



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

# Founding Research Journal

## Evaluation of Microstructure and Hardness of Heat Treated Cast Steel by Eddy Current Nondestructive Method

Mojtaba Javahery<sup>1</sup>, Majid Abbasi<sup>2\*</sup>

1. MSc. in Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

2. Associate Professor, Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

Received 16 December 2017  
Accepted 31 March 2018

### Abstract:

In this paper, the nondestructive eddy current method was used for evaluation of microstructure and hardness of the heat treated cast steel. For this purpose, eight reference samples in same sizes were prepared from the cast block of hypereutectoid low alloy steel called FMU-226 and then the samples were heat treated under different cycles such as full annealing, quenching and quench-tempering. The microstructural studies were performed using scanning electron microscope (SEM), optical microscope and Vickers hardness (HV) instrument as destructive tests. Then, the microstructure and hardness of the samples were evaluated nondestructively by an eddy current test device at different frequencies. The capacities of different eddy current characters such as resistivity, inductive reactance, impedance and resistivity to impedance ratio were examined for developing a mathematical model to hardness measuring and microstructural recognitions. The results showed that the eddy current method can be nondestructively recognized and separated the steel parts according to their microstructure and hardness, rapidly. It was recognized that the eddy current characters were related to the current frequency, variation of retained austenite content in matrix, type of matrix microstructure and carbides morphologies. By using of impedance plane in the eddy current test at 20 kHz, it can be visually detected the microstructure of the heat treated steel. In addition, the impedance ( $Z$ ) at this frequency was recognized as proper eddy current character for hardness measuring and the special equation for quality control of the heat treated steel was presented.

### Keywords:

Eddy current,  
Nondestructive evaluation,  
Quality control,  
Microstructure,  
Hardness.

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)

### Please cite this article using:

Javahery M., Abbasi M., Evaluation of Microstructure and Hardness of Heat Treated Cast Steel by Eddy Current Nondestructive Method, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 1(3) 149-160.  
DOI: 10.22034/FRJ.2018.101534.1001

### \* Corresponding Author:

Majid Abbasi, Associate Professor

Address: Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran,  
P.O. Box 47148-71167, Tel.: +98 11 35501806, Fax: +98 11 35501801.

E-mail: [abbasim@nit.ac.ir](mailto:abbasim@nit.ac.ir)



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل‌نامه علمی پژوهشی

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### ارزیابی ریزساختار و سختی فولاد ریختگی عملیات حرارتی شده با آزمون غیرمخرب جریان گردابی

مجتبی جواهری<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل. javahery\_mojtaba@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل abbasim@nit.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۵

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۱۱

در این تحقیق از روش غیرمخرب جریان گردابی برای ارزیابی و تشخیص ریزساختار و سختی یک فولاد ریخته‌گری بعد از انجام عملیات حرارتی، استفاده شد. به این منظور هشت نمونه شاهد یکسان از شمش فولاد ریخته‌گری هایدروژن‌زدایی کم‌آلیاژ موسوم به FMU-226 تهیه شده و سپس تحت سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی نظیر آنیل کامل، کوئنچ و کوئنچ-تمپر قرار گرفتند. مطالعات ریزساختاری با میکروسکپ الکترونی روبشی، میکروسکپ نوری و سختی‌سنجی به روش ویکرز به عنوان آزمون‌های مخرب انجام شد. در ادامه با استفاده از یک دستگاه جریان گردابی به صورت غیرمخرب، ریزساختار و سختی نمونه‌ها در فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. قابلیت شاخص‌های مختلف جریان گردابی از جمله مقاومت اهمی، مقاومت القایی، امپدانس و نسبت مقاومت اهمی به امپدانس برای توسعه یک مدل ریاضی با سختی و برای تحلیل ریزساختار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از روش جریان گردابی به صورت غیرمخرب و سریع، این قطعات فولادی را بر حسب ریزساختار و سختی از یکدیگر شناسایی و تفکیک کرد. مشخص شد که شاخص‌های جریان گردابی تابعی از فرکانس جریان، تغییرات میزان آستنیت باقیمانده، نوع ریزساختار زمینه و مورفولوژی کاربیدها است. با استفاده از نقشه امپدانس دستگاه جریان گردابی در فرکانس ۲۰ kHz، به صورت گرافیکی می‌توان نوع ریزساختار زمینه را تشخیص داد. همچنین امپدانس سیم‌پیچ (Z) در این فرکانس، مناسب‌ترین شاخص جریان گردابی برای سختی‌سنجی شناسایی شد و رابطه‌ای اختصاصی آن برای کنترل کیفیت قطعات عملیات حرارتی شده از این فولاد ارائه شده است.

#### واژه‌های کلیدی:

جریان گردابی،  
ارزیابی غیرمخرب،  
کنترل کیفیت،  
ریزساختار،  
سختی.

#### ۱- مقدمه

آنها با یکدیگر سبب شده تا روش‌های پیشرفته و مکانیزه‌ای برای ارزیابی‌های غیرمخرب قطعات صنعتی توسعه یابد. بنابراین روش‌های ارزیابی غیرمخرب، برای اندازه‌گیری مشخصه‌های کمی و کیفی مانند سختی، ضخامت لایه سخت‌شده، ضخامت پوشش‌ها، درصد فازها در ریزساختار، اندازه دانه، تنش‌پسماند و غیره هم می‌توان استفاده نمود. آزمون‌های فراصوتی، نشر صوت و جریان گردابی نمونه‌هایی از این روش‌ها هستند [۳-۵].

آزمون جریان گردابی در مقایسه با دیگر روش‌های ارزیابی غیرمخرب نظیر فراصوت، آواسنجی و اشعه ایکس، ارزان، مطمئن، بسیار سریع و ایمن است. بنابراین استفاده از این

یکی از راهبردهای مرسوم برای تضمین و کنترل کیفیت قطعات صنعتی، استفاده از روش‌های بازرسی غیرمخرب است که سلامت قطعات بعد از آزمون محفوظ می‌ماند. با آزمون‌های متداول غیرمخرب نظیر مایع نافذ، ذرات مغناطیس و رادیوگرافی، عیوب موجود در قطعات نظیر ترک‌ها و ناپیوستگی‌های سطحی و زیرسطحی، مک‌های گازی و انقباضی را می‌توان شناسایی نمود ولی نمی‌توان با این روش‌ها ارزیابی صحیحی از ریزساختار و سختی به عمل آورد و یا آنها را به صورت خودکار و مکانیزه انجام داد [۱، ۲]. امروزه توسعه علوم و فناوری‌های مختلف و تلفیق

محققان متعددی از آزمون جریان گردابی برای تحلیل‌های متالورژیکی استفاده کردند. به عنوان نمونه، کونوپلایک و همکاران [۱۰،۱۱] درصد پرلیت در ریزساختار فولاد، کاشفی و همکاران [۱۲] تردی تمپر در یک فولاد کم آلیاژ، پریورتوف و همکاران [۱۳] پدیده دکربوره شدن روی سطح فولاد فتر، سکین و همکاران [۱۴] اثر کار سرد و اعمال تنش‌های فشاری سطحی به روش CSP<sup>۱</sup> بر روی سطح فولاد ابزار گرم‌کار، اسدی و همکاران [۱۵] مقدار آستنیت باقی‌مانده در ریزساختار چدن ناپهارد نوع ۴، خان و همکارانش [۱۶] تغییرات ایجاد شده در فولاد زنگ‌نزن در اثر کار سرد را با استفاده از فنون مختلف جریان گردابی مورد بررسی قرار دادند، همچنین از کاربردهای دیگر این روش غیرمخرب می‌توان به اندازه‌گیری ضخامت لایه پوشش اشاره نمود که شاملی و همکاران [۱۷] ضخامت‌های متفاوت از یک پوشش غیرمغناطیسی بر روی فولاد را ارزیابی نمودند. همچنین می‌توان به کاربرد جریان گردابی برای فلزات غیرآهنی اشاره نمود. به عنوان نمونه، حسینی و همکاران [۱۸] اثر پیرسازی بر ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ و روزن و همکاران [۱۹] اثر همین عملیات حرارتی بر ریزساختار و هدایت الکتریکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را با آزمون غیرمخرب جریان گردابی بررسی نمودند.

هدف از انجام این تحقیق، توسعه روش جریان گردابی برای کنترل کیفیت غیرمخرب قطعات ریختگی از جنس یک فولاد کم آلیاژ است تا قطعات عملیات حرارتی شده با ریزساختارها و سختی‌های متفاوت قابل تفکیک باشند.

## ۲- روش تحقیق

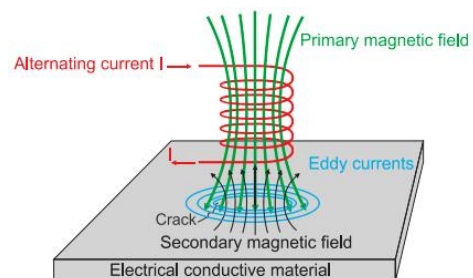
### ۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌های شاهد

در جدول (۱)، ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق (فولاد هایپریوتکتوئیدی کم آلیاژ) ارائه شده است. از این فولاد برای ساخت قطعات ریختگی مقاوم به سایش در آسیاهای گلوله‌ای سنگ آهن استفاده می‌شود. تعداد ۸ بلوک شاهد (مرجع) با ابعاد ۱۰۰×۸۰×۲۰ mm از قطعه فولادی ریخته‌گری شده، مورد استفاده قرار گرفت. سپس مطابق جدول (۲)، از سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی برای دستیابی به ریزساختار و سختی متفاوت استفاده شد.

روش در بازرسی‌های صددرد قطعات صنعتی و به شکل مکانیزه به ویژه در صنایع قطعه‌سازی خودرو به شدت در حال گسترش است [۶].

هر فلز یا آلیاژی، دارای خواص الکتریکی و مغناطیسی مشخصی است. البته در اثر عوامل متعددی نظیر تغییرات جزئی در ترکیب شیمیایی، فرایند تولید و در نتیجه ایجاد تغییرات در ریزساختار، خواص الکتریکی و مغناطیسی ماده قابل تغییر است [۷،۸]. آزمون جریان گردابی به این نوع تغییرات ریزساختار بسیار حساس است. به عبارت دیگر شناسایی تغییرات خواص الکتریکی و مغناطیسی ماده ناشی از تغییرات ریزساختار، مبنای اصلی بازرسی غیرمخرب جریان گردابی است [۹].

در شکل (۱)، سیستم ارزیابی جریان گردابی نشان داده شده است. با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ، در داخل و اطراف سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که موسوم به میدان مغناطیسی اولیه است. با نزدیک شدن سیم‌پیچ به سطح یک ماده رسانا، میدان مغناطیسی سیم‌پیچ، جریان‌هایی در داخل ماده القاء می‌کند که جریان‌های گردابی نامیده می‌شود. جریان‌های گردابی تشکیل شده در ماده نیز باعث تشکیل یک میدان ثانویه در قطعه می‌شود. بر اساس قانون لنز، جهت جریان القایی به گونه‌ای است که میدان ناشی از آن با میدان ناشی از جریانی که آن را ایجاد کرده، مخالفت می‌کند [۱]. حضور عیب یا ترک و تغییر ریزساختار موجب می‌شود که حرکت جریان گردابی دچار اختلال شود، این تغییرات بر روی میدان ثانویه تاثیر گذاشته و در ادامه منجر به اختلاف میان میدان ثانویه و اولیه می‌شود. این تاثیرات و ارتباط آنها با تغییرات متالورژیکی در آلیاژ را می‌توان از طریق اندازه‌گیری ولتاژ و جریان دو سر سیم‌پیچ یا تحلیل امپدانس سیم‌پیچ ارزیابی و تحلیل کرد. همچنین می‌توان موقعیت این مقادیر را روی صفحه نمایش گر (اسیلوسکوپ) مشاهده نمود [۳،۱].



شکل ۱- تصویر نمادین از سیستم ارزیابی به روش جریان گردابی [۱].

<sup>۱</sup> Cavitation Shotless Peening

برای ارزیابی اندازه دانه‌های آستنیت اولیه و آشکارسازی مرزخانه، نمونه‌های شاهد متالوگرافی جداگانه‌ای قبل از عملیات حرارتی بلوک‌های شاهد تهیه شده است. این نمونه شاهد متالوگرافی سنباده و پولیش شده و سپس در داخل کوره به همراه نمونه اصلی (بلوک مرجع جریان گردابی) آستنیت شدند. بعد از پایان عملیات آستنیت، نمونه شاهد متالوگرافی در آب سرد شد. سپس با اندکی پولیش و اچ توسط محلول نایتال، مرزخانه‌های آستنیت اولیه قابل تشخیص است.

## ۲-۲- آزمون غیرمخرب جریان گردابی

در شکل (۲)، تجهیزات به کار رفته برای ارزیابی غیرمخرب نشان داده شده است که شامل سه بخش اصلی، دستگاه جریان گردابی، پراب (سیم‌پیچ) و بلوک‌های شاهد است. از دستگاه جریان گردابی پرتابل، ساخت شرکت ایرانیان هیبرید مدل IH-ECP۱۰۳ و از یک پراب مطلق (سیم‌پیچ ساده با هسته فريتی) با فرکانس کاری در محدوده ۱۰۰ Hz الی ۱۰۰ kHz استفاده شد که مشخصات آن در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین از یک نگه‌دارنده (فیکسچر) برای قرارگیری صحیح پراب روی نمونه‌ها به کار برده شد. در صفحه نمایش‌گر دستگاه، تغییرات امپدانس، مقاومت القایی و مقاومت اهمی پراب وقتی در موقعیت‌ها مختلف یا روی بلوک‌های شاهد مختلف قرار می‌گیرد، به دو صورت دیجیتالی و گرافیکی (نقطه سبز رنگ) نشان داده می‌شود. در این تحقیق، بلوک‌های شاهد همان نمونه‌های فولادی ریخته‌گی هستند که در شرایط مشخصی تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند و مشخصات متالورژیکی آنها با آزمون‌های متالوگرافی و سختی‌سنجی ویکرز مشخص شد. کالیبراسیون دستگاه به این گونه است که بعد از اتصال پراب به دستگاه و تنظیم فرکانس، پراب روی نمونه شاهد مرکزی قرار داده می‌شود. نمونه شاهد مرکزی یکی از همین بلوک‌های شاهد است که سختی آن در میانه سختی سایر بلوک‌ها است و نقطه متعلق به آن (Null point) می‌تواند در مرکز صفحه نمایش تنظیم شود و مبنای مقایسه و نرمال کردن داده‌های دیجیتالی دستگاه است. در این تحقیق از بلوک QT61 به عنوان نمونه شاهد مرکزی استفاده شد. وقتی پراب روی نمونه شاهد مرکزی قرار دارد، با فشردن کلید F1 به صورت هوشمند و خودکار، دستگاه نسبت به این نمونه تنظیم می‌شود و در ادامه، تغییرات امپدانس پراب در

از کوره عملیات حرارتی مافلی با دقت دمایی  $10^{\circ}\text{C}$  بکار گرفته شد. برای جلوگیری از اکسید شدن سطحی، نمونه‌ها با لایه‌ای از دانه‌های ماسه شاموتی همراه با مقدار جزئی پودر ذغال محافظت شدند. بعد از انجام عملیات حرارتی، تمامی نمونه‌ها سنگ‌زده شده و در پایان با سنباده شماره ۸۰۰، زبری سطح همه یکنواخت شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی).

Fe	S	P	Mo	Cr	Mn	Si	C
مابقی	۰/۰۲۹	۰/۰۳۳	۰/۳۸	۲/۳۱	۰/۹۵	۰/۶۰	۰/۸۳

جدول ۲- سیکل‌های عملیات حرارتی اعمال شده روی نمونه‌های شاهد.

کد نمونه	نوع عملیات	دما/ زمان عملیات آستنیت‌زایی	محیط خنک‌کننده	دما/ زمان عملیات برگشت
A8	آنیل	$1850^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min	کوره	-
A9	کامل	$1950^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min	( $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	-
Q	کوئنچ			
QT31	کوئنچ- تمپر	$1850^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min	روغن $80^{\circ}\text{C}$	$300^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min
QT41				$450^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min
QT61				$600^{\circ}\text{C}$ ۶۰ min
QT62				$600^{\circ}\text{C}$ ۱۲۰ min
QT63				$600^{\circ}\text{C}$ ۱۸۰ min

برای مطالعه میکروسکوپی از بلوک‌های شاهد عملیات حرارتی شده، نمونه‌های متالوگرافی تهیه شد. نمونه‌ها پس از حکاکی با محلول پیکرال ۴ درصد حجمی با میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. از تمامی نمونه‌های شاهد آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز با حداقل ۵ بار تکرار به عمل آمد. به این منظور از دستگاه کوپاپژوهش با نوک الماسه هرمی و با قاعده مربعی شکل و زاویه راس  $136^{\circ}$  تحت نیروی ۱۰ کیلوگرمی در زمان ۳۰ ثانیه استفاده شد.

می‌توان آنها را از روی صفحه نمایشگر دستگاه قرائت و ثبت نمود. رابطه (۱) ارتباط بین این مقادیر سه گانه پراب را نشان می‌دهد:

$$Z = \frac{V}{\sqrt{X_L^2 + R_x^2}} = \frac{V}{I} \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، امپدانس پراب با مقاومت القایی ( $X_L$ )، مقاومت اهمی ( $R_x$ )، ولتاژ ( $V$ ) و جریان ( $I$ ) گذرنده از پراب (سیم‌پیچ) ارتباط دارد.

نمایش‌گر دستگاه میزان امپدانس سیم‌پیچ را به صورت موقعیت مکانی (نقطه سبز رنگ) نمایش می‌دهد. همچنین مقادیر دیجیتالی امپدانس، مقاومت القایی و مقاومت اهمی سیم‌پیچ بعد از پردازش‌های الکترونیکی و نرمال شدن نسبت به مقادیر نمونه شاهد مرکزی روی صفحه نمایش‌گر دستگاه قابل مشاهده و ثبت است. با استفاده از این داده‌ها و با کمک آنالیز رگرسیون خطی از شاخص‌های مختلف جریان گردابی نظیر  $X_L$ ،  $R_x$ ،  $Z$  و نسبت  $\frac{R_x}{Z}$  برای تحلیل‌های متالورژیکی و شناسایی ارتباط بین آنها استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی مخرب ریزساختاری و سختی‌سنجی

شکل‌های (۳) و (۴)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نوری از ریزساختارهای مختلف بلوک‌های مرجع را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۳)، ریزساختار نمونه‌های A8 و A9 کاملاً پرلیتی است که از استحاله تعادلی یوتکتوئیدی حاصل شده است. مشاهده می‌شود که فاصله میان لایه‌ها، توزیع کاربیدها در مرزدانه‌های آستنیت و همچنین اندازه دانه‌ها با تغییر دمای آستنیت تغییر یافته است. با افزایش دمای آستنیت، اندازه دانه‌های آستنیت افزایش و در مقابل فاصله میان لایه‌های پرلیت کاهش یافته و رسوب کاربیدهای ثانویه در مرزدانه بیشتر می‌شود [۲۰]. با افزایش دمای آستنیت کردن، کاربیدهای کروم بیشتری در زمینه حل شده و در نتیجه غلظت کروم محلول در آستنیت افزایش می‌یابد. افزایش کروم محلول در آستنیت سبب می‌شود، کلونی‌های پرلیت حاصل استحاله یوتکتوئیدی کوچک‌تر و فاصله لایه‌های پرلیت هم ظریف‌تر شود. در مقابل با کاهش دمای آستنیت کردن و عدم انحلال کامل

موقعیت‌های مختلف نسبت به این نمونه سنجیده می‌شود. این عمل باعث می‌شود که تغییرات مشاهده شده از نمونه‌های مختلف در صفحه نمایش در اطراف نقطه مرکزی باشد و بازرسی با قدرت تفکیک بالا انجام پذیرد.

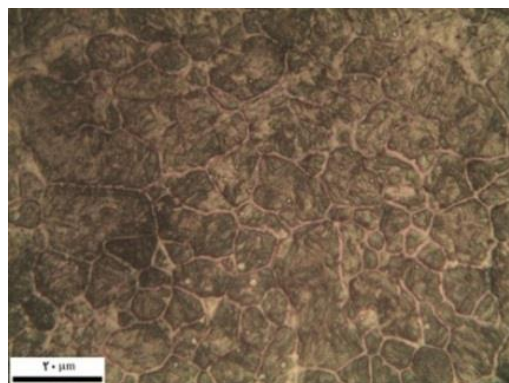


شکل ۲- تجهیزات بازرسی غیرمخرب: الف) دستگاه جریان گردابی مدل IH-ECP103، ب) تصویری از پراب و نگهدارنده آن روی بلوک فولادی.

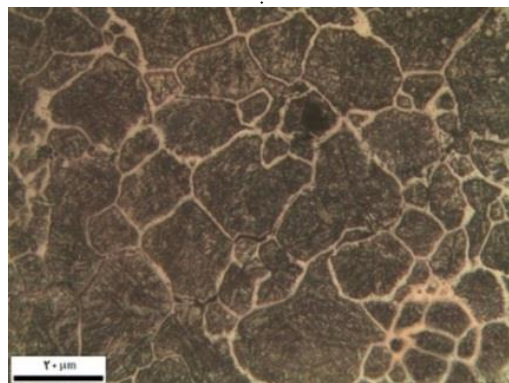
جدول ۳- مشخصات پراب برای آزمون جریان گردابی.

مشخصات	اندازه (mm)
ضخامت سیم	۰/۳۵
تعداد دور سیم‌پیچ	۲۰۰
قطر هسته	۱۰
قطر خارجی سیم‌پیچ	۱۳
ارتفاع هسته	۵۰
ارتفاع سیم‌پیچ	۴۰

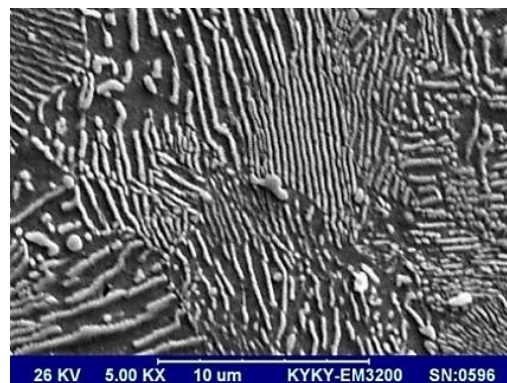
هر بار که پراب روی یکی از بلوک شاهد مختلف قرار می‌گیرد، مقادیر سه گانه امپدانس ( $Z$ )، مقاومت القایی ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی ( $R_x$ ) پراب به علت تغییرات ریزساختاری و یا سختی در بلوک‌ها، تغییر می‌کند که



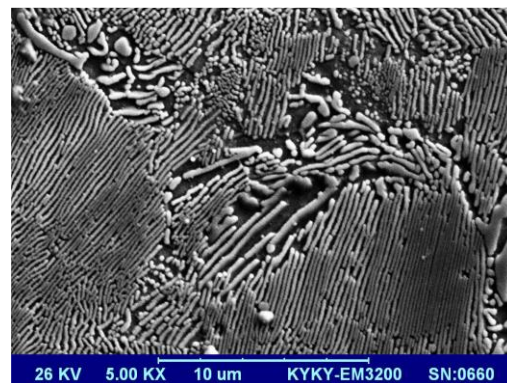
ب



ت



الف

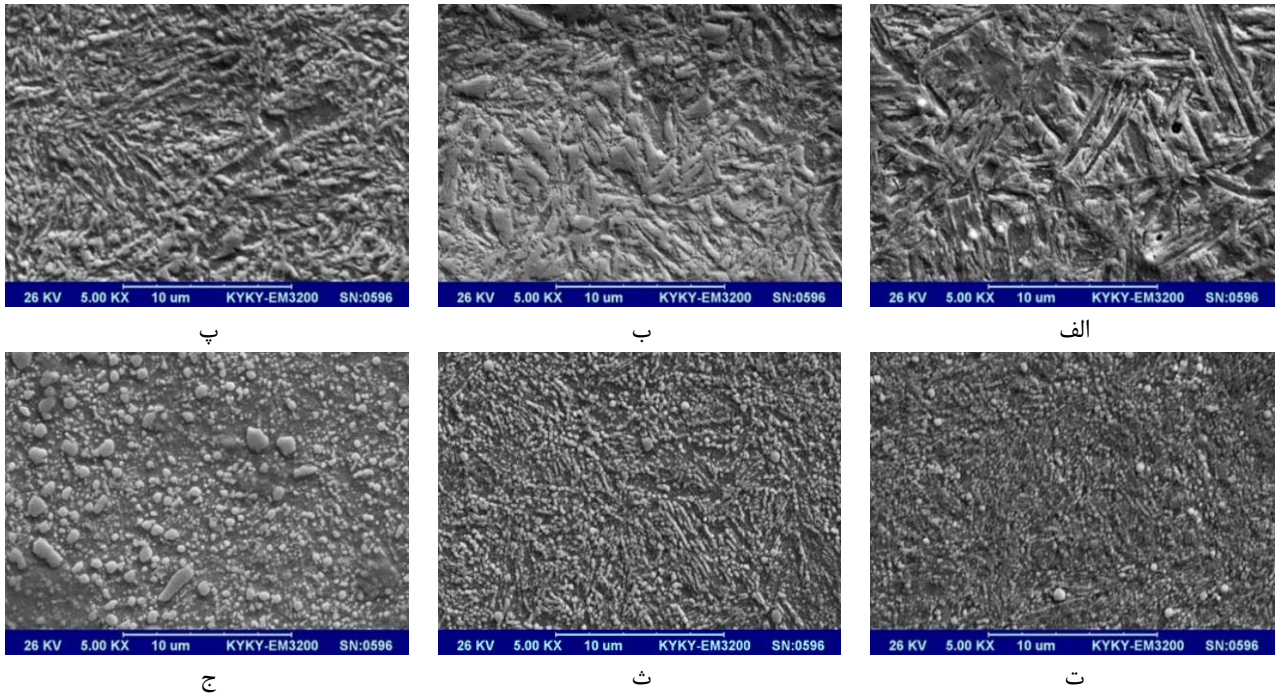


پ

شکل ۳- تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و نوری از تغییرات شرایط ریزساختاری و اندازه دانه‌های آستنیت با افزایش دمای آستنیت: (الف و ب)  $850^{\circ}\text{C}$  و (پ و ت)  $950^{\circ}\text{C}$ .

و زمان، اندازه آنها بزرگ‌تر و تعداد آنها در واحد سطح کمتر می‌شود (شکل (۵) - ت و ج) [۲۳، ۲۴]. در جدول (۴)، مقدار سختی بر حسب ویکرز به همراه مشخصات ریزساختاری نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با توجه به تصاویر میکروسکوپی با افزایش دمای آستنیت، رشد دانه رخ می‌دهد که موجب کاهش سختی می‌شود. در مقابل نمونه کوئنچ شده، به علت اعوجاج زیاد در ساختار شبکه کریستالی، تنش‌های پسماند زیاد و حضور مارتنزیت بشقابی در آن بیشترین سختی را از خود نشان می‌دهد. با انجام عملیات تمپر، سختی مارتنزیت کاهش می‌یابد که به علت کاهش تنش‌های پسماند، خروج کربن از شبکه فوق‌اشباع فریت و تبدیل ساختار BCT به BCC است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دما و زمان عملیات تمپر، کاهش سختی بیشتر می‌شود که ناشی از خروج بیشتر کربن از شبکه، حذف ساختار تیغه‌ای مارتنزیتی و ادغام و درشت‌تر شدن کاربیدهای ریز است. نکته کلیدی این است که این تغییرات ریزساختاری با تغییر در رسانایی و خواص مغناطیسی ماده، پاسخ جریان گردابی را تغییر خواهد داد [۲۵].

کاربیدهای کروم، کاربید کروم حل نشده باعث قفل شدن مرزدانه‌های آستنیت شده و مانع رشد دانه‌های آستنیت می‌شود و در نتیجه دانه‌بندی آستنیت ریزتر می‌شود ولی فاصله بین لایه‌های پرلیت کمی بیشتر از حالت قبلی است [۲۱، ۲۲]. شکل (۴-الف) تصویر SEM از ریزساختار نمونه کوئنچ شده را نشان می‌دهد که شامل تیغه‌های درشت و سوزنی شکل مارتنزیت همراه با آستنیت باقی مانده است. با انجام عملیات تمپر، شبکه بلوری آن از BCT مارتنزیت به سمت شبکه بلوری تعادلی BCC فریت متمایل می‌شود و با خروج بیشتر کربن از شبکه بلوری مارتنزیت، صفحات فریتی جایگزین صفحات مارتنزیتی در ساختار می‌شوند. در مراحل اولیه تمپر، ساختار مارتنزیتی از بین رفته و کربن از محلول جامد فوق‌اشباع رسوب می‌کند. ریزساختار حاصل در بازه دمایی  $300^{\circ}\text{C}$  تا  $450^{\circ}\text{C}$  مارتنزیت تمپر شده است (شکل (۵) - ب و پ). با افزایش دما و زمان تمپر ریزساختار فولاد کوئنچ تمپر شده در  $600^{\circ}\text{C}$ ، حاوی زمینه نرم فریت و کاربیدهای کروم ریز با توزیع یکنواخت است. اندازه این کاربیدها تابعی از دمای و زمان عملیات تمپر است که با افزایش دما



شکل ۴- تصاویر به دست آمده از میکروسکپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های: الف (Q، ب) QT31، پ) QT41، ت) QT61، ث) QT62، ج) QT63.

یکدیگر دارند و نمونه QT61 نقطه میانه تمامی نمونه‌ها است. بنابراین می‌توان به انتخاب پراب و فرکانس در قدرت تفکیک ریزساختارها و سختی‌های مختلف با استفاده از سامانه جریان گردابی اطمینان داشت. در این بین مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های بالای ۲۰kHz، قدرت تفکیک نمونه‌ها کمی بیشتر است و فرکانس ۲۰kHz نیز بیشترین قدرت تفکیک را دارد. لذا تفکیک سایر نمونه‌ها و تحلیل سختی در این فرکانس صورت پذیرفت. بازرسی‌ها در فرکانس‌های خیلی کمتر از ۲kHz و یا بالاتر از ۸۰kHz تفکیک مناسبی از ریزساختارها را نشان نداده است که از یک طرف به محدودیت‌های پراب بستگی دارد و از طرف دیگر به اثر فرکانس گذرنده از پراب در عمق نفوذ جریان گردابی مرتبط است [۱].

شدت جریان گردابی در سطح ماده، بیشترین مقدار است و با افزایش عمق، کمتر می‌شود. با توجه به رابطه (۲)، عمق نفوذ جریان گردابی به فرکانس، ضریب نفوذ مغناطیسی و هدایت الکتریکی ماده مرتبط است. عمقی از سطح که شدت جریان در آن برابر ۳۷ درصد شدت جریان در سطح باشد به عنوان عمق نفوذ استاندارد و سه برابر این عمق به عنوان عمق نفوذ مؤثر معرفی می‌شود [۱].

شدت جریان گردابی در سطح ماده بیشترین مقدار است و با افزایش عمق، کمتر می‌شود. با توجه به رابطه (۲)، عمق

جدول ۴- سختی و مشخصه‌های ریزساختاری نمونه‌های شاهد.

کد عملیات	مشخصات ریزساختاری	
	ریزساختار	سختی (HV)
A8	پرلیت خشن	۳۲۵±۵
A9	پرلیت ظریف	۳۵۶±۸
Q	مارتنزیت به همراه آستنیت باقیمانده	۷۴۵±۶
QT31	مارتنزیت تمپر شده	۶۹۰±۴
QT41	مارتنزیت تمپر شده	۵۹۴±۵
QT61	فریت و کاربید کرووی ریز	۴۲۰±۴
QT62	فریت و کاربید کرووی درشت	۳۸۷±۵
QT63	فریت و کاربید کرووی درشت	۳۵۲±۵

۳-۳- انتخاب فرکانس مناسب برای ارزیابی غیرمخرب در شکل (۵)، ارتباط میان فرکانس و شاخص جریان گردابی (Rx) برای سه نمونه A9، Q و QT61 نشان داده شده است. در این آزمون از نمونه QT61 به عنوان نمونه شاهد مرکزی استفاده شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی فرکانس‌های انتخاب شده، مشخصه‌های جریان گردابی سه نمونه، اختلاف معناداری با یکدیگر دارند. ریزساختار و سختی این سه نمونه نیز اختلاف‌های زیادی با

سیم‌پیچ مرتبط است [۲]. در رابطه (۳)، A سطح مقطع سیم، N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ و  $l$  طول سیم‌پیچ است. چون در این تحقیق از یک پراب ثابت استفاده شده است، تغییرات مشاهده شده در بازرسی جریان گردابی یا از تغییرات ریزساختاری و سختی بلوک‌های شاهد یا از تغییر فرکانس جریان است. به همین دلیل یکی از اهداف اولیه این بازرسی، انتخاب فرکانس مناسب است تا بازرسی‌ها در یک فرکانس ثابت انجام شود.

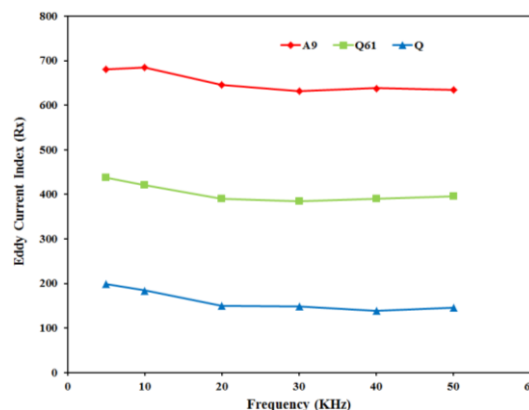
$$X_L = 2\pi fL \quad (۳)$$

$$L = \frac{\mu AN^2}{l} \quad (۴)$$

### ۳-۴- ارزیابی ریزساختار و سختی با جریان گردابی

شکل (۶)، نقشه امپدانس و برگرفته از صفحه نمایش‌گر دستگاه آزمون جریان گردابی است که در آن به صورت گرافیکی موقعیت شاخص جریان گردابی (امپدانس، Z) برای هر یک از نمونه‌ها در فرکانس ۲۰ kHz مشخص شده است. براساس روابط (۱)، (۲) و (۳)، امپدانس پراب یک بردار موهومی است که از ترکیب دو عامل مقاومت القایی ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی ( $R_x$ ) بوده و رابطه مستقیم با نفوذپذیری مغناطیسی ماده دارد. مشاهده می‌شود که هر یک از نمونه‌ها در صفحه امپدانس موقعیت مختص به خود را داشتن که در دو بعد در راستای محورهای افقی و عمودی قابل تفکیک هستند. اختلاف در راستای محور عرضی می‌تواند نشان‌گر تغییرات هدایت الکتریکی باشد و در مقابل اختلاف در راستای محور عمودی، می‌تواند ناشی از تغییرات خواص مغناطیسی باشد [۳].

با تنظیمات انجام شده در نحوه نمایش، به خوبی می‌توان تغییرات ریزساختار و سختی را با توجه به موقعیت در صفحه نمایش پیش‌بینی کرد. موقعیت‌های سمت راست، سختی کمتری نسبت به موقعیت‌های سمت چپ دارند و بر عکس. جابجایی جزئی در راستای محور عمودی ( $X_L$ ) می‌تواند ناشی از تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی باشد که می‌تواند از استحاله‌های آستنیت به مارتنزیت، کروی شدن کاربیدها و حذف تیغه‌های مارتنزیتی حاصل شود [۳]. به این ترتیب با استفاده از سامانه جریان گردابی طراحی شده به صورت گرافیکی از روی صفحه نمایش‌گر، می‌توان قطعات را بر اساس سختی و ریزساختار تفکیک کرد.



شکل ۵- ارتباط میان شاخص جریان گردابی ( $R_x$ ) و فرکانس.

نفوذ جریان گردابی به فرکانس، ضریب نفوذ مغناطیسی و هدایت الکتریکی ماده مرتبط است. عمقی از سطح که شدت جریان در آن برابر ۳۷ درصد شدت جریان در سطح باشد به عنوان عمق نفوذ استاندارد و سه برابر این عمق به عنوان عمق نفوذ مؤثر معرفی می‌شود [۱].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (۲)$$

$\delta$  معرف عمق نفوذ استاندارد،  $\sigma$  مقاومت ویژه ماده و  $\mu_r$  ضریب نفوذ نسبی مغناطیسی است. مطابق رابطه (۴)، شکل جریان الکتریکی القاء شده در سطح به ریزساختار و فرکانس مرتبط است. عمق نفوذ با افزایش فرکانس، ضریب نفوذ مغناطیسی و هدایت الکتریکی کم می‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر از ۲۰ kHz، عمق نفوذ بیشتر بوده و خاصیت مغناطیسی ماده در ارزیابی شاخص جریان گردابی و تفکیک ریزساختارها و سختی‌های مختلف تاثیرگذارتر از هدایت الکتریکی است. با افزایش فرکانس، نقش هدایت الکتریکی ماده بیشتر از ضریب نفوذ مغناطیسی می‌شود. از این رو هم تغییرات ریزساختاری و هم تغییرات فرکانس می‌تواند در قدرت تفکیک نمونه‌ها تاثیرگذار باشد [۱۴].

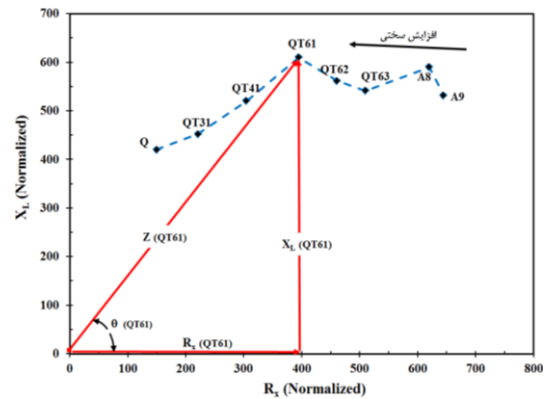
در سیستم طراحی شده، همواره جریان گذرنده از پراب ثابت است و ولتاژ پراب می‌تواند بسته به موقعیت آن (روی چه نمونه‌ای باشد) تغییر کند. این تغییر ولتاژ، موید تغییرات در دو مشخصه مقاومت القایی ( $X_L$ ) و مقاومت اهمی ( $R_x$ ) و یا امپدانس پراب است. همچنین مطابق با رابطه (۲)، مقاومت القایی تابعی از فرکانس ( $f$ )، ضریب خودالقایی سیم‌پیچ ( $L$ ) و نفوذپذیری مغناطیسی ( $\mu$ )، است [۱]. رابطه (۳) هم نشان می‌دهد که ضریب خودالقایی سیم‌پیچ به شکل، طرح و مشخصات فیزیکی سیم و



شرایط در ریزساختارهای پرلیتی (نمونه‌های A8 و A9) کمی متفاوت است. مقایسه این ریزساختارها با مارتزیت تمپر شده نشان می‌دهد که شاخص مقاومت القایی کاهش اما شاخص مقاومت اهمی افزایش یافته است. علت آن، ریزساختار لایه‌ای شکل در پرلیت است. در واقع این لایه‌ها مواعی در برابر حرکت جریان‌های گردابی عمل می‌کنند [۲۷، ۱۰، ۲۹]. در این فولاد با افزایش دمای آستنیت و با کاهش فاصله میان لایه‌ها از میزان امپدانس کاسته می‌شود. در جدول (۵)، نتایج عددی مربوط به آزمون جریان گردابی (حاصل از نقشه امپدانس مطابق شکل ۶) و مقدار سختی برای تمامی نمونه‌ها در فرکانس ۲۰ kHz ارائه شده است. در این جدول، ضریب رگرسیون حاصل از برآورد رابطه خطی بین هر یک از شاخص‌های جریان گردابی (مقاومت اهمی، مقاومت القایی، امپدانس و نسبت مقاومت اهمی به امپدانس) با مقدار سختی مشخص شده است. ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) نشان‌دهنده دقت تابع شاخص‌های جریان گردابی برای برآورد سختی است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، برآورد آن تابع، دقیق‌تر است [۱۵، ۲۴]. همچنین بر اساس این داده‌ها در شکل (۷)، ارتباط بین این شاخص‌های جریان گردابی و سختی مشخص شده است. مشاهده می‌شود که شاخص امپدانس (Z) ارتباط مناسب‌تری با سختی دارد و از آن می‌توان در برآورد سختی استفاده کرد. در این توابع، هر دو مشخصه  $X_L$  و  $R_X$  در ارزیابی سختی تاثیر دارند که البته تاثیر نسبی  $R_X$  بیشتر است. در فولادهایی که درصد کربن بالاتر است، نقش  $R_X$  بیشتر از  $X_L$  است [۲۶، ۲۷].

محدودیتی که شاخص  $X_L$  در برآورد سختی دارد، عدم تفکیک نمونه کوئچ شده است. در این نمونه به علت حضور فاز آستنیت باقیمانده که یک فاز پارامغناطیسی است، تغییرات  $X_L$  یکنواخت نیست و ارزیابی بر اساس آن کامل نخواهد بود. استفاده از شاخص  $R_X$  که فقط یک بعد (هدایت الکتریکی نمونه) را برآورد می‌کند، توصیه نمی‌شود [۲۸، ۲۹]. بنابراین بر اساس مقدار ضریب رگرسیون، رابطه (۵)، تابع خطی مناسبی است که از آن می‌توان برای برآورد سختی نمونه‌های فولاد FMU-226 در روش جریان گردابی مورد نظر استفاده نمود.

$$Hv = 1226 - 1.1 Z \quad \therefore R^2 = 0.95 \quad (5)$$



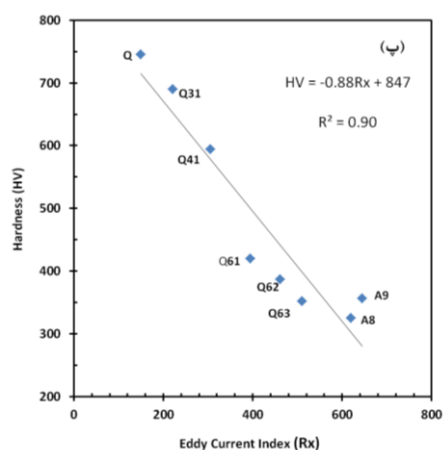
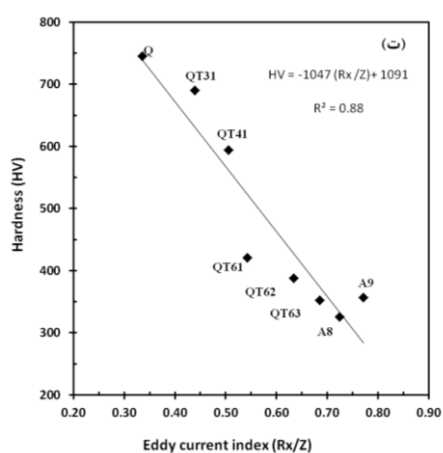
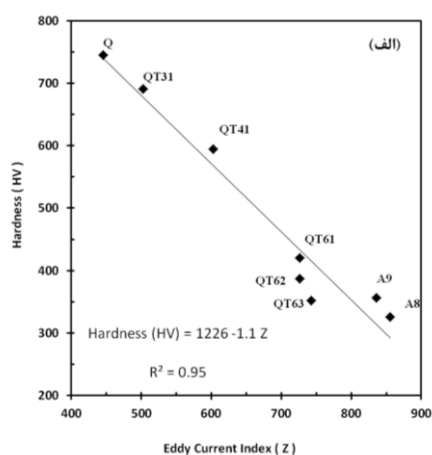
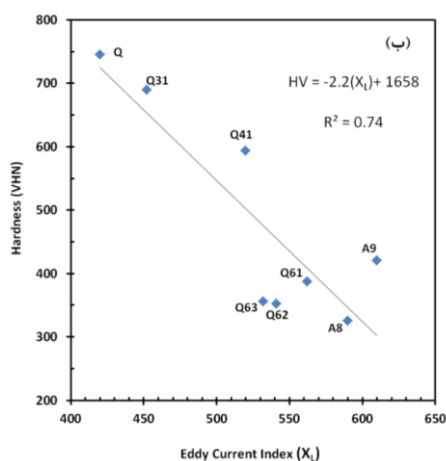
شکل ۶- نقشه امپدانس و موقعیت نمونه‌های مختلف بر اساس ریزساختار و سختی مختلف در صفحه نمایش گر.

با توجه به صفحه امپدانس، نمونه مارتزیتی (Q) در قسمت چپ با کمترین میزان مقاومت القایی و اهمی قرار گرفته است. با افزایش دمای تمپر، نقطه امپدانس تغییر کرده و به سمت مقاومت اهمی و القایی بیشتر حرکت می‌کند (موقعیت نمونه‌های QT41، QT31، QT61 را با موقعیت نمونه Q مقایسه کنید). ریزساختار مارتزیتی به علت حضور میزان بالایی از آستنیت باقیمانده (به عنوان ماده پارامغناطیس) و نواقص موجود در آن، میزان نفوذپذیری مغناطیس کمتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارد. در نتیجه امپدانس به عنوان شاخص جریان گردابی بیشترین کاهش را دارد [۲۶]. با انجام عملیات تمپر از میزان آستنیت باقیمانده، نواقص موجود در شبکه و تنش‌های پسماند کاسته شده [۲۵] و میزان مقاومت القایی و هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد و در نتیجه امپدانس هم افزایش می‌یابد.

بیشترین میزان مقاومت القایی  $X_L$  مربوط به نمونه QT61 است. با توجه به شکل (۴)، ریزساختار این نمونه متشکل از زمینه فریتی نرم به همراه توزیع یکنواخت از کاربیدهای کرومی بسیار ریز است. اما زمانی که مدت تمپر از ۱ ساعت به ۳ ساعت افزایش می‌یابد، کاربیدهای کرومی موجود در زمینه با یکدیگر ادغام و بزرگ می‌شوند. این اتفاق موجب قفل شدن جریان‌های گردابی در این مواعی شده و کاهش جزئی در شاخص مقاومت القایی و هم‌زمان افزایش شاخص مقاومت اهمی رخ می‌دهد (موقعیت نمونه‌های QT61، QT62 و QT63 را با یکدیگر مقایسه کنید) [۱۲]. همچنین باید توجه داشت که با انجام عملیات تمپر و پیشرفت استحاله‌های مرتبط با آن، افزایش  $R_X$  نشان دهنده افزایش هدایت الکتریکی در ماده مورد آزمون است [۲۶].

جدول ۵- تغییرات شاخص‌های جریان گردابی در مقایسه با سختی نمونه‌های مختلف فولاد در فرکانس ۲۰ kHz.

سختی HV	شاخص‌های جریان گردابی				کد نمونه
	R <sub>x</sub> /Z	Z	X <sub>L</sub>	R <sub>x</sub>	
۷۴۵	۰/۳۵	۴۴۵	۴۲۰	۱۵۰	Q
۶۹۰	۰/۴۴	۵۰۳	۴۵۲	۲۲۱	QT31
۵۹۴	۰/۵۱	۶۰۲	۵۲۰	۳۰۵	QT41
۴۲۰	۰/۵۴	۷۲۶	۶۱۰	۳۹۵	QT61
۳۸۷	۰/۶۳	۷۲۶	۵۶۲	۴۶۱	QT62
۳۵۲	۰/۶۹	۷۴۳	۵۴۱	۵۱۰	QT63
۳۵۶	۰/۷۷	۸۳۶	۵۳۲	۶۴۵	A9
۳۲۵	۰/۷۲	۸۵۵	۵۹۰	۶۲۰	A8
۱	۰/۸۸	۰/۹۵	۰/۷۴	۰/۹۰	ضریب رگرسیون R <sup>2</sup>



شکل ۷- نمودار تغییرات سختی با شاخص‌های آزمون غیرمخرب جریان گردابی: (الف) امپدانس (Z)، (ب) مقاومت القایی (X<sub>L</sub>)، (پ) مقاومت اهمی (R<sub>x</sub>) و (ت) نسبت مقاومت اهمی به امپدانس (R<sub>x</sub>/Z) در مقایسه با سختی در فرکانس ۲۰ kHz.

## مراجع

- [1] Hellier C.J., Handbook of Nondestructive Evaluation, McGraw-Hill Companies, New York, 2003.
- [2] Shull P.J., Nondestructive Evaluation Theory (Techniques and Applications), Marcel Dekker, New York, 2002.
- [3] International Atomic Energy Agency, Eddy Current Testing at Level 2, Vienna International Centre, Austria, 2011.
- [4] American Society for Metals International Handbook Committee, (Nondestructive Evaluation and Quality Control Vol. 17), ASM International, 2004.
- [۵] نویسندگان ح.، بررسی‌های غیرمخرب، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۹۱.
- [۶] عباسی م.، جواهری م.، شامقلی م.، و ریاضی س.م.، کنترل کیفیت غیرمخرب قطعات کربونیترووره شده با آزمون جریان گردابی: مطالعه موردی ارزیابی سختی قطعه پیستونی روی فنر سوپاپ، سومین کنفرانس بین المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، تهران، هتل المپیک، اسفند ۱۳۹۴.
- [7] Bida G.V., Nichipuruk A. P., Tsarkova T.P., Magnetic Properties of steels after quenching and tempering carbon steels, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001, 37(2) 79-99.
- [8] Byeon J. W., Kwun S. I., Magnetic Evaluation of microstructures and strength of eutectoid steel, Materials Transactions, 2003, 44(10) 2184-2190.
- [9] Camerini C., Sacramento R., Areiza M.C., Rocha A., Santos R., Rebello J.M., Pereira G., Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 388(15) 96-100.
- [10] Konoplyuk S., Estimation of pearlite fraction in ductile cast irons by eddy current method, NDT&E International, 2010, 43(324) 360-364.
- [11] Konoplyuk S., Abe T., Uchimoto T., Takagi T., Kurosawa M., Characterization of ductile cast iron by eddy current method, NDT&E International, 2005, 38(8) 623-626.
- [12] Kashefi M., Rafsanjani A., Kahrobaee S., Alaei M., Magnetic nondestructive technology for detection of tempered martensite embrittlement, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(23) 4090-4093.
- [13] Perevertov O., Stupakov O., Toma I., Skrbek B., Detection of spring steel surface decarburization by magnetic hysteresis measurements, NDT&E International, 2011, 44(6) 490-494.
- [14] Sekine Y., Soyama H., Evaluation of the surface of alloy tool steel treated by cavitation shotless peening using an eddy current method, Surface and Coatings Technology, 2009, 203(16) 2254-2259.
- [15] Asadi A., Abbasi M., Shamgholi M., Eddy current detection of retained austenite in ni-hard4 cast iron, Research in Nondestructive Evaluation, 2018, 29(1) 38-47.
- [16] Khan S. H., Ali F., Nusair Khan A., Iqbal M.A., Eddy current detection of changes in stainless steel after cold reduction, Computational Materials Science, 2008, A43(4) 623-628.
- [17] Shamgholi M., Riazi S.M., Abbasi M., Proposing a method for eddy current thickness measurements of coatings on ferrous metal base material, Proceedings

## ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- از روش جریان گردابی می‌توان برای ارزیابی سختی و ریزساختارهای کوئنچ-تمپر شده و پرلیتی فولاد FMU-226 استفاده نمود. این عمل می‌تواند از طریق گرافیکی با مشاهده روی صفحه نمایش‌گر انجام شود و یا می‌توان رابطه خطی بین شاخص‌های جریان گردابی و سختی قطعه برقرار کرد تا به صورت عددی قابل کنترل هوشمند و مکانیزه باشد.
- ۲- بر اساس نقشه امیدانسی حاصل از آزمون و مشاهده روی صفحه نمایش‌گر دستگاه، تفکیک ریزساختارهای مارتنزیتی، پرلیتی و مارتنزیت تمپر شده در فرکانس ۲۰ kHz با پراب مطلق هسته‌دارفریتی می‌تواند صورت پذیرد.
- ۳- در نمونه‌های کوئنچ-تمپر شده با انجام عملیات حرارتی تمپر و کاهش میزان آستنیت باقیمانده، مشاهده می‌شود که شاخص مقاومت القایی پراب افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی با حذف تیغه‌های مارتنزیتی و کاهش عیوب شبکه در ریزساختار که با کاهش سختی مشهود است، شاخص مقاومت اهمی هم افزایش می‌یابد. در مجموع شاخص امیدانسی که تابعی از هر دو شاخص قبلی است، افزایش می‌یابد.
- ۴- با افزایش زمان عملیات حرارتی برگشت و کروی و بزرگ‌تر شدن کاربیدها در زمینه مارتنزیت تمپر شده، شاخص مقاومت القایی کاهش و شاخص مقاومت اهمی افزایش می‌یابد.
- ۵- رابطه خطی بین شاخص امیدانسی جریان گردابی (Z) با سختی دقت بسیار بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های جریان گردابی دارد. در این صورت، رابطه (۵) برای ارزیابی سختی بر حسب ویکرز پیشنهاد می‌شود. از این رابطه برای کنترل کیفیت و تفکیک قطعات قابل قبول از قطعات غیرقابل می‌توان استفاده نمود.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از همکاری‌ها و حمایت‌های ارزشمند شرکت ایرانیان هیبرید شمال (طراح و سازنده دستگاه بازرسی جریان گردابی)، مرکز رشد فناوری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و شرکت ریخته‌گری فولاد طبرستان صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

of the 3rd Iranian International NDT Conference, Olympic Hotel, Tehran, Iran, 2016.

[۱۸] حسینی س.ا، عباسی م، جواهری م، ارزیابی فرآیند پیرسازی و سختی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به روش غیرمخرب جریان گردابی، ششمین کنفرانس بین‌المللی مواد مهندسی و متالورژی، تهران، هتل المپیک، ۱۳۹۶.

[19] Rosen M., Horowitz E., The aging process in aluminum alloy 2024 studied by means of eddy currents, Materials Science and Engineering, 1982, 53(2) 191-198.

[20] Beswick J.M., The effect of chromium in high carbon bearing steels, Metallurgical Transactions A, 1987, 18(11) 1897-1906.

[21] Razzak M.A., Heat treatment and effects of Cr and Ni in low alloy steel, Bulletin of Materials Science, 2011, 34(7) 1439-1445.

[22] Pickering F., Garbarz B., The effect of transformation temperature and prior austenite grain size on the pearlite colony size in vanadium treated pearlitic steels, Scripta Metallurgica, 1987, 2(3) 249-253.

[23] Totten G.E., Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies, Taylor & Francis Group, Portland, 2006.

[24] Shaeri M.H., Saghafian H., Shabestari S.G., Effects of austempering and martempering processes on amount of retained austenite in Cr-Mo steels (FMU-226) used in mill liner, Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(2) 53-58.

[25] Zhag M.X., Kelly P.M., The morphology and formation mechanism of pearlite in steels, Materials Characterization, 2009, 60(6) 545-554.

[26] Kahrobaee S., Kashefi M., Electromagnetic nondestructive evaluation of tempering process in AISI D2 tool steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 382, 359-365.

[۲۷] جواهری م، عباسی م، ریاضی س.م، عشقیان ر، اثر دمای تمپر بر پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی، سومین کنفرانس بین‌المللی مواد مهندسی و متالورژی، ۱۳۹۳، تهران.

[۲۸] جواهری م، عباسی م، عزیزی ن، بوتراپی س.م.ع، کنترل کیفیت غیرمخرب ریزساختار و سختی گلوله‌های آسیا چدن پرکروم توسط آزمون جریان گردابی، چهارمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، ایران، تهران، هتل المپیک، ۱۳۹۵.

[۲۹] اسدی ا، عباسی م، شامقلی م، ارزیابی غیرمخرب ریزساختار چدن مقاوم به سایش نایه‌دار ۴ با استفاده از آزمون جریان گردابی، مهندسی متالورژی، ۱۳۹۴، ۱۸(۵۹) ۴۳-۳۴.