

## استفاده از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت در اندازه گیری خروجی های آزمون جریان گردابی به منظور تعیین عمق لایه سخت شده

- سعید کهربائی<sup>۱</sup>، مژگان انسان<sup>۲</sup>، علیرضا صاحب علم<sup>۳</sup>، محسن باقری<sup>۴</sup>، مهرداد کاشفی<sup>۵</sup>
- ۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد
  - ۲ و ۴- گروه مهندسی صنایع، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد
  - ۳- آزمایشگاه مواد و متالورژی، پارک علم و فناوری خراسان، مشهد
  - ۵- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

با استفاده از تحلیل عدم قطعیت می توان با شناسایی منابع اصلی خطا، میزان تاثیر آنها بر نتیجه آزمون را مشخص کرد و احتمال تصمیم گیری غلط را کاهش داد. در این پژوهش، از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت در اندازه گیری خروجی های آزمون جریان گردابی جهت تعیین عمق لایه سخت شده قطعات فولادی استفاده شده است. به منظور انجام این تحلیل، در ابتدا معادله کاهش داده های مربوط به امیدانس در سیگنال های آزمون جریان گردابی، تشکیل شد. در این بررسی آزمون های مخرب و غیرمخرب بر روی هفت فولاد CK45 با عمق های سخت شده متفاوت که تحت عملیات سخت کاری القائی قرار گرفته اند، انجام شد. آزمون مخرب شامل میکروسختی سنجی به منظور دستیابی به عمق سخت شده واقعی انجام شد. با انجام و تکرار آزمون غیرمخرب جریان گردابی، میزان عدم قطعیت اتفاقی این روش برای هر یک از پارامترهای اندازه گیری شده بدست آمد. عدم قطعیت سیستماتیک هر یک از پارامترها نیز با توجه به مشخصات مربوط به سازندگان تجهیزات و گواهی های کالیبراسیون بدست آمد. در نهایت از استانداردهای تحلیل سیستم های اندازه گیری، عدم قطعیت های اتفاقی و سیستماتیک کلی سیستم محاسبه و بر اساس آن عدم قطعیت اندازه گیری عمق لایه سخت شده محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت بالای روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه سخت شده می باشد.

کلمات کلیدی: تحلیل عدم قطعیت، آزمون جریان گردابی، اختلاف فاز، امیدانس کوپل، عمق سخت شده

## استفاده از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری خروجی‌های آزمون جریان گردابی به منظور تعیین عمق لایه سخت شده

سعید کهربائی<sup>۱</sup>، مژگان انسان<sup>۲</sup>، علیرضا صاحب علم<sup>۳</sup>، محسن باقری<sup>۴</sup>، مهرداد کاشفی<sup>۵</sup>

۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد

۲ و ۴- گروه مهندسی صنایع، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد

۳- آزمایشگاه مواد و متالورژی، پارک علم و فناوری خراسان، مشهد

۵- گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

با استفاده از تحلیل عدم قطعیت می‌توان با شناسایی منابع اصلی خطا، میزان تاثیر آنها بر نتیجه آزمون را مشخص کرد و احتمال تصمیم‌گیری غلط را کاهش داد. در این پژوهش، از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری خروجی‌های آزمون جریان گردابی جهت تعیین عمق لایه سخت شده قطعات فولادی استفاده شده است. به منظور انجام این تحلیل، در ابتدا معادله کاهش داده‌های مربوط به امیدانس در سیگنال‌های آزمون جریان گردابی، تشکیل شد. در این بررسی آزمون‌های مخرب و غیرمخرب بر روی هفت فولاد CK45 با عمق‌های سخت شده متفاوت که تحت عملیات سخت کاری القائی قرار گرفته‌اند، انجام شد. آزمون مخرب شامل میکروسختی سنجی به منظور دستیابی به عمق سخت شده واقعی انجام شد. با انجام و تکرار آزمون غیرمخرب جریان گردابی، میزان عدم قطعیت اتفاقی این روش برای هریک از پارامترهای اندازه‌گیری شده بدست آمد. عدم قطعیت سیستماتیک هر یک از پارامترها نیز با توجه به مشخصات مربوط به سازندگان تجهیزات و گواهی‌های کالیبراسیون بدست آمد. در نهایت از استانداردهای تحلیل سیستم‌های اندازه‌گیری، عدم قطعیت‌های اتفاقی و سیستماتیک کلی سیستم محاسبه و بر اساس آن عدم قطعیت اندازه‌گیری عمق لایه سخت شده محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت بالای روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه سخت شده می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** تحلیل عدم قطعیت، آزمون جریان گردابی، اختلاف فاز، امیدانس کوئل، عمق سخت شده

<sup>1</sup> kahrobaee@sadjad.ac.ir, Saeed\_Kahrobaee@yahoo.com

## ۱- مقدمه

به طور کلی برای تحلیل هر سیستم اندازه گیری لازم است که در ابتدا معادلات حاکم بر سیستم تعیین شده و سپس عوامل خطاساز هر یک از پارامترها تعیین شوند. تحلیل عدم قطعیت به تشخیص عوامل موثرتر در هر سیستم اندازه گیری کمک می کند و در نهایت معلوم می سازد که کدام پارامتر را بایستی با دقت بیشتری اندازه گیری نمود. در این مقاله روابط استاندارد تحلیل عدم قطعیت سیستم های اندازه گیری بر آزمون جریان گردابی در محاسبه عمق لایه سخت شده اعمال شده است. با انجام آزمون های متعدد، میزان عدم قطعیت آزمون مورد نظر به صورت کمی محاسبه و سهم هر یک از عوامل تاثیرگذار نیز تعیین شده است.

بر طبق استانداردهای موجود، روش کنترل و اندازه گیری عمق لایه سخت شده رسم پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه است که روشی مخرب بوده و نه تنها وقت گیر و هزینه بر می باشد، بلکه امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات نیز با آن امکان پذیر نیست.

باتوجه به توانایی ها و مزایای روش های غیرمخرب در فرایندهای کنترل کیفی تولیدات صنعتی، امروزه کاربرد روش های غیرمخرب از بازرسی عیوب و ترک یابی فراتر رفته و تعیین مشخصه های مکانیکی و متالورژیکی مواد را نیز شامل می شود. این امر سبب صرفه جویی از لحاظ هزینه و زمان، در تولید انبوه قطعات صنعتی شده و امکان کنترل صد درصد قطعات را نیز فراهم آورده است. از این میان آزمون جریان گردابی مزایای منحصر به فردی دارد. حساسیت این آزمون به ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی را می توان جزء مهمترین عواملی دانست که باعث توجه ویژه به این روش شده است [۱-۲].

کاناپلایک ارتباط خوبی بین سختی چدن داکتیل با ولتاژ خروجی دستگاه جریان گردابی بدست آورده [۳] و چک، در پژوهشی جداگانه، همین ارتباط را برای چدن خاکستری نشان داده اند [۴]. تعیین عمق لایه کربن زدایی شده در فولاد باریز ساختار مارتزیتی با کمک آنالیز هارمونیک [۵] و همچنین براساس پیک های اضافی ظاهر شده در پروفیل سیگنال بارک هازون (MBN) [۶] گزارش شده است. تأثیر اندازه دانه بر خواص مغناطیسی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. درصد پرلایت فولاد [۸] و نیز درصد کربن سطح در فولادهای کربن دهی شده [۹] با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی مورد بررسی قرار گرفته اند. به کارگیری روش های غیرمخرب جهت تعیین عمق لایه سخت شده در فرایند کنترل کیفیت قطعات، خصوصاً در تولید انبوه، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد. اندازه گیری های مغناطیسی مانند تلفات مغناطیسی و اثرات سیگنال بارک هاوزن و نیز رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی [۱۰-۱۱] در قطعات سخت کاری القائی شده، نشان دهنده تفاوت خواص مغناطیسی در لایه

---

<sup>2</sup> Magnetic Barkhausen Noise

سطحی سخت شده و مرکز قطعه می‌باشد. این تغییرات در خواص، پتانسیل لازم را برای تعیین عمق لایه سخت شده با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی فراهم آورده است. در این پژوهش از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت به منظور بررسی روش جریان گردابی در تعیین غیرمخرب عمق لایه سخت شده استفاده شده است.

## ۲- تحلیل عدم قطعیت سیستم‌های اندازه‌گیری

تحلیل عدم قطعیت اندازه‌گیری، روشی عددی جهت بیان خطای موجود در کل داده‌هاست. هدف از اندازه‌گیری توصیف عددی وضعیت و یا عملکرد یک فرآیند فیزیکی است. اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی یک کمیت، خطا نامیده می‌شود. با توجه به این که مقدار واقعی یک کمیت هیچ‌گاه مشخص نیست، بنابراین میزان خطا نیز مشخص نیست. در نتیجه لازم است که بازه‌ای برای خطا تعریف شود که همواره با یک سطح اطمینان مشخص، مقدار واقعی کمیت مورد نظر در آن بازه قرار گیرد. بازه مذکور عدم قطعیت نامیده می‌شود. دانش و آگاهی از عدم قطعیت اندازه‌گیری دارای اهمیتی هم‌چون خود نتیجه است که وضعیت یا عملکرد یک فرآیند را توصیف می‌نماید. نتایج آزمون نباید هیچ‌گاه بدون بیان عدم قطعیت مربوطه گزارش شوند [۱۲].

از آن‌جا که در کلیه اندازه‌گیری‌ها خطا وجود دارد، لازم است که جهت بیان خطا از یک روش مشخص استفاده شود تا میزان خطای هر سیستم اندازه‌گیری مطابق با رویه‌ای یکسان ارائه گردد. این روش توسط سازمان‌ها و موسسات ملی و بین‌المللی مختلفی هم‌چون سازمان استانداردسازی جهانی (ISO)، انجمن مهندسان مکانیک آمریکا (ASME)، انجمن ابزار دقیق، سیستم‌ها و اتوماسیون (ISA) و ... پذیرفته شده است [۱۴-۱۳].

در بسیاری از موارد کمیت مورد نظر به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود بلکه با استفاده از اندازه‌گیری چند کمیت مستقل و ارتباط آن کمیت‌ها با یکدیگر پارامتر هدف محاسبه می‌شود. رابطه‌ای که کمیت‌های مختلف دخیل در یک سیستم اندازه‌گیری را به یکدیگر مرتبط می‌سازد، معادله کاهش داده‌ها نامیده می‌شود. اولین قدم در تحلیل هر سیستم اندازه‌گیری تشکیل معادله کاهش داده‌های حاکم بر آن سیستم است. شرایط فیزیکی حاکم بر هر سیستم اندازه‌گیری، معادله کاهش داده‌های آن سیستم را تعیین می‌کند. متداول‌ترین نحوه نمایش معادله کاهش داده‌ها به صورت زیر است [۱۲ و ۱۵].

$$r = r(X_1, X_2, \dots, X_r) \quad (1)$$

$r$  نتیجه‌ای است که از تعداد  $J$  کمیت اندازه‌گیری شده  $X_i$  به دست می‌آید. با داشتن معادله کاهش داده‌ها، عدم قطعیت نتیجه به صورت زیر داده می‌شود [۱۵].

$$U_r^2 = \left(\frac{\partial r}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_J}\right)^2 U_{X_J}^2 \quad (2)$$

شکل بی بعد رابطه (۲) از تقسیم رابطه به  $U_r^2$  حاصل می شود [۱۵].

$$l = \frac{\left(\frac{\partial r}{\partial X_1}\right)^2 U_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2}\right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_J}\right)^2 U_{X_J}^2}{U_r^2} \quad (3)$$

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱ عملیات حرارتی انجام شده

در این بررسی تعداد ۷ نمونه استوانه‌ای شکل از فولاد CK45 به قطر ۳۰ و طول ۱۳۰ میلی‌متر تهیه شد. سپس نمونه‌ها تحت عملیات سخت کاری القائی، قرار گرفتند. با تغییر سرعت عبور نمونه‌ها از داخل سیم-پیچ القاء جریان و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای اثرگذار، عمق‌های سخت شده متفاوتی ایجاد شد. (شرایط عملیات سخت کاری القائی در جدول ۱ نشان داده شده است). بعد از انجام عملیات حرارتی، به منظور انجام بررسی‌های متالوگرافی و میکروسختی سنجی، قرص‌هایی به ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر از نمونه‌ها تهیه و عملیات سمباده زنی و پولیش روی آن‌ها صورت گرفت.

#### ۳-۲ تعیین مخرب عمق لایه سخت شده با روش میکروسختی سنجی

در شکل ۱، تصاویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی از ریزساختار نمونه‌ای که با سرعت ۶ mm/s سخت کاری القایی شده، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لایه سطحی (قسمت سخت شده) دارای ریزساختار مارتنزیتی بوده که از ریز ساختار فریت-پرلیتی در قسمت داخلی نمونه که متأثر از عملیات حرارتی نبوده، متمایز می‌باشد. در پژوهش حاضر، سختی در دو فاز مارتنزیتی در قسمت سخت شده در محدوده ۶۴۰-۶۲۵ ویکرز (بعد از تنش‌گیری) و فاز فریت-پرلیت در قسمت مرکزی نمونه ۲۳۵-۲۳۰ ویکرز می‌باشد.

بنابر استاندارد ISO 3754، عمق سخت شده‌ی کل (TCD)<sup>۳</sup> (فاصله از سطح نمونه سخت شده به سمت مرکز تا جایی که مقادیر سختی تقریباً ثابت و برابر با سختی مرکز نمونه شود)، اندازه‌گیری شد. در شکل ۲، پروفیل سختی قطعه با بیشترین عمق لایه سخت شده که با سرعت ۶ میلی‌متر بر ثانیه از داخل سیم پیچ القاء جریان عبور داده شده، نشان داده شده است. مقادیر TCD با استفاده از پروفیل‌های رسم شده و اندازه‌گیری مطابق با استاندارد تعریف شده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

<sup>3</sup> Total Case Depth

#### ۴- تحلیل عدم قطعیت در آزمون جریان گردابی

به منظور تعیین خروجی آزمون جریان گردابی (امپدانس نرماله شده)، ولتاژ پیک تا پیک از یک سر سیم پیچ ( $V_1$ )، از کانال ۱ ( $Ch_1$ ) و ولتاژ پیک تا پیک دوسر مقاومت ( $V_2$ ) از کانال ۲ ( $Ch_2$ ) مطابق شکل ۳، قرائت می شود. با تقسیم  $V_1$  بر  $I$  (جریان)، امپدانس سیم پیچ اندازه گیری می شود. به منظور اندازه گیری  $I$ ، با قرار دادن یک مقاومت  $0.33 \Omega$  اهمی در مسیر جریان و ثبت ولتاژ ( $V_2$ ) می توان جریان را به طور غیرمستقیم اندازه گیری نمود. چگونگی محاسبه امپدانس سیم پیچ توسط رابطه ۴ نشان داده شده است [۱۶].

$$Z = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{(V_2 / R)} \quad (4)$$

در مرحله بعدی با تقسیم امپدانس نمونه ها بر امپدانس سیم پیچ خالی (بدون نمونه)، بی بعد سازی صورت پذیرفته و خروجی امپدانس نرماله شده حاصل خواهد شد.

در این پژوهش به منظور تعیین خطای اتفاقی حاصل از اندازه گیری ها، برای هر نمونه ۱۰ بار ولتاژهای اولیه و ثانویه اندازه گیری شد. با در نظر گرفتن مقادیر میانگین برای  $V_1$  و  $V_2$  و استفاده از رابطه ۴، مقادیر امپدانس نرماله شده ( $Z/Z_0$ ) محاسبه شد. در ادامه جهت به دست آوردن معادله کاهش داده ها از ارتباط خطی ایجاد شده بین امپدانس نرماله شده و عمق لایه سخت شده (شکل ۴)، بهره گرفته شد.

همان طور که مشاهده می شود با افزایش امپدانس نرماله شده، عمق لایه سخت شده کاهش می یابد. دلیل این رفتار ناشی از تفاوت نفوذپذیری مغناطیسی ریزساختارهای سطح و مغز نمونه ها می باشد که به طور مستقیم بر میزان القای جریان و در نتیجه خروجی آزمون جریان گردابی اثر می گذارد. تحلیل رفتار کاهش خروجی ها بر حسب عمق لایه سخت شده به طور مفصل در مقاله گذشته مؤلفین صورت پذیرفته است [۱۷]. ضریب همبستگی بالای حاصل شده از این ارتباط، نشان دهنده رابطه خطی قابل قبول و در نتیجه تطابق زیاد بین مقادیر بدست آمده عمق سخت شده و مقادیر حاصل از معادله بدست آمده، می باشد. رابطه ۵، ارتباط خطی میان عمق سخت شده (که از روش سختی سنجی اندازه گیری شده) و امپدانس نرماله شده را نشان می دهد که این رابطه به عنوان معادله کاهش داده ها در نظر گرفته می شود.

$$d = -423.18(Z / Z_0) + 67.793 \quad (5)$$

با توجه به رابطه ۴ و در نظر گرفتن امپدانس نرماله شده، رابطه ۶، حاصل خواهد شد. با استفاده از این رابطه با اندازه گیری پارامترهای  $V_1$  و  $V_2$ ، امکان تعیین عمق لایه سخت شده می باشد.

$$d = -1.163745 \left( \frac{v_1}{v_2} \right) + 67.793 \quad (6)$$

در جدول ۳، مقادیر عمق لایه سخت شده در دو حالت اندازه‌گیری شده با روش سختی سنجی ( $d_{True}$ ) و روش جریان گردابی ( $d_{EC}$ ) نمایش داده شده است.

#### ۴-۱ تحلیل عدم قطعیت اندازه‌گیری عمق لایه سخت شده

اکنون با داشتن معادله کاهش داده‌ها می‌توان روابط مربوط به محاسبه عدم قطعیت را روی آن اعمال نمود. همان‌گونه که در رابطه ۷ ملاحظه می‌شود، عمق لایه سخت شده تابعی از ۲ پارامتر است که لازم است نسبت به هر یک از آن‌ها مشتق‌گیری انجام شود.

$$d = f(v_1, v_2) \quad (7)$$

با در اختیار داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای  $V_1$  و  $V_2$  و میانگین آنها ( $\bar{v}$ ) و استفاده از روابط ۸ و ۹، انحراف معیار استاندارد حاصل از اندازه‌گیری‌ها ( $S_v$ ) و عدم قطعیت اتفاقی ( $P_v$ ) هر پارامتر قابل محاسبه می‌باشد [۱۵].

$$S_v = \left( \frac{\sum_{k=1}^{10} [v_k - \bar{v}]^2}{10-1} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$P_v = \frac{2S_v}{\sqrt{10}} \quad (9)$$

جهت تخمین میزان خطای سیستماتیک ( $B_v$ )، از اطلاعات شرکت سازنده اسیلوسکوپ که عدد ۰/۰۳ میلی‌ولت را گزارش کرده‌اند، استفاده شد. بنابراین با محاسبه خطای اتفاقی ( $P_v$ ) و داشتن ( $B_v$ ) و استفاده از رابطه ۱۰، می‌توان عدم قطعیت کل ( $U_v$ ) برای پارامترهای  $V_1$  و  $V_2$  را بدست آورد. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل ۵ نمایش داده شده است.

$$U_v = \sqrt{B_v^2 + P_v^2} \quad (10)$$

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، عدم قطعیت‌های حاصل شده در اندازه‌گیری پارامتر  $V_1$  بسیار بزرگ‌تر از عدم قطعیت حاصل از پارامتر  $V_2$  می‌باشد. این امر نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که در قرائت پارامترهای موجود در معادله کاهش، در خواندن پارامتر  $V_2$  باید دقت بیشتری نمود چرا که عدم قطعیت بالای آن منجر به ایجاد خطای بیشتری در تعیین غیرمخرب عمق لایه سخت شده می‌شود.

در ادامه به منظور محاسبه عدم قطعیت حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه سخت شده ( $U_d$ )، به طریق زیر عمل می‌نماییم. با مشتق‌گیری از رابطه ۶، نسبت به پارامترهای  $v_1$  و  $v_2$  روابط ۱۱ و ۱۲ حاصل می‌شوند.

$$\frac{\partial d}{\partial v_1} = \frac{-1.163745}{v_2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial d}{\partial v_2} = \frac{1.163745 \times v_1}{v_2^2} \quad (12)$$

در نهایت با در نظر گرفتن روابط کلی ۲ و ۳، عدم قطعیت در اندازه گیری غیرمخرب عمق لایه سخت شده ( $U_d$ )، فاکتورهای بزرگنمایی عدم قطعیت ( $UMF_{v_2}, UMF_{v_1}$ ) و نسبت عدم قطعیت عمق لایه سخت شده ( $U_d / d$ ) با استفاده از روابط ۱۳ تا ۱۶ محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۴ نمایش داده شده است. همچنین با استفاده از معادله کاهش به دست آمده، مقادیر عمق سخت شده با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی ( $d_{EC}$ ) محاسبه شده و در جدول ۴ نیز نشان داده شده است.

$$U_d^2 = \left(\frac{\partial d}{\partial v_1}\right)^2 U_{v_1}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial v_2}\right)^2 U_{v_2}^2 = \left[\left(\frac{-1.163745}{v_2}\right)^2 * U_{v_1}^2\right] + \left[\left(\frac{1.163745 * v_1}{v_2^2}\right)^2 * U_{v_2}^2\right] \quad (13)$$

$$UMF_{v_1} = \left(\frac{v_1}{d} \frac{\partial d}{\partial v_1}\right) = \left[v_1 / (-1.163745 * \left(\frac{v_1}{v_2}\right) + 67.793)\right] * \left(\frac{-1.163745}{v_2}\right) \quad (14)$$

$$UMF_{v_2} = \left(\frac{v_2}{d} \frac{\partial d}{\partial v_2}\right) = \left[v_2 / -1.163745 * \left(\frac{v_1}{v_2}\right) + 67.793\right] * \left(\frac{1.163745 * v_1}{v_2^2}\right) \quad (15)$$

$$\left(\frac{U_d}{d}\right)^2 = (UMF_{v_1})^2 \left(\frac{U_{v_1}}{v_1}\right)^2 + (UMF_{v_2})^2 \left(\frac{U_{v_2}}{v_2}\right)^2 \quad (16)$$

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش میزان عدم قطعیت عمق لایه سخت شده با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی محاسبه شد. نتیجه بدست آمده نشان دهنده مقادیر بالاتر عدم قطعیت اتفاقی در مورد پارامتر  $V_1$  در مقایسه با پارامتر  $V_2$  می‌باشد. لذا به منظور کاهش عدم قطعیت کل، باید دقت بیشتری در اندازه گیری  $V_1$  صرف نمود. همچنین عدم قطعیت‌های کل بدست آمده برای مقادیر حاصل از روش جریان گردابی بیانگر این مطلب است که روش غیرمخرب پیشنهادی، در تعیین عمق سخت شده با ضخامت‌های بیشتر، عدم قطعیت کمتر یا به عبارت دیگر دقت بالاتری خواهد داشت.

## ۶- مراجع

- [1] D. E. Bray, R. K. Stanley, "Nondestructive evaluation: a tool design, manufacturing and service", CRC Press, Boca Raton FL, 1997.
- [2] D. J. Hagemair, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, 1990.
- [3] S. Konoplyuk, T. Abe, T. Uchimoto, T. Takagi, "Characterization of ductile cast iron by eddy current method", NDT&E International, 2005, 38, pp. 623-626.
- [4] J. Cech, "Measuring the mechanical properties of cast irons by NDT methods, NDT International", 1990, 23, pp. 93-102.



- [5] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, "Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing", NDT&E International, 2006, 39, pp. 652-660.
- [6] M. Blaow, J. T. Evans, B.A. Shaw, "Surface decarburisation of steel detected by magnetic barkhausen emission, Journal of Materials Science", 2005, 40, pp. 5517-5520.
- [7] J. Degauque, B. Astie, J. L. Porteseil, R. Vergne, Influence of the grain size on the magnetic and magneto mechanical properties of high-purity iron, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1982, 26, pp. 261-263.
- [8] S. H. Khan, F. Ali, A. Nusair Khan, M. A. Iqbal, "Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method", Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200, pp. 316-318.
- [9] M. SheikhAmiri, M. Kashefi, "Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels", NDT & E International, 2009, 42, pp. 618-621.
- [10] C. Zhang, N. Bowler and C. Lo, "Magnetic characterization of surface-hardened steel", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321, pp. 3878-3887.
- [11] C. H. Lo, E. R. Kinser, Y. Melikhov, D. C. Jiles, "Magnetic nondestructive characterization of case depth in surface-hardened steel components", in: D.O. Thompson, D.E. Chimenti (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 25B, AIP Conference Proceedings, 2006, 820, pp. 1253-1260.
- [۱۲] مرتضی دشتی زاده، فرهنگ هنرور، "استفاده از روش استاندارد تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری عمق عیوب روش فراصوتی زمان پرواز پراش"، هشتمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی ایران، تهران، ۱۳۸۶، ص ۲۳۲-۲۱۹.
- [13] Dieck, R. H., "Measurement Uncertainty: Methods and application" Third edition, ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society., USA, 2002
- [14] "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)", ISO, First Edition, 1995.
- [15] Coleman, H. W. and Steele, W. G., Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.
- [16] J. Shull Peter, Nondestructive evaluation theory, techniques and applications, New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [17] S. Kahrobaee, M. Kashefi, "Hardness profile plotting using multi-frequency multi-output electromagnetic sensor", NDT and E International, 2011, 44, pp. 335-338.

جدول ۱: شرایط عملیات سخت کاری القائی

فرکانس (KHz)	توان (Kw)	سرعت عبور قطعات از سیم پیچ القاء جریان (mm/s)						
۳۰	۵۰	۶	۷/۵	۸	۸/۵	۹/۵	۱۰	۱۱/۵
شماره نمونه		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷

جدول ۲: اندازه عمق های مؤثر و کل با استفاده از رسم پروفیل سختی

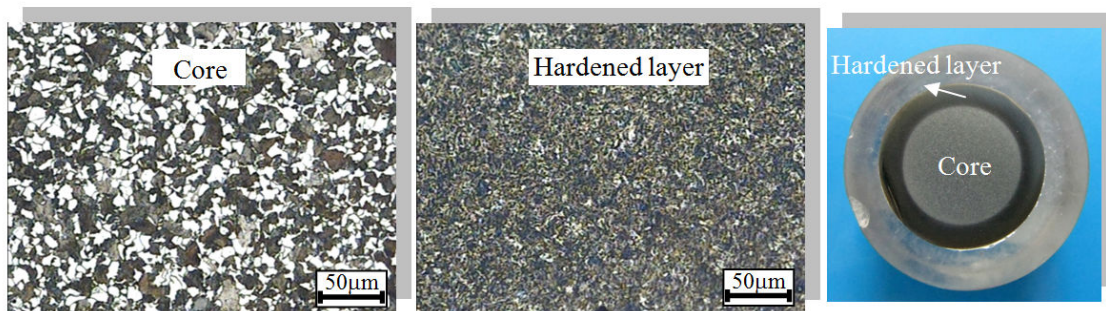
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
TCD (mm)	۵/۶	۴/۲	۳/۴	۴	۳/۲	۲/۶	۲/۴

جدول ۳: عمق لایه سخت شده واقعی و اندازه گیری شده.

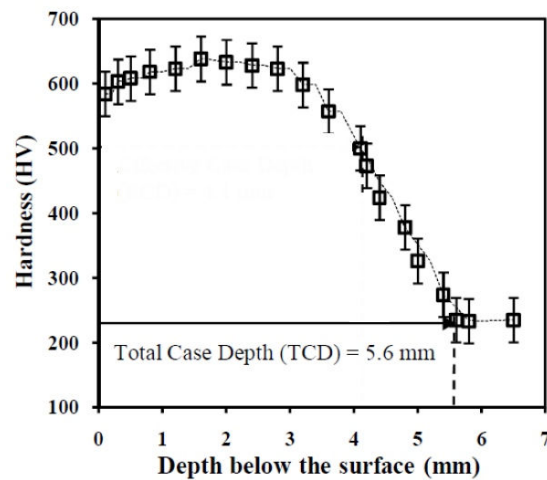
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$d_{True}$ (mm)	۵/۶	۴/۲	۳/۴	۴	۳/۲	۲/۶	۲/۴
$d_{EC}$ (mm)	۵/۴۱	۴/۳۱۲	۳/۱۶	۴/۰۷	۳/۵۳	۲/۵۸	۲/۳۰

جدول ۴: محاسبه عدم قطعیت و فاکتور بزرگنمایی نمونه‌ها.

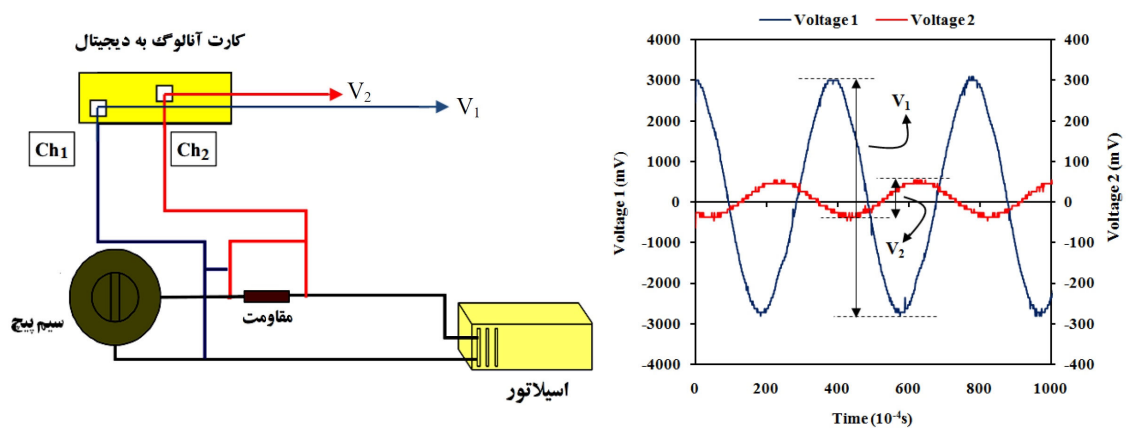
نمونه	۱	۲	۳	۴	۴	۵	۶
$d_{True}$ (mm)	۵/۶	۴/۲	۳/۴	۴	۳/۲	۲/۶	۲/۴
$d_{EC}$ (mm)	۵/۴۱	۴/۳۱۲	۳/۱۶	۴/۰۷	۳/۵۳	۲/۵۸	۲/۳۰
$U_d$ (mm)	۰/۷۸۱	۰/۶۸۰	۰/۸۶۴	۰/۸۱۷	۰/۷۶۳	۰/۷۸۷	۰/۸۴۹
$U_d / d$	۰/۳۱۷	۰/۲۷۰	۰/۳۲۸	۰/۳۳۵	۰/۳۱۲	۰/۳۱۹	۰/۳۴۲



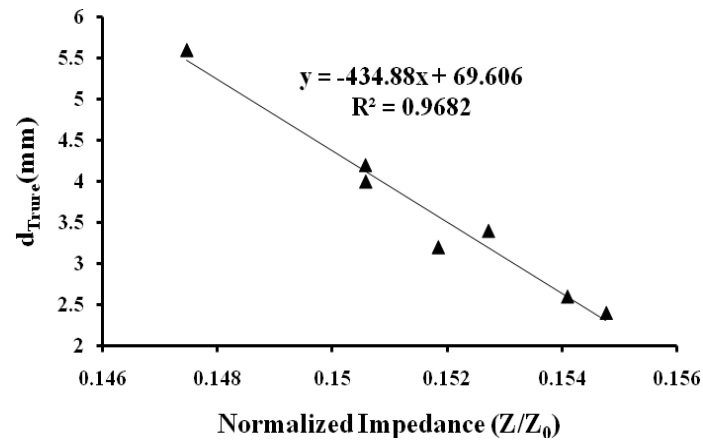
شکل ۱: تصاویر میکروسکوپی و میکروسکوپی از ریزساختار لایه سخت شده (مارتنزیت) و ریزساختار قسمت مرکزی نمونه (فريت-پرليت).



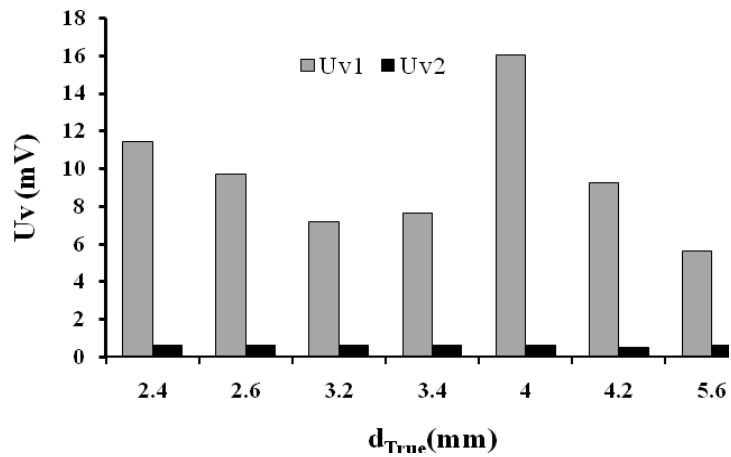
شکل ۲: پروفیل سختی برای نمونه‌های با بیشترین عمق لایه سخت شده.



شکل ۳: نمای توصیفی مدار بکار گرفته شده جهت ثبت خروجی آزمون جریان گردابی (امپدانس) و چگونگی اندازه گیری ولتاژ اولیه ( $V_1$ ) و ثانویه ( $V_2$ ).



شکل ۴: نمودار تغییرات امپدانس نرماله شده برحسب عمق لایه سخت شده.



شکل ۵: تغییرات عدم قطعیت پارامترهای  $V_1$  و  $V_2$  برای نمونه‌ها با عمق‌های سخت شده متفاوت.