



اولین همایش منطقه ای  
مهندسی جوش و بازرسی  
مرکز تخصصی - گزین و نوبت شماره ۱۰۰  
پوهنه خان سمنان - تهران - اردیبهشت

اولین همایش منطقه ای مهندسی جوش و بازرسی (مهر ۹۲ - مشهد مقدس)

باسمه تعالی

گواهی ارائه مقاله

بدینوسیله گواهی می شود مقاله نویسنده (گان)

میلاذ حجتی، مهرداد کاشفی، سعید کهربانی

تحت عنوان

شناسایی غیرمخرب تغییرات ضخامت در فولاد زنگ نزن آستنیتی با استفاده از پروب دیفرانسیلی - پالسی جریان گردابی

در اولین همایش منطقه ای مهندسی جوش و بازرسی مشهد پذیرفته و به صورت یو تی آر ارائه گردیده است.

به امید آن که در سایه حضور فعالانه جنابعالی در عرصه علم و فن آوری و بکارگیری نتایج پژوهش های انجام شده شاهد توسعه و

پیشرفت صنعت جوشکاری باشیم.

مهندس رضانتقی زاده کاشانی

رئیس همایش

دکتر سعید عبدالکریم سجادی

دبیر همایش



مرکز آموزش عالی آرایه شرکت  
شرکت دانش بنیان خراسان رضوی

The first Regional Conference on  
Welding Engineering and Inspection  
October 9-10, 2013 - Mashhad-Iran



اولین همایش منطقه ای  
مهندسی جوش و بازرسی  
مرکز علمی - کاربردی شرکت  
شهرک های صنعتی خراسان رضوی

**Nondestructive detection of thickness variation in austenite stainless steel  
using differential pulsed eddy current probe**

M. Hojati<sup>1\*</sup>, M. Kashefi<sup>1</sup>, S. Kahrobaee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Sadjad Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

**Abstract**

The pulsed eddy current (PEC) is an electromagnetic NDT approach which is principally developed for the detection of surface and sub surface flaws. In contrast to traditional eddy current, the PEC employs a non sinusoidal excitation such as a pulse or square wave. Thus, the penetration of induced currents will be more and larger amount of information will be extracted from the bulk of the materials. In this study, a differential probe for the PEC system has been fabricated to detect the thickness variation in austenite stainless steel (304L) specimens. A steel test sample was prepared with a thickness that varied from 1 mm to 5 mm accurately. The designed differential probe contains an excitation coil with two pickup coils which are placed at the axial center of the excitation coil. The excitation coil receives pulse currents from the function generator and then induces the eddy currents in the specimen; the induced eddy current fields were recorded by the pickup coils. Evaluating the features of the detected pulse, reasonable relation between peak characteristics (peak value and time to zero) and thickness of the tested samples were established. The results show acceptable accuracy of the proposed method in thickness measurement of stainless steel parts.

**Keywords:** Pulsed eddy current; Thickness measurement; Austenite stainless steel; Pulse characteristics

\* Corresponding Author's E-mail (Milad.hojati@yahoo.com)



مرکز آموزش علمی کاربردی شرکت  
شهرک های صنعتی خراسان رضوی

## اولین همایش منطقه ای مهندسی جوش و بازرسی

۱۷ و ۱۸ مهرماه ۱۳۹۲ - مشهد



اولین همایش منطقه ای  
مهندسی جوش و بازرسی  
مرکز علمی - کاربردی خراسان رضوی  
شهرک های صنعتی خراسان رضوی

# شناسایی غیرمخرب تغییرات ضخامت در فولاد زنگ نزن آستنیتی با استفاده از پروب دیفرانسیلی - پالسی جریان گردابی

میلااد حجتی<sup>۱</sup>، مهرداد کاشفی<sup>۲</sup>، سعید کهربائی<sup>۳</sup>

- ۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳- مربی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد

### چکیده

روش جریان گردابی پالسی از تکنیک‌های غیرمخرب الکترومغناطیسی بوده که به منظور شناسایی عیوب سطحی و زیرسطحی به کار برده می‌شود. در روش پالسی برخلاف روش متدوال جریان گردابی که از جریان متناوب سینوسی با فرکانس واحد استفاده می‌شود، از جریان پالسی استفاده شده و لذا بدلیل استفاده از یک طیف فرکانسی می‌تواند جریان‌های القایی را تا عمق‌های بیشتری نفوذ داده و اطلاعات بیشتری از حجم نمونه را استخراج کند. در این پژوهش با استفاده از طراحی یک پروب دیفرانسیلی، از این تکنیک غیرمخرب جهت شناسایی تغییرات ضخامت فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L بهره برده شده است. به این منظور از نمونه‌هایی با ضخامت‌های بین ۱ تا ۵ میلی‌متر که با دقت ابعادی ۰.۰۱ میلی‌متر تهیه شده، مورد آزمایش قرار گرفتند. پروب دیفرانسیلی طراحی شده شامل یک سیم‌پیچ تحریک و دو سیم پیچ حس‌گر تعبیه شده در مرکز سیم‌پیچ تحریک، می‌باشد. سیم‌پیچ تحریک، جریان با شکل پالسی را از منبع تغذیه دریافت و در نمونه‌ها القا می‌کند و دو سیم پیچ حس‌گر موج‌های القا شده را ثبت می‌کند. با بررسی شکل پالس‌های دریافتی از نمونه‌های متفاوت و اندازه‌گیری ارتفاع و زمان میرا شدن آنها، می‌توان ارتباطی منطقی بین ضخامت نمونه‌ها و مشخصه‌های پالس‌ها در نظر گرفت. نتایج حاصل نشان‌دهنده دقت قابل قبول روش پیشنهادی در تعیین ضخامت قطعات فولاد زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان گردابی پالسی، تعیین ضخامت، فولاد زنگ نزن آستنیتی، مشخصه‌های پالس.

## ۱- مقدمه

بهره‌گیری از تکنیک‌های غیرمخرب یکی از رایج‌ترین روش‌های بازرسی قطعات صنعتی در سیستم‌هایی می‌باشد که در طول عمر خود ممکن است دچار کاهش ضخامت‌های ناشی از خوردگی و در نتیجه بروز خسارات جبران‌ناپذیری شود. در این میان، روش‌های غیرمخرب الکترومغناطیسی به عنوان معمول‌ترین این روش‌ها در تعیین ضخامت صفحات و پوشش‌ها [۳-۱] و بررسی خواص ریزساختاری ناشی از عملیات سطحی اعمال شده [۶-۴] بر قطعات رسانا به کار گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر روش جریان گردابی پالسی (PEC)<sup>۴۵</sup> در شناسایی ضخامت دیواره و پوشش‌ها و همچنین عیوب سطحی و زیرسطحی، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۹-۷].

روش متداول جریان گردابی (ECT)<sup>۴۶</sup> که سال‌ها در ترک‌یابی و مشخصه‌یابی غیرمخرب مواد، مقبولیت بسیار گسترده‌ای را در بدست آورده است، به صورت تک فرکانس و با شکل موج سینوسی عمل می‌کند که منجر به محدودیت‌هایی مانند کم بودن عمق نفوذ و اثر پوسته‌ای<sup>۴۷</sup> می‌شود. اما در روش PEC برخلاف روش ECT از شکل موج پالسی و یا مربعی استفاده می‌شود. از آنجایی که تبدیل فوریه یک پالس، شامل چندین فرکانس می‌باشد [۱۰، ۱۱]، بنابراین یک پالس می‌تواند تعداد زیادی فرکانس را به طور همزمان در قطعه مورد آزمایش تولید کند. همچنین استفاده از جریان پالسی، منجر به کاهش توان مصرفی می‌شود که این امر از مطلوب‌ترین ویژگی‌ها در طراحی ابزارهای قابل حمل در بازرسی قطعات صنعتی می‌باشد. به دلیل مزایای بالقوه روش PEC تحقیقات گسترده‌ای در بکارگیری این تکنیک در کاربردهایی همچون تعیین ضخامت دیواره لوله‌های تحت فشار سیال و همچنین بررسی اثرات خوردگی در ساختارهای چند لایه در صنایع هوافضا، صورت پذیرفته است [۱۲، ۱۳].

پروب PEC شامل دو نوع سیم‌پیچ تحریک<sup>۴۸</sup> و حس‌گر<sup>۴۹</sup> بوده که بر روی ماده رسانا قرار گرفته و جریان پالسی از طرق سیم-پیچ تحریک به ماده اعمال می‌شود. سیم‌پیچ تحریک جریان‌های گردابی را بر طبق قانون القاء فارادی در نمونه مورد آزمایش القاء می‌کند. میدان مغناطیسی ناشی از جریان‌های گردابی القایی توسط سیم‌پیچ حسگر دریافت می‌شود. این سیم‌پیچ حسگر علاوه بر میدان مغناطیسی معکوس جریان‌های گردابی، میدان مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچ تحریک را نیز دریافت می‌کند. به طور معمول، میدان مغناطیسی ناشی از سیم‌پیچ تحریک بسیار بزرگتر از میدان ناشی از جریان‌های گردابی می‌باشد. این در حالی است که تنها شدت میدان مغناطیسی معکوس جریان‌های گردابی در مشخصه‌های هندسی قطعات مانند ضخامت، اثرگذار می‌باشد. از این رو شناسایی عیوب، تغییرات ضخامت و دیگر عوامل هندسی قطعه به دلیل اثر گذاری میدان مغناطیسی اولیه مشکل می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل (تداخل میدان مغناطیسی سیم‌پیچ تحریک) از پروب دیفرانسیلی<sup>۵۰</sup> بهره برده می‌شود [۱۴، ۱۵].

در شکل ۱، چگونگی تقابل میدان مغناطیسی سیم‌پیچ تحریک و میدان مغناطیسی معکوس ناشی از جریان‌های گردابی ایجاد شده در قطعه، در پروب دیفرانسیلی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این پروب دیفرانسیلی شامل یک سیم‌پیچ تحریک و دو سیم‌پیچ حسگر که در مرکز سیم‌پیچ تحریک قرار گرفته، می‌باشد. جریان پالسی توسط منبع PEC به دو سر سیم‌پیچ تحریک منتقل شده و میدان مغناطیسی با جهت مشخص شده در شکل ۱ را ایجاد می‌کند و منجر به ایجاد جریان‌های گردابی یا القایی در نمونه فولادی می‌شود. همچنین همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، میدان مغناطیسی تحریک بر روی هر دو سیم‌پیچ حس‌گر بالایی و پایینی اثر گذاشته در حالی که میدان مغناطیسی معکوس ناشی از جریان‌های گردابی تنها بر روی سیم‌پیچ حسگر پایینی اثر می‌گذارد. بنابراین در صورت تفاضل خروجی‌های حسگرهای بالایی و پایینی می‌توان به خروجی دیفرانسیلی یا به عبارتی میزان خالص جریان‌های گردابی ناشی از تغییرات ضخامت (حذف اثر میدان مغناطیسی سیم‌پیچ تحریک) دست یافت.

<sup>45</sup> Pulsed Eddy Current

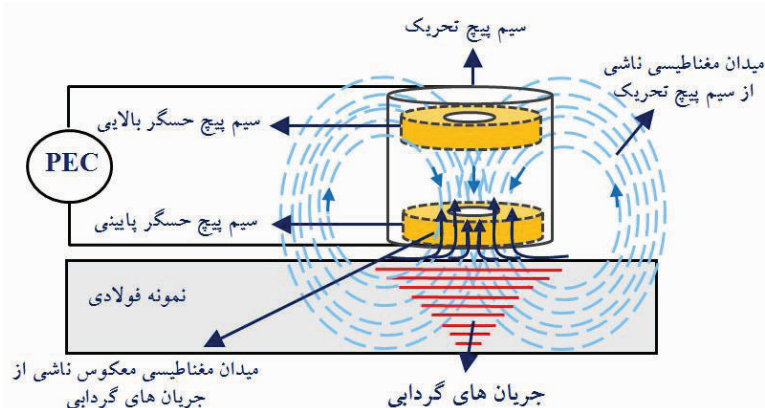
<sup>46</sup> Eddy Current Testing

<sup>47</sup> Skin effect

<sup>48</sup> Excitation coil

<sup>49</sup> Pickup coil

<sup>50</sup> Differential probe

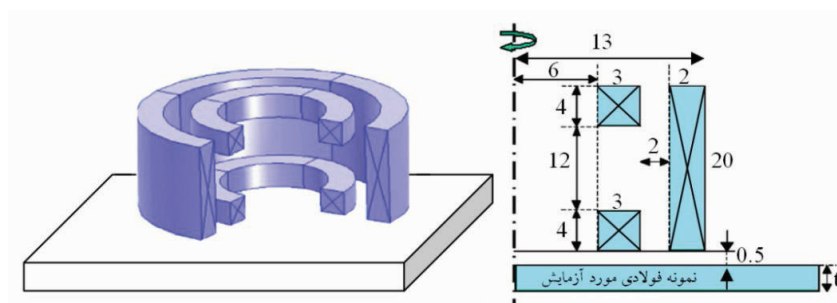
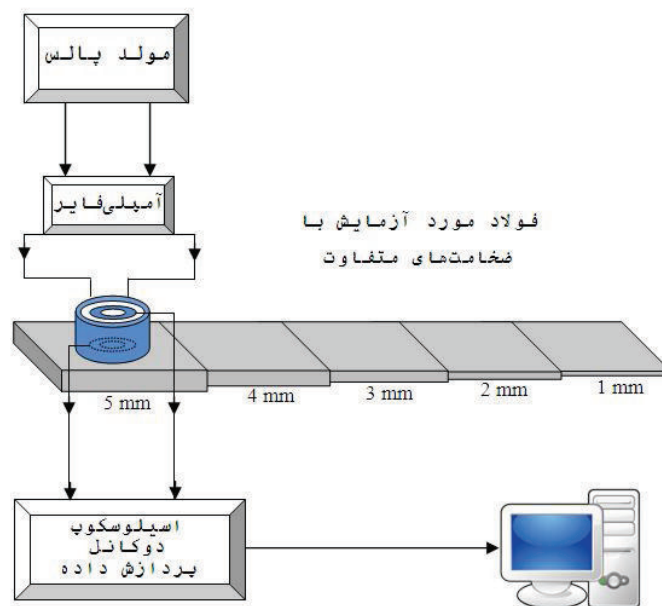


شکل ۱. چگونگی نشر میدان های مغناطیسی ناشی از سیم پیچ های تحریک و حسگر در پروب دیفرانسیلی.

در این پژوهش پتانسیل روش جریان گردابی پالسی (PEC) و پروب دیفرانسیلی در شناسایی تغییرات ضخامت فولاد زنگ نزن 304L بررسی شده است.

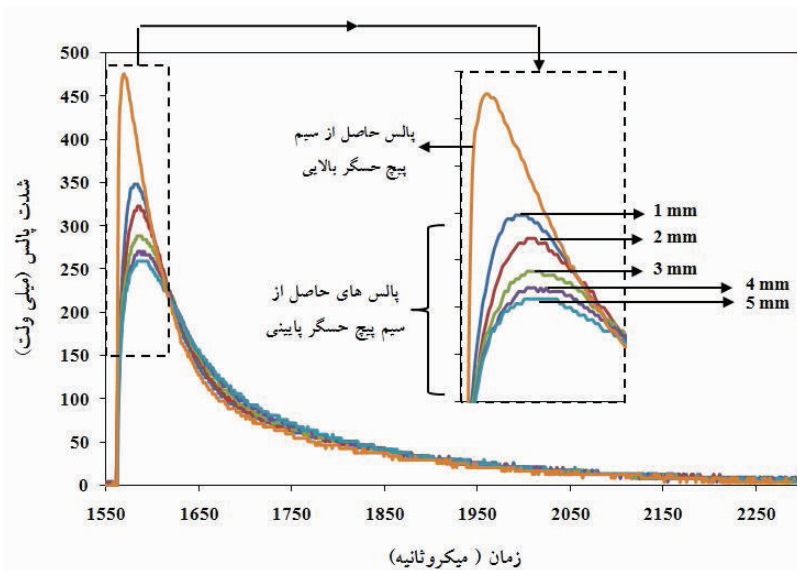
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ۵ نمونه فولاد زنگ نزن 304L با سطح مقطع  $50 \times 100$  mm و ضخامت های ۱ تا ۵ میلی متر استفاده شد. پس از آماده سازی دقیق نمونه ها از تکنیک PEC به منظور تعیین غیرمخرب ضخامت بهره گرفته شد. شکل ۲، بخش های مختلف سیستم غیرمخرب پیشنهادی را به صورت شماتیک نشان می دهد. سیستم جریان گردابی طراحی شده در پژوهش حاضر، شامل مولد جریان پالس (با قابلیت تولید امواج در محدوده فرکانسی بین ۰/۵ هرتز تا ۵ مگا هرتز)، تقویت کننده امواج، سیم پیچ دیفرانسیلی که از یک سیم پیچ تحریک و دو سیم پیچ حسگر تشکیل شده، اسیلوسکوپ و کامپیوتر جهت پردازش و تحلیل داده ها، می باشد. ولتاژ القاء شده در قطعات، از دو سیم پیچ حسگر توسط کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال به داده های قابل پردازش توسط کامپیوتر تبدیل می شود. سیم پیچ تحریک از تعداد ۲۰۰ دور سیم مسی که به دور یک هسته فریتی استوانه ای توخالی پیچیده شده، تشکیل شده است. قطر خارجی و داخلی این هسته فریتی به ترتیب ۲۶ و ۲۲ میلی متر می باشد. دو سیم پیچ حسگر (با تعداد ۱۵۰ دور سیم مسی که به دور هسته فریتی استوانه ای با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۱۸ و ۱۲ میلی متر)، در راستای محور مرکزی سیم پیچ تحریک در قسمت بالا و پایین آن قرار داده شد. اجزاء و ابعاد پروب دیفرانسیلی طراحی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۴، پالس‌های ایجاد شده با استفاده از تکنیک PEC بر روی قطعات با ضخامت‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پالس حاصل شده از سیم‌پیچ حسگر بالایی دارای ارتفاع بیشتری نسبت به سایر پالس‌ها که از سیم‌پیچ حسگر پایینی ثبت شده‌اند، می‌باشد. در واقع پالس‌های ظاهر شده از سیم‌پیچ حسگر بالایی تنها ناشی از شار ایجاد شده از میدان مغناطیسی سیم‌پیچ تحریک می‌باشد. این در حالی است که سایر پیک‌ها ناشی از برابند شارهای مربوط به میدان مغناطیسی تحریک و همچنین میدان مغناطیسی معکوس جریان‌های گردابی می‌باشد. از آنجا که این دو میدان در تقابل با یکدیگر قرار دارند، اثر یکدیگر را تضعیف نموده و نتیجتاً شدت پالس ضعیف‌تری را ایجاد می‌شود.

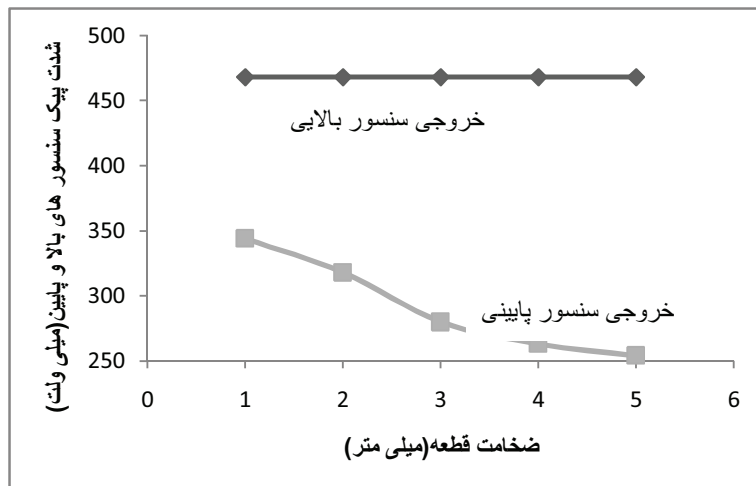


شکل ۴. پالس های حاصل از سیم پیچ های حسگر بالا و پایین در پروب دیفرانسیلی برای قطعات با ضخامت های متفاوت.

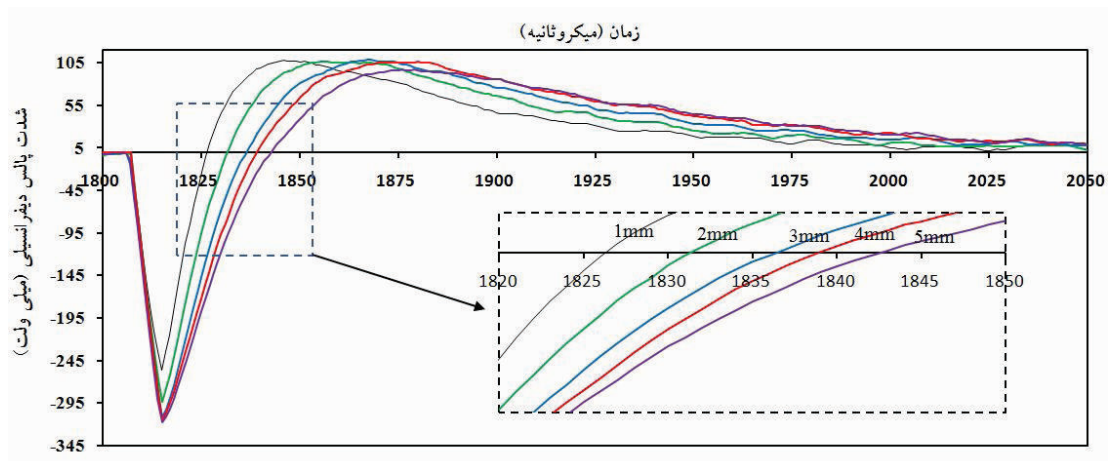
پیک پالس های ایجاد شده در قطعات با ضخامت های متفاوت از دو سیم پیچ حسگر بالایی و پایینی، اندازه گیری شده و تغییرات آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشهود است، پیک پالس های حاصل از سیم پیچ حسگر بالایی برای قطعات با ضخامت های متفاوت تغییری نکرده است که دلیل این امر متاثر نبودن شار مغناطیسی سیم پیچ حسگر بالایی از شدت جریان های گردابی می باشد. به عبارت دیگر تغییرات ضخامت باعث تغییر در میزان جریان های گردابی ایجاد شده در قطعه شده و این امر باعث تفاوت در میزان میدان معکوس می شود. در نتیجه تغییرات ضخامت اثر خود را بر روی سیم پیچ حسگر پایینی که متاثر از میدان جریان های گردابی است، می گذارد. همان طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، با افزایش ضخامت قطعات، پیک پالس های مربوط به سیم پیچ حسگر پایینی کاهش می یابد. دلیل این امر این می باشد که هرچه ضخامت قطعات بیشتر شود، چگالی جریان های گردابی بیشتر شده و در نتیجه میدان مغناطیسی معکوس بیشتری را ایجاد خواهد کرد. بنابراین این میدان معکوس، میدان مغناطیسی اولیه ناشی از سیم پیچ تحریک را ضعیف تر نموده و شار مغناطیسی ایجاد شده در سیم پیچ حسگر پایینی کمتر و نتیجتاً القای کمتری صورت می گیرد. همان طور که قبلاً نیز عنوان شده، به دلیل حذف اثر میدان مغناطیسی تحریک و اندازه گیری خالص تغییرات میدان مغناطیسی جریان های گردابی، خروجی دیفرانسیلی که از تفاضل خروجی های سیم پیچ های حسگر بالایی و پایینی حاصل می شود، به عنوان خروجی نهایی سیستم PEC پیشنهادی در نظر گرفته می شود. بنابراین با افزایش ضخامت قطعات، خروجی دیفرانسیلی افزایش یافته است (شکل ۵).

به منظور بررسی جامع تر، زمان میرایی پالس ها به عنوان پارامتر دیگری از مشخصه پالس های حاصل شده برای تعیین ضخامت قطعات، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶، پالس ها به صورت دیفرانسیلی (تفاضل نقطه به نقطه پالس های ناشی از سیم پیچ حسگرهای بالایی و پایینی) برای ۵ ضخامت مورد بررسی، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، زمان میرایی پالس ها با افزایش ضخامت قطعات افزایش یافته است. لذا از این پارامتر نیز می توان به عنوان معیاری جهت شناسایی ضخامت قطعات بهره برد.





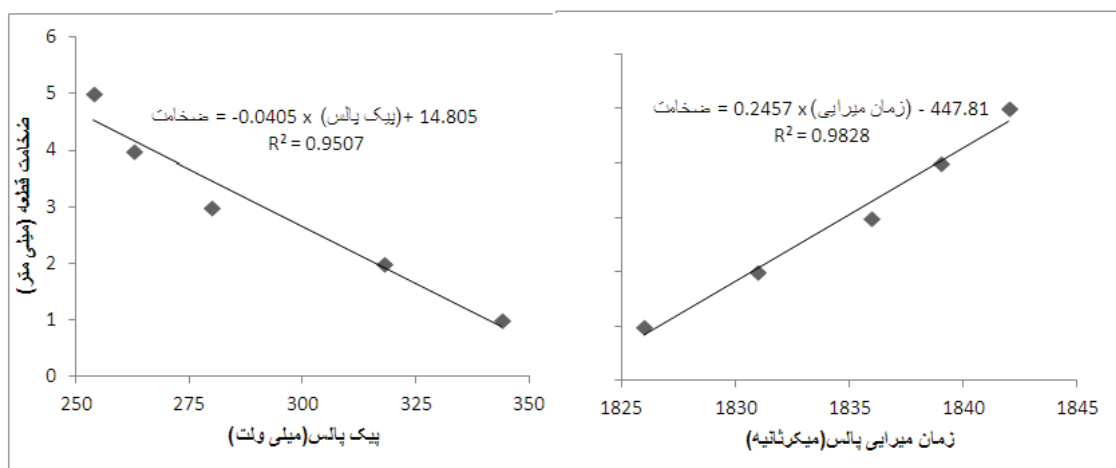
شکل ۵. خروجی های سیم پیچ های حسگر بالا و پایین برای قطعات با ضخامت های متفاوت.



شکل ۶. پالس های دیفرانسیلی و زمان میرایی پالس ها برای قطعات با ضخامت های متفاوت.

در شکل ۷، ارتباطات خطی دو خروجی سیستم PEC طراحی شده در این پژوهش (پیک پالس و زمان میرایی پالس) و ضخامت قطعات نمایش داده شده است. ضریب رگرسیون های بالای حاصل شده از این ارتباطات نشانگر دقت قابل قبول روش پیشنهادی در تعیین غیرمخرب ضخامت قطعات فولاد زنگ نزن می باشد.





شکل ۷. a. ارتباط خط بین خروجی دیفرانسیلی و ضخامت قطعات. b. ارتباط بین پیک پالس و ضخامت قطعات

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر از روش غیرمخرب جریان گردابی پالسی در شناسایی تغییرات ضخامت قطعات فولاد زنگ نزن 304L، بهره گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری خالص جریان‌های گردابی، پروب دیفرانسیلی شامل یک سیم‌پیچ تحریک و دو سیم‌پیچ حسگر تعبیه شده در داخل سیم‌پیچ تحریک، طراحی و بکار گرفته شد. تغییرات ضخامت، مشخصه‌های متفاوتی برای پالس‌های حاصل شده در روش پیشنهادی ایجاد نمود. دو پارامتر پیک و زمان میرایی پالس‌ها به عنوان خروجی‌های سیستم اندازه‌گیری غیرمخرب معرفی شدند. ضرایب رگرسیون بالای حاصل شده ناشی از برقراری ارتباط بین ضخامت قطعات و خروجی‌های دیفرانسیلی ناشی از القاء جریان‌های گردابی، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، روشی کارا، دقیق و سریع در شناسایی تغییرات ضخامت ناشی از خوردگی قطعات می‌باشد.

#### ۵- مراجع

1. W. Yin, A.J Peyton, Thickness measurement of non magnetic plates using multi frequency eddy current sensors. NDT&E Int. 40 (2007) 43-48.
2. J.C. Moulder, E. Uzal, J.H. Rose, Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements. Rev. Sci. Instrum. 63 (1992) 3455-3465.
3. A. Seturaman, J.H. Rose, Rapid inversion of eddy current data for conductivity and thickness of metal coatings. J. Nondestruct. Eval. 14 (1995) 39-46.
4. S. Kahrobaee, M. Kashefi, A. Saheb Alam, Magnetic NDT technology for characterization of decarburizing depth. Surf. Coat. Technol. 205 (2011) 4083-4088.
5. S. Kahrobaee, M. Kashefi. Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor. NDT & E Int. 44 (2011) 335-338.
6. M. Sheikh Amiri, M. Kashefi, Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels. NDT & E Int. 42 (2009) 618-621.
7. B.C. Yoseph, Emerging NDE technologies and challenges at the beginning of the 3rd millennium part I. Mater. Eval. 58 (2000) 17-30.
8. D.L Waidelich, Measurement of coating thickness by use of pulsed eddy currents. Nondestruct. Test. 14 (1956) 14-16.

9. W.W. Ward, J.C. Moulder, Low frequency pulsed eddy currents for deep penetration. *Rev. Progress. QNDE* 17(A) (1998) 291-298.
10. A. Sophian, G.Y. Tian, D. Taylor, J. Rudlin. A feature extraction technique based on the principal component analysis for pulsed eddy current NDT. *NDT&E Int.* 36 (2003) 37-41.
11. G. Zhang, L. Zhao, Research on thickness of metallic layers from pulsed eddy current nondestructive measurements. *Transducer Microsyst. Technol.* 25 (2006) 35-37.
12. R.A. Smith, G.R. Hugo. Transient Eddy-current NDE for aging aircraft capabilities and limitations. *Insight.* 43 (2001) 14-25.
13. M.A. Robers, R.S. Scottini, Pulsed eddy current in corrosion detection. In: *Proc. of 8th ECNDT Conf.* 7 (2002)
14. Y.K. Shin, D.M. Choi, Signal Characteristics of a differential pulsed eddy current sensor in the evaluation of the plate thickness. *NDT&E Int.* 42 (2009) 215-221.
15. L. Shu, H. Songling, Z. Wei, Development of differential probes in pulsed eddy current testing for noise suppression. *Sens. Actuators A.* 135 (2007) 675-679.