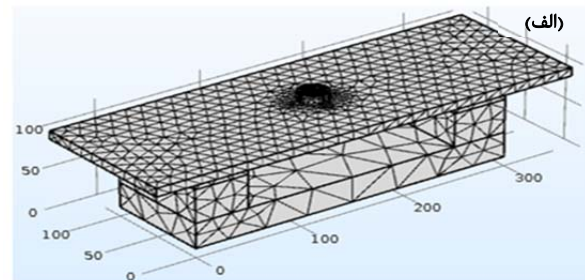
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

شکل ۷- الف سطح اشباع مغناطیسی ایجادشده در قطعه مورد آزمون را نشان می‌دهد که از مدل سه‌بعدی به دست آمده است. همچنین در این شکل خطوط میدان مغناطیسی و نحوه حرکت آنها در المان‌های مجموعه مغناطیس‌کننده و قطعه آزمون نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷- الف مشاهده می‌شود، خطوط شار مغناطیسی در قطب شمال آهنربای سمت چپ ایجاد می‌شوند، از کوپلینگ فرم مغناطیسی عبور می‌کنند، وارد ضخامت قطعه تحت آزمون می‌شوند، سپس از کوپلینگ سمت راست عبور می‌کنند و در نهایت وارد قطب جنوب آهنربای سمت راست می‌شوند. خطوط شار مغناطیسی در داخل یوک فرم مغناطیسی از راست به چپ جریان می‌یابند و بدین ترتیب مدار مغناطیسی ایجادشده کامل می‌شود.

شکل ۷- ب توزیع پرمابلیته نسبی در سطح بالایی قطعه در حالت اشباع مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، پرمابلیته نسبی قطعه تحت آزمون کاهش



شکل ۴ ولتاژ تحریک پالسی

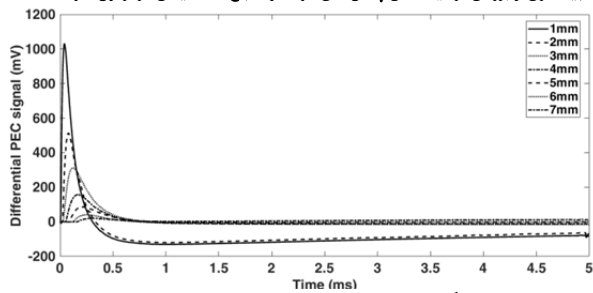


شکل ۵ مش‌بندی مدل المان محدود و شماتیک پروب پالس ادی‌کارنت، قطعه تست و دو عیب پیتینگ زیرسطحی مجاور هم، الف) مش‌بندی مدل المان محدود، ب) شماتیک پروب پالس ادی‌کارنت، قطعه تست و دو عیب پیتینگ زیرسطحی مجاور هم

مساله به روش المان محدود پس از تعیین هندسه، خواص مواد، شرایط مرزی و مش حل می‌شود و ولتاژ القایی در کوئل تشخیص پروب به دست می‌آید. برای حل مدل در حوزه زمانی از یک حلگر خطی مستقیم استفاده شد. در مرحله بعدی شبیه‌سازی‌ها، دو عیب مربعی مجاور هم با فاصله لبه تا لبه ۵ سانتی‌متر روی قطعه آزمون ایجاد شد. جزئیات این عیوب در شکل ۵- ب نشان داده شده است. پروب پالس ادی‌کارنت در امتداد خط مستقیم و با گام حرکتی ۵ میلی‌متر روی قطعه آزمون حرکت داده و سپس دامنه پیک سیگنال پاسخ تفاضلی به‌عنوان تابعی از موقعیت مکانی پروب محاسبه شد. این شبیه‌سازی‌ها هم با مغناطیس‌کردن قطعه و هم بدون مغناطیس‌کردن قطعه انجام شدند. در نهایت نتایج این دو حالت با هم مقایسه شدند.

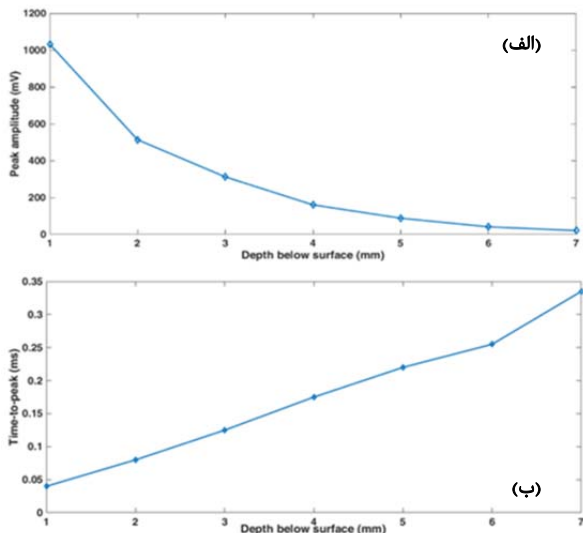
۳- مجموعه آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی شامل یک فانکشن ژنراتور، پروب پالس ادی‌کارنت، تقویت‌کننده سیگنال با نویز پایین، اسیلوسکوپ دیجیتال، مجموعه مونتاژی مغناطیس‌کننده، قطعه تحت آزمون و یک اسکنر سه‌محوره است. مشخصات پروب پالس ادی‌کارنت دقیقاً مطابق با مشخصات توصیف‌شده در شبیه‌سازی‌ها (شکل ۱- ب؛ جدول ۱) است. قطعه تحت آزمون، یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. به‌منظور شبیه‌سازی عیوب زیرسطحی در قطعه، دو عیب پیتینگ مربعی در یک سمت قطعه، ماشین‌کاری شدند.



نمودار ۲) تغییر سیگنال‌های تفاضلی با عمق عیب زیرسطحی

نمودار ۳- الف، نمودار دامنه پیک سیگنال‌های تفاضلی بر حسب عمق پیتینگ‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار ۳- الف مشاهده می‌شود، رابطه بین عمق عیب و دامنه پیک تا حدی نامایی است. برای پیتینگ‌های کم عمق‌تر دامنه پیک به سرعت کاهش می‌یابد، در حالی که برای پیتینگ‌های با عمق بیشتر، سرعت کاهش کمتر است. همان‌طور که در نمودار ۳- ب مشاهده می‌شود با تغییر عمق پیتینگ‌ها، زمان پیک به‌طور خطی تغییر می‌کند. با افزایش عمق پیتینگ‌ها، زمان پیک نیز افزایش می‌یابد.



نمودار ۳) تغییر دامنه و زمان پیک با عمق عیب زیرسطحی، الف) تغییر دامنه پیک با عمق عیب زیرسطحی، ب) تغییر زمان پیک با عمق عیب زیرسطحی

همان‌طور که می‌دانیم سیگنال‌های پالس ادی‌کارت تفاضلی، متناسب با میزان دانسیته جریان گردابی القا شده در ضخامت قطعه (یا به عبارت دیگر میزان میدان مغناطیسی نفوذکننده در ضخامت قطعه) هستند. مطابق با معادله ۲، دانسیته جریان گردابی القا شده در قطعه، با افزایش عمق به صورت نامایی کاهش می‌یابد. بنابراین از آنجایی که با افزایش عمق پیتینگ‌ها میزان میدان مغناطیسی نفوذکننده در ضخامت قطعه کاهش می‌یابد و به تدریج میرا می‌شود، در نتیجه سیگنال‌های تفاضلی و دامنه پیک این سیگنال‌ها تضعیف می‌شوند.

$$i(x) = i_0 \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (1)$$

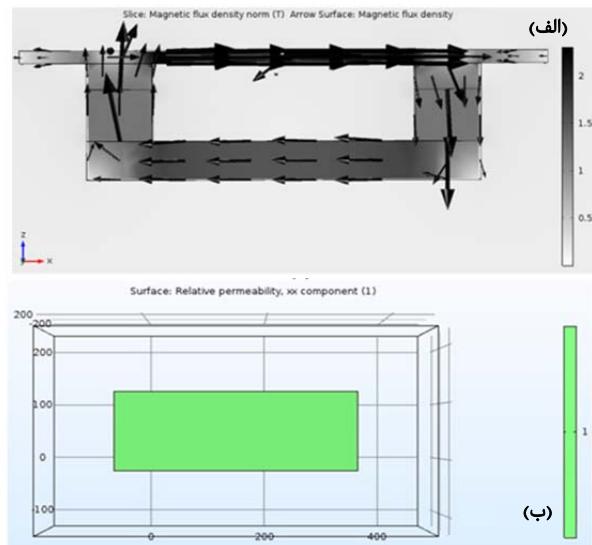
در معادله ۲، i_0 بیانگر دانسیته جریان گردابی در سطح قطعه، $i(x)$ بیانگر دانسیته جریان گردابی در عمق x و δ بیانگر عمق نفوذ جریان گردابی است.

هر چه عمق پیتینگ افزایش یابد، سیگنال پاسخ پالس ادی‌کارت احتیاج به زمان بیشتری برای رفت و برگشت به سطح قطعه خواهد

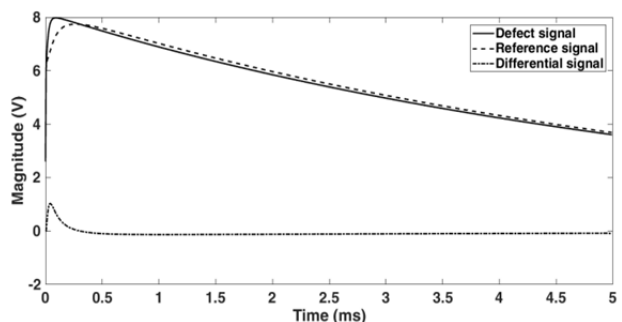
یافته و به عدد یک رسیده است. بنابراین تحت این شرایط، عمق نفوذ ادی‌کارت القایی در قطعه تحت آزمون افزایش می‌یابد.

در هر شبیه‌سازی، ولتاژهای القایی در کویل تشخیص برای عیوب زیرسطحی با عمق‌های مختلف به دست آمدند. اطلاعات درباره شدت عیب و موقعیت مکانی عیب با تفاضل سیگنال رفرنس از سیگنال‌های به دست آمده حاصل می‌شود. نمودار ۱ سیگنال رفرنس، سیگنال عیبی که در عمق یک میلی‌متری از سطح قطعه قرار دارد و نیز سیگنال تفاضلی را نشان می‌دهد. دامنه پیک سیگنال تفاضلی 1031.71 میلی‌ولت و زمان پیک سیگنال تفاضلی 0.04 میلی‌ثانیه است. قابل ذکر است که سیگنال رفرنس در مکان بدون عیب از قطعه تحت آزمون به دست آمد.

سیگنال‌های تفاضلی برای پیتینگ‌هایی با عمق‌های متفاوت از یک تا 7 میلی‌متر در نمودار ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پیتینگ‌ها، سیگنال‌های تفاضلی ضعیف‌تر می‌شود و دامنه پیک‌ها در زمان‌های دیرتر رخ می‌دهند. با افزایش عمق پیتینگ‌ها از یک میلی‌متر تا 7 میلی‌متر، دامنه پیک سیگنال تفاضلی از 1031.71 تا 20.63 میلی‌ولت تغییر می‌کند. همچنین زمان پیک از 0.04 تا 0.335 میلی‌ثانیه تغییر می‌کند. این نتایج نشان می‌دهند که دامنه پیک‌ها مقادیر بزرگ‌تری دارند و با افزایش عمق پیتینگ‌ها، میزان تغییرات دامنه پیک بیشتر از میزان تغییرات زمان پیک است. با این حال سیگنال‌های پیتینگ‌ها با عمق‌های مختلف به راحتی قابل تشخیص و تمایز هستند.



شکل ۴) توزیع چگالی شار مغناطیسی و توزیع پرمابلیته نسبی قطعه فولادی (بعد از مغناطیس شدن)، الف) توزیع چگالی شار مغناطیسی، ب) توزیع پرمابلیته نسبی قطعه فولادی (بعد از مغناطیس شدن)



نمودار ۱) سیگنال‌های پالس ادی‌کارت رفرنس، عیب و تفاضلی از پیتینگ زیرسطحی با عمق یک میلی‌متر

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله پژوهشی به بررسی عملکرد روش پالس ادی کارنت در محیط اشباع مغناطیسی برای تشخیص عیوب زیرسطحی موضعی در فولادهای فرومغناطیسی پرداخته شد. اشباع مغناطیسی به منظور کاهش پرمابلیته نسبی و یکنواخت کردن پرمابلیته قطعه و در نتیجه افزایش عمق نفوذ ادی کارنت القایی در قطعه تحت آزمون استفاده شد. این پژوهش، ابتدا با تحلیل المان محدود در حالت سه‌بُعدی و با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شد. سیگنال‌های پالس ادی کارنت به دست آمده برای پیتینگ‌های زیرسطحی با عمق‌های متفاوت به خوبی از یکدیگر قابل تشخیص و تمایز بودند. بنابراین نتایج شبیه‌سازی‌ها کاربرد موثر روش پالس ادی کارنت را در محیط اشباع مغناطیسی برای تشخیص عیوب زیرسطحی در فولادهای فرومغناطیسی نشان دادند. در نهایت برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، سیستم آزمایشگاهی طراحی و ایجاد شد و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در تطابق خوبی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی قرار داشتند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (بطور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

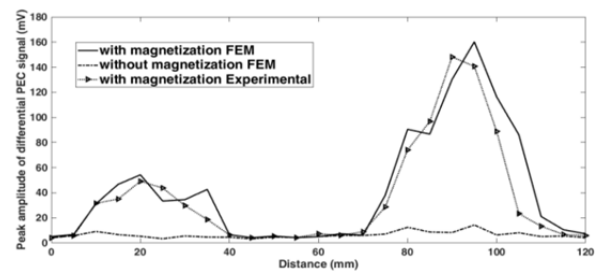
تعارض منافع: بدینوسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

سهم نویسندگان: تورج عزیززاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ میرسعید صفی‌زاده (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Schweitzer PA. Metallic materials: Physical, mechanical, and corrosion properties. Boca Raton: CRC Press; 2003.
- Rosado LS, Santos TG, Ramos PM, Vilaça P, Piedade M. A differential planar eddy currents probe: Fundamentals, modeling and experimental evaluation. NDT & E International. 2012;51:85-93.
- Park DG, Sekar Angani C, Rao BPC, Vértesy G, Lee DH, Kim KH. Detection of the subsurface cracks in a stainless steel plate using pulsed eddy current. Journal of Nondestructive Evaluation. 2013;32(4):350-353.
- Sophian A, Tian G, Fan M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017;30(3):500-514.
- He Y, Pan M, Luo F, Tian G. Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation. NDT & E International. 2011;44(4):344-352.
- Preda G, Rebian M, Hantila FI. Integral formulation and genetic algorithms for defects geometry reconstruction using pulse eddy currents. IEEE Transactions on Magnetics. 2010;46(8):3433-3436.
- Morozov M, Tian GY, Withers PJ. Noncontact evaluation of the dependency of electrical conductivity on stress for various Al alloys as a function of plastic deformation and annealing. Journal of Applied Physics. 2010;108(2):024909.

داشت. در نتیجه با افزایش عمق پیتینگ‌ها، دامنه پیک مربوط به سیگنال پاسخ پالس ادی کارنت در زمان‌های دیرتر اتفاق خواهد افتاد. مقایسه دامنه‌های پیک مربوط به سیگنال‌های اسکن خطی در حالت مغناطیس‌کردن و در حالت بدون مغناطیس‌کردن قطعه تحت آزمون در نمودار ۴ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رفت، دامنه‌های پیک در حالت اشباع مغناطیسی قطعه قوی‌تر از دامنه‌های پیک در حالت بدون مغناطیس هستند. در حالت اشباع مغناطیسی، پرمابلیته نسبی قطعه تحت آزمون به عدد یک نزدیک‌تر می‌شود و بنابراین عمق نفوذ ادی کارنت القایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این حالت سبب ایجاد سیگنال‌های قوی‌تری می‌شود و در نتیجه عملکرد روش پالس ادی کارنت در تشخیص عیوب زیرسطحی بهبود می‌یابد.

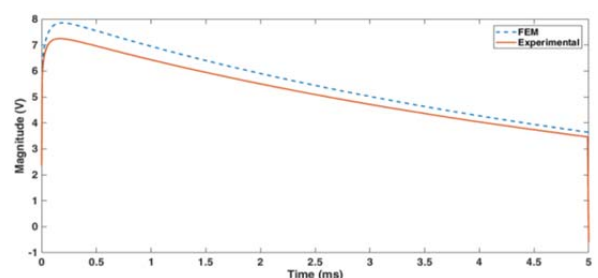


نمودار ۴) تاثیر مغناطیس روی سیگنال‌های پالس ادی کارنت (شبیه‌سازی و آزمایشگاهی)

۴-۲- نتایج آزمایشگاهی

نمودار ۵، سیگنال‌های به دست آمده از یک آزمون آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این سیگنال‌ها مربوط به حالتی هستند که پروب پالس ادی کارنت در مرکز و درست بالای عیب پیتینگ زیرسطحی با عمق ۴ میلی‌متر قرار گرفته است. همان طور که در نمودار ۵ نشان داده شده است، سیگنال‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تطابق خوبی با هم دارند.

برای تشخیص عیوب زیرسطحی از دامنه پیک سیگنال‌های پاسخ تفاضلی استفاده شد. مقایسه نتایج اسکن خطی به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌های شبیه‌سازی در نمودار ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، دامنه پیک سیگنال‌های پاسخ تفاضلی با کاهش عمق عیب زیرسطحی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بیشترین دامنه پیک زمانی ایجاد می‌شود که لبه خارجی کوئل تشخیص، منطبق بر مرکز عیوب زیرسطحی است. دامنه پیک سیگنال تفاضلی با عبور کوئل تشخیص از مرکز عیب کاهش می‌یابد. این مشاهدات آزمایشگاهی مطابق با نتایج شبیه‌سازی هستند. خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کمتر از ۱۰٪ بوده و خطای ایجاد شده عمدتاً به دلیل تفاوت‌های جزئی در تعریف خواص مواد در شبیه‌سازی‌ها نسبت به خواص مواد واقعی مورد استفاده در آزمایش‌ها است.



نمودار ۵) سیگنال‌های پالس ادی کارنت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

- transient induction voltage in a receiving coil due to a coaxial transmitting coil over a conducting plate. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004;40(2):371-378.
- 20- Li Y, Tian GY, Simm A. Fast analytical modeling for pulsed eddy current evaluation. *NDT & E International*. 2008;41(6):477-483.
- 21- Tsuboi H, Seshima N, Sebestyen I, Pavo J, Gyimothy S, Gasparics A. Transient eddy current analysis of pulsed eddy current testing by finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004;40(2):1330-1333.
- 22- Fan M, Huang P, Ye B, Hou D, Zhang G, Zhou Z. Analytical modeling for transient probe response in pulsed eddy current testing. *NDT & E International*. 2009;42(5):376-383.
- 23- Xie S, Chen Z, Wang L, Takagi T, Uchimoto T. An inversion scheme for sizing of wall thinning defect from pulsed eddy current testing signals. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2012;39(1-4):203-211.
- 24- Xie S, Chen Z, Chen HE, Wang X, Takagi T, Uchimoto T. Sizing of wall thinning defects using pulsed eddy current testing signals based on a hybrid inverse analysis method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013;49(5):1653-1656.
- 25- Cheng W. Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation and cladding. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012;31(3):215-224.
- 26- Grenier M, Demers-Carpentier V, Rochette M, Hardy F. Pulsed eddy current: New developments for corrosion under insulation examinations. *WCNDT*. 2016.
- 27- Safizadeh MS, Hasanian M. Gas pipeline corrosion mapping using pulsed eddy current technique. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*. 2011;5(1):11-18.
- 28- Halmshaw R. *Non-destructive testing*. London: Edward Arnold; 1987.
- 29- Bray DE, Stanley RK. *Nondestructive evaluation: A tool in design, manufacturing, and service*. Boca Raton: CRC Press; 1996.
- 30- Zhang O, Wei X, Yan S. Numerical analysis of magnetic flux leakage of transverse defects of sucker rod. *Journal of Testing and Evaluation*. 2018;46(5):JTE20160543.
- 8- Whalen P. Transient eddy current inspection in the presence of ferrous fasteners in multi-layered aluminum structures. *NDT Canada*. 2010;(2010-12).
- 9- Horan P, Underhill PR, Krause TW. Pulsed eddy current detection of cracks in F/A-18 inner wing spar without wing skin removal using modified principal component analysis. *NDT & E International*. 2013;55:21-27.
- 10- Tian GY, Sophian A, Taylor D, Rudlin J. Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment. *IEEE Sensors Journal*. 2005;5(1):90-96.
- 11- Angani CS, Park DG, Kim CG, Leela P, Kollu P, Cheong YM. The pulsed eddy current differential probe to detect a thickness variation in an insulated stainless steel. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2010;29(4):248-252.
- 12- Tai CC, Rose JH, Moulder JC. Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy-current measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1998;67(11):3965.
- 13- Safizadeh MS, Lepine BA, Forsyth DS, Fahr A. Time-frequency analysis of pulsed eddy current signals. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2001;20(2):73-86.
- 14- He Y, Luo F, Pan M, Hu X, Gao J, Liu B. Defect classification based on rectangular pulsed eddy current sensor in different directions. *Sensors and Actuators A Physical*. 2010;157(1):26-31.
- 15- Smith RA, Hugo GR. Transient eddy-current NDE for ageing aircraft - capabilities and limitations. *Insight Non Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2001;43(1):14-20.
- 16- Plotnikov YA, Nath SC, Rose CW. Defect characterization in multi-layered conductive components with pulsed eddy current. *AIP Conference Proceedings*. 2002;615(1):1976.
- 17- Giguère JSR, Lepine BA, Dubois JMS. Detection of cracks beneath rivet heads via pulsed eddy current technique. *AIP Conference Proceedings*. 2002;615(1):1968.
- 18- Harrison DJ. Transient eddy currents - are they here to stay?. *Insight Non Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2005;47(3):144-152.
- 19- De Hann VO, De Jong PA. Analytical expressions for