

Non-Ferrous Metals  
and Alloys (NFMA2013)  
New Applied Materials and Technologies  
2013 october 17 | مشهد مقدس | ۱۳۹۲ مهر ۲۵



۱۳۹۲  
موسسه آموزش عالی علمي کاربردي  
جهاد دانشگاهي



دانشگاه عالي کاربردي

اولين همایش ملي فلزات  
وآلیاژهای غیرآهنی  
مواد و فناوریهای نوین کاربردی

## گواهی ارائه مقاله

جانب آقای سید کهریزی

بین ویله از جنبه ای و بخواران محترم: علیرضا صاحب علم و مرداد اوکاشنی و میلاد حقی و مرجان طماشی و سیده اسکندریان  
پاس ارائه مقاله با عنوان:

بررسی پدیده کربن زوایی ناشی از عملیات حرارتی های مقاومت فولاد با استفاده از روش الکترو منتابطی جریان کردابی

در اولین همایش ملي فلزات و آلیاژهای غیرآهنی (مواد و فناوریهای نوین کاربردی)

که در تاریخ ۲۵ مهر ماه ۱۳۹۲ در موسسه آموزش عالی علمی-کاربردی جهاد دانشگاهی شده

با حضور پژوهشگران و متخصصان کشور برگزار گردید، شکر و قدردانی می گاییم.

توفیق روز افزون جنابعالی را از خداوند منان خواستاریم.

ابوالفضل یاپاخانی  
دیکیان



جلال الدین صادقی  
رمیس همایش

## بررسی پدیده کربن زدایی ناشی از عملیات حرارتی های متفاوت فولاد

### با استفاده از روش الکترومغناطیسی جریان گردابی

سعید کهربائی<sup>۱</sup>, علیرضا صاحب علم<sup>۲</sup>, مهرداد کاشفی<sup>۳</sup>, میلاد حجتی<sup>۴</sup>, مرجان طهماسبی<sup>۵</sup>, سیده اسکندریان<sup>۶</sup>

#### چکیده

امروزه بکارگیری روش های غیرمخرب در شناسایی تغییرات ریزساختاری به جهت صرفه جویی در دو فاکتور زمان و هزینه و همچنین امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این پژوهش کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی، بررسی شده است. مطالعات انجام شده در این زمینه شامل بررسی لایه کربن زدایی در نمونه های فولادی ناشی از یک سیکل عملیات حرارتی یکسان، بوده است. اما در پژوهش حاضر به بررسی پدیده کربن زدایی در قطعاتی با ریزساختارهای متفاوت ناشی از عملیات حرارتی متفاوت پرداخته شده است. لذا این بررسی، امکان تعیین بهترین شرایط ریزساختاری جهت شناسایی غیرمخرب لایه کربن زدایی را در یک سیکل عملیات حرارتی چند گانه مشخص می نماید. به منظور ایجاد نمونه هایی با عمق های متفاوت از لایه کربن زدایی، سه گروه از فولاد CK45 در دمای ۹۰۰ °C برای مدت زمان های متفاوت قرار گرفته و سپس بر روی هر گروه از نمونه ها عملیات به ترتیب نرماله، کوننج و کوننج-تپر اعمال شد. ارتباط های حاصل بین خروجی آزمون جریان گردابی با عمق لایه کربن زدایی در مورد سه گروه از نمونه ها، بررسی شد. در انتها پس از بهینه سازی پارامترهای آزمون غیرمخرب، سیکل عملیات حرارتی که در آن بهترین ارتباط (به دلیل وجود بیشترین تفاوت در خواص مغناطیسی ریزساختارهای سطح و مغز ناشی از آن عملیات حرارتی) حاصل شد، مورد شناسایی قرار گرفت.

**وازگان کلیدی:** پدیده کربن زدایی، روش غیرمخرب، آزمون جریان گردابی، تغییرات ریزساختاری.

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد، Kahrobaee@sadjad.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، آزمایشگاه مواد و متالورژی، پارک علم و فناوری خراسان

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۵</sup> دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد

# بررسی پدیده کربن زدایی ناشی از عملیات حرارتی‌های متفاوت فولاد با استفاده از روش الکترومغناطیسی جریان گردابی

سعید کهربائی<sup>\*</sup>، علیرضا صاحب علم<sup>۱</sup>، مهرداد کاشفی<sup>۲</sup>، میلاد حجتی<sup>۳</sup>، مرجان طهماسبی<sup>۴</sup>، سپیده اسکندریان<sup>۵</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد
- ۲- کارشناس ارشد، آزمایشگاه مواد و متالورژی، پارک علم و فناوری خراسان
- ۳- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، مؤسسه آموزش عالی سجاد، مشهد

## چکیده

امروزه بکارگیری روش‌های غیرمخرب در شناسایی تغییرات ریزساختاری به جهت صرفه جویی در دو فاکتور زمان و هزینه و همچنین امکان کنترل ۱۰۰٪ قطعات، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در این پژوهش کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدایی، بررسی شده است. مطالعات انجام شده در این زمینه شامل بررسی لایه کربن زدایی در نمونه‌های فولادی ناشی از یک سیکل عملیات حرارتی یکسان، بوده است. اما در پژوهش حاضر به بررسی پدیده کربن زدایی در قطعاتی با ریزساختارهای متفاوت ناشی از عملیات حرارتی متفاوت پرداخته شده است. لذا این بررسی، امکان تعیین بهترین شرایط ریزساختاری جهت شناسایی غیرمخرب لایه کربن زدایی را در یک سیکل عملیات حرارتی چند گانه مشخص می‌نماید. به منظور ایجاد نمونه‌هایی با عمق‌های متفاوت از لایه کربن زدایی، سه گروه از فولاد CK45 در دمای ۹۰۰°C برای مدت زمان‌های متفاوت قرار گرفته و سپس بر روی هر گروه از نمونه‌ها عملیات به ترتیب نرماله، کوئنچ و کوئنچ-تمپر اعمال شد. ارتباط‌های حاصل بین خروجی آزمون جریان گردابی با عمق لایه کربن زدایی در مورد سه گروه از نمونه‌ها، بررسی شد. در انتها پس از بهینه سازی پارامترهای آزمون غیرمخرب، سیکل عملیات حرارتی که در آن بهترین ارتباط (به دلیل وجود بیشترین تفاوت در خواص مغناطیسی ریزساختارهای سطح و مغز ناشی از آن عملیات حرارتی) حاصل شد، مورد شناسایی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: پدیده کربن زدایی، روش غیرمخرب، آزمون جریان گردابی، تغییرات ریزساختاری

## مقدمه

عملیات حرارتی‌های صورت گرفته بر روی فولادها در محدوده دمای پایداری آستینیت در شرایط اتمسفر کنترل نشده منجر به خروج کربن از سطح فولاد و واکنش با اتمسفر محیط می‌شود که به این فرایند کربن زدایی می‌گویند. فقدان کربن در سطح باعث افت شدید خواص مکانیکی قطعه فولادی مانند مقاومت به خستگی [۱]، مقاوت در برابر خوردگی [۲] و نرخ سایش [۳] می‌شود.

در صنعت روش‌های کنترل و اندازه‌گیری لایه کربن زدایی شامل مشاهدات ریزاساختار پس از عملیات اچ کردن با میکروسکوپ نوری و همچنین رسم پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه بعد از پولیش سطحی می‌باشد. این روش‌ها مخرب بوده و بکارگیری آنها در بازرگانی قعات صنعتی امری وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشد. امروزه با توجه به توانایی‌ها و مزایای روش‌های غیرمخرب در فرایندهای کنترلی تولیدات صنعتی، در سال‌های اخیر به تعیین خواص مکانیکی و متالورژیکی مواد و بدست آوردن نتایج آزمون‌های مخرب با کمک روش‌های غیرمخرب توجه بسیاری شده است. این امر سبب صرفه‌جویی 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 غیرمخرب جریان گردابی مزایای منحصر به فردی دارد. حساسیت این آزمون به ترکیب شیمیایی و ریزاساختار و خواص مکانیکی را می‌توان جزو مهمترین عواملی دانست که باعث توجه ویژه به این روش شده است [۴ و ۵]. با توجه به تفاوت خواص مغناطیسی ایجاد شده در ریزاساختارهای سطحی و مغز نمونه‌های فولادی کربن زدایی شده، روش‌های غیرمخرب پایه مغناطیسی مانند جریان گردابی و بارک هاووزن، پتانسیل تعیین ضخامت این لایه را دارند. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه شامل تعیین عمق لایه کربن زدایی شده با روش جریان گردابی در فولاد با ریزاساختار مارتنزیتی با کمک آنالیز هارمونیک [۶]، در فولاد با ریزاساختار فریت-پرلیتی با اندازه‌گیری امپدانس کویل [۷ و ۸] و همچنین راکتانس کویل [۹] می‌باشد. همچنین از روش بارک هاووزن در بررسی پدیده کربن زدایی بعد از عملیات حرارتی آنیل استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]. در هیچ یک از این پژوهش‌ها به بررسی غیرمخرب پدیده کربن زدایی در شرایط متفاوت عملیات حرارتی پرداخته نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر از روش جریان گردابی و اندازه‌گیری و لاثر القایی در تعیین عمق لایه کربن زدایی بعد از سه نوع عملیات حرارتی نرماله، کوئینچ و کوئینچ-تمپر پرداخته شده است. به این ترتیب با مقایسه نتایج حاصل شده از سه نوع عملیات حرارتی، بهترین شرایط ریزاساختاری (نوع عملیات حرارتی) به منظور تعیین غیرمخرب ضخامت لایه کربن زدایی حاصل شده است.

## ۲- مواد و روش انجام آزمایش

در این پژوهش به منظور ایجاد نمونه‌هایی با عمق کربن زدایی متفاوت، ۱۵ نمونه استوانه‌ای شکل از فولاد CK45 به قطر ۲۰ و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر تهیه شد. نمونه‌ها در سه گروه پنج تایی تحت سه نوع عملیات حرارتی متفاوت شامل نرماله، کوئینچ و کوئینچ-تمپر قرار گرفتند. به این منظور، ۱۲ نمونه در یک کوره عملیات حرارتی بدون اتمسفر کنترل شده برای مدت زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت، در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. در هر مرحله (بعد از قرار گیری نمونه‌ها برای یک مدت زمان مشخص در دمای آستینیت)، ۳ نمونه از کوره خارج شد و به منظور ایجاد ریزاساختارهای متفاوت، به سه روش زیر سرد شدند.

۱- دسته اول به منظور ایجاد ریزاساختار تعادلی فریت/پرلیت، در هوا سرد شده و نرماله شدند.

۲- دسته دوم، بعد از مدت زمان مشخص در داخل آب کوئینچ شدند تا ریزاساختار مارتنزیتی در آنها ایجاد شود.

-۳- دسته سوم نیز همراه دسته دوم از نمونه‌ها کوئینچ شده اما در ادامه عملیات تمپر در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد نیز بر روی آنها انجام شد.

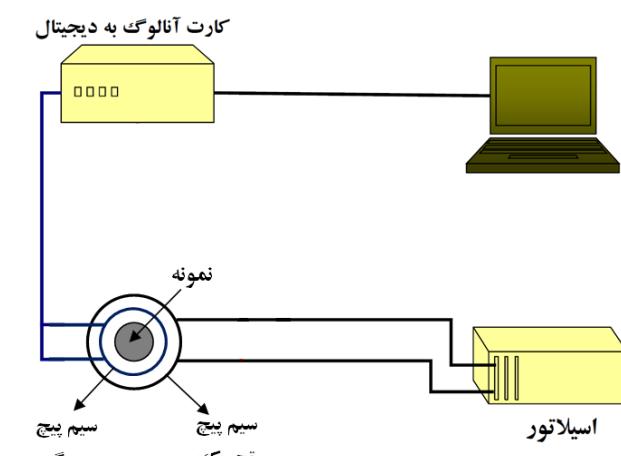
به این ترتیب در نمونه‌ها به دلیل قرار گیری در ۴ زمان متفاوت در دمای آستینیته، ۴ عمق متفاوت از لایه کربن زدایی ایجاد شد. اما بر حسب نوع عملیات حرارتی صورت گرفته در قسمت مرکزی نمونه‌ها ریزساختارهای فریت/پرلیت (برای دسته اول)، مارتنتزیت (برای دسته دوم) و مارتنتزیت تمپر شده (برای دسته سوم) ایجاد شد.

همچنین سه نمونه دیگر (به عنوان نمونه شاهد) در کوره ای با اتمسفر کنترل شده (تحت گاز ازت) در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. بعد از مدت زمان یک ساعت این نمونه‌ها نیز تحت سه نوع عملیات نرماله، کوئینچ و کوئینچ-تمپر قرار گرفتند.

پس از انجام عملیات حرارتی‌های صورت گرفته، از تمامی نمونه‌ها قرصی به ارتفاع ۱ سانتی‌متر جدا کرده و پس از مانست گیری با استفاده از سمباده زنی با مشبندی‌های ۱۲۰۰ و پولیش، سطح نمونه‌ها برای آزمون میکرو سختی‌سنجی، آماده شد. با استفاده از آزمون میکروسختی‌سنجی و رسم پروفیل سختی، عمق‌های لایه کربن زدایی شده طبق استاندارد ISO 3887 تعیین شدند. سپس نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از محول نایتال ۲٪، حکاکی شد و ریزساختارهای بدست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شدند.

بعد از مشخصه‌یابی ریزساختارهای ایجاد شده به روش‌های مشاهدات میکروسکوپی و رسم پروفیل سختی، از آزمون جریان گردابی به منظور تعیین غیرمخرب ضخامت لایه کربن زدایی استفاده شد. ساختمان دستگاه به کار گرفته شده در این پژوهش به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشهود است اجزاء تشکیل دهنده سیستم پیشنهادی شامل اسیلاتور (با محدوده فرکانسی بین ۰/۵ هرتز تا ۵ مگا هرتز)، کارت اسیلوسکوپ و یک عدد کویل که متناسب با اندازه نمونه مورد آزمون باید طراحی و ساخته شود، می‌باشد. کویل طراحی شده شامل دو سیم پیچ بوده تا عمل اعمال میدان و القاء جریان در نمونه مورد آزمایش توسط سیم پیچ اولیه (تحریک) و همچنین دریافت القاء متقابل توسط سیم پیچ ثانویه (حس‌گر) به خوبی انجام شود. در طراحی کویل، تعداد ۵۰۰ دور سیم با قطر ۰/۴۵ و ۶۰۰ دور سیم با قطر ۰/۲۵ برای به ترتیب سیم پیچ‌های تحریک و حسگر در نظر گرفته شد. قطر داخلی و ارتفاع کویل نیز به ترتیب ۲۰ و ۵۰ میلیمتر می‌باشد.

در این پژوهش از ولتاژ القا شده (ولتاژ سیم پیچ ثانویه)، به عنوان خروجی آزمون جریان گردابی در شناسایی تغییرات ریزساختاری استفاده شده است.



شکل ۱ : نمایی توصیفی از دستگاه آزمایشگاهی جریان گردابی.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ولتاژهای القایی مستقیماً از خروجی سیم پیچ حسگر با استفاده از اسیلوسکوپ اندازه‌گیری و داده‌های مربوط به آن توسط کامپیوتر ثبت می‌شود.

این آزمون در ۴ فرکانس ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ هرتز انجام شد و فرکانس بهینه با روش آنالیز رگرسیون تعیین شد. در این بررسی به منظور مقایسه میزان تفاوت خروجی روش غیرمخرب پیشنهادی برای ریزاساختارهای متفاوت، خروجی‌ها نرماله یا به عبارتی بی بعد شدند. برای این منظور خروجی‌های اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های با عمق‌های کربن زدایی متفاوت، بر خروجی حاصل از نمونه کربن زدایی نشده تقسیم شد. این امر سبب می‌شود تا بتوان میزان تفاوت خروجی ناشی از ایجاد لایه کربن زدایی را برای ریزاساختارهای متفاوت مقایسه نمود و در نتیجه بهترین شرایط ریزاساختاری، جهت تعیین غیرمخرب لایه کربن زدایی را تعیین نمود.

### ۳- نتایج و بحث

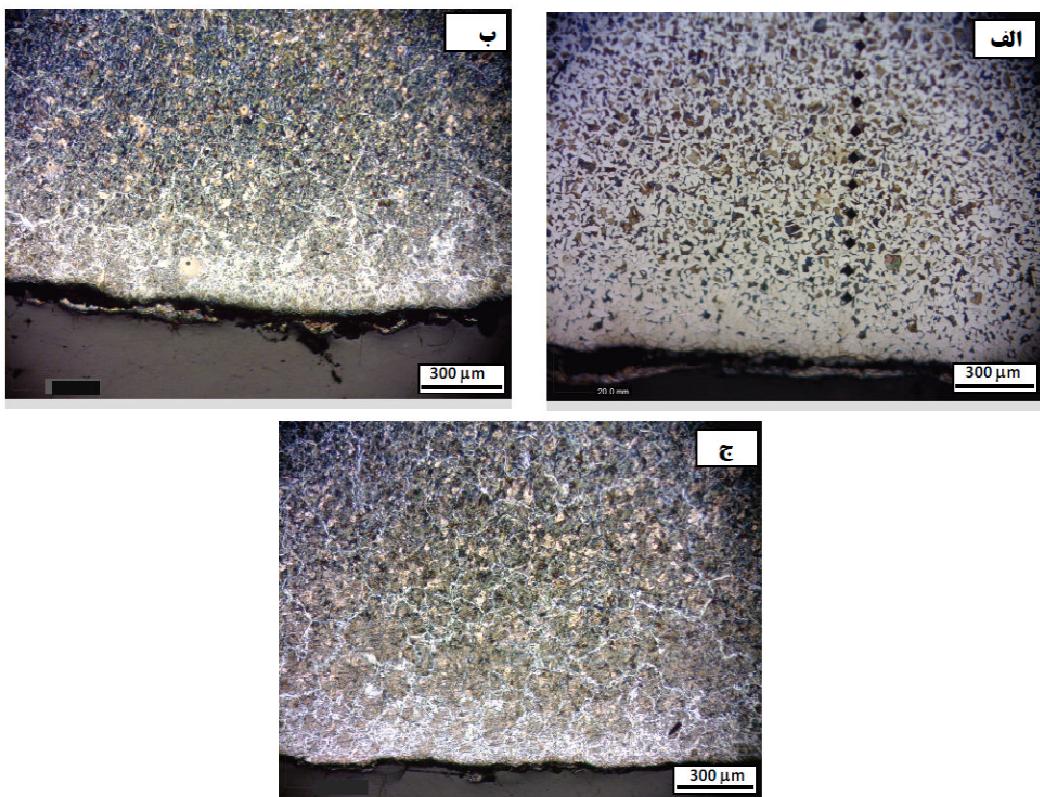
#### ۱-۳ بررسی عمق لایه کربن زدایی شده با استفاده از روش‌های متالوگرافی و میکروسختی سنجی

در شکل ۲، تصویر میکروسکوپی مقطع عرضی از سه ریزاسختار مربوط به نمونه‌های کربن زدایی شده که به مدت ۲ ساعت در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  قرار داده شده و تحت سه عملیات حرارتی نرماله، کوئینچ و کوئینچ-تمپر قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نزدیکی سطح، قسمت کربن زدایی شده سفید رنگ است که نشان دهنده نفوذ و خروج کربن از سطح در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  و در نتیجه ایجاد ریزاساختار فریتی پس از سرد شدن و گذشتن از دمای استحاله می‌باشد. در قسمت داخلی به طرف مغز قطعه که نفوذ و خروج کربن به بیرون صورت نگرفته، ریزاساختار فریت-پرلیتی (با مقادیر بیشتر پرلیت) برای نمونه نرماله شده (شکل ۲-الف)، ریزاساختار مارتنتزیتی برای نمونه کوئینچ شده (شکل ۲-ب) و ریزاساختار مارتنتزیت تمپر شده برای نمونه کوئینچ-تمپر شده (شکل ۲-ج) مشاهده می‌شود.

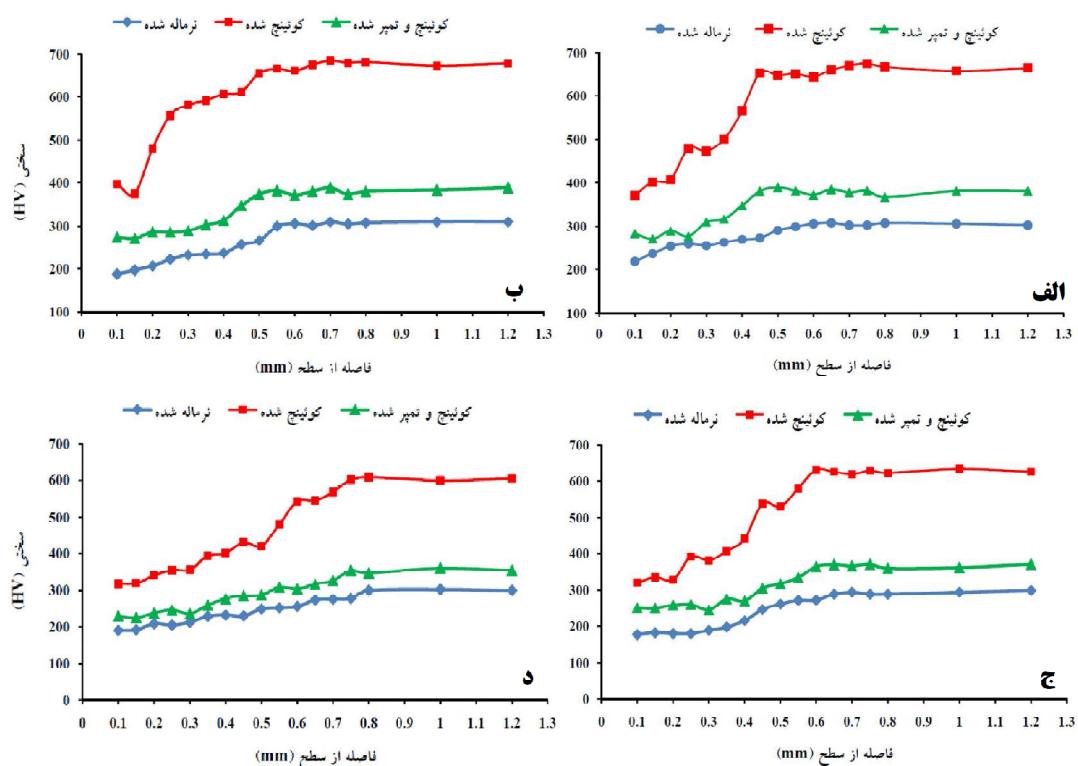
بنابراین عمق لایه کربن زدایی عبارتست از فاصله از سطح نمونه به سمت مغز تا جایی که بخش تیره تر فازهای فریت-پرلیتی، مارتنتزیتی و یا مارتنتزیت تمپر شده در قسمت مرکزی نسبت به بخش روشن‌تر کربن زدایی شده در سطح، قابل مشاهده و تفکیک باشد. همانطور که انتظار می‌رود، تفکیک ناحیه کربن زدایی از مغز نمونه، مشکل و بر اساس تفاوت رنگ می‌باشد. به همین جهت در این پژوهش از روش میکروسختی سنجی و رسم پروفیل سختی برای تعیین عمق‌های کربن زدایی استفاده شد.

در پژوهش حاضر، سختی در فاز فریت موجود در سطح نمونه‌های نرماله، کوئینچ و کوئینچ-تمپر شده به ترتیب حدود ۲۰۰، ۳۸۰ و ۲۷۰ ویکرز می‌باشد. در حالی که سختی ریزاساختارهای داخلی این نمونه‌ها برای فریت-پرلیت، مارتنتزیت و مارتنتزیت تمپر شده به ترتیب حدوداً ۳۰۰، ۶۸۰ و ۳۸۰ ویکرز اندازه‌گیری شد. به این ترتیب لایه کربن زدایی شده از نظر سختی از قسمت مغز نمونه با هر ریزاساختاری قابل تمیز می‌باشد.

در شکل ۳ پروفیل سختی نمونه‌ها با ریزاساختارهای متفاوت که برای مدت زمان‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ ساعت در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد قرار گرفته بودند، نشان داده شده است. عمق‌های کربن زدایی شده برای تمامی نمونه‌ها پس از رسم پروفیل سختی آنها با استفاده از استاندارد ISO 3887 اندازه‌گیری شد و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲ : ریز ساختار نمونه های کربن زدایی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۲ ساعت،  
الف) بعد از عملیات نرماله ب) بعد از عملیات کوئینچ ج) بعد از عملیات کوئینچ - تمپر.



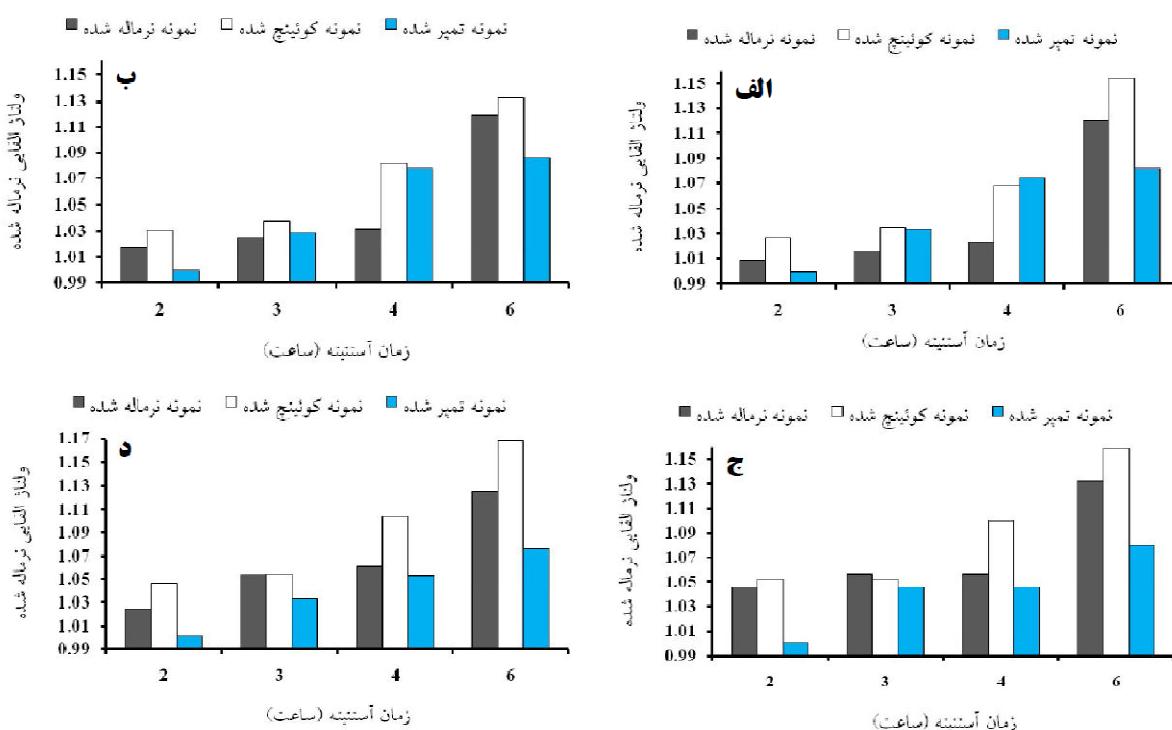
شکل ۳ : پروفیل های سختی برای نمونه های کربن زدایی شده که در زمان های الف) ۲ ساعت، ب) ۴ ساعت، ج) ۶ ساعت و  
د) ۸ ساعت، آستینیته شده اند.

جدول ۱ : نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت‌های لایه کربن زدایی شده با استفاده از رسم پروفیل سختی

زمان آستینیته (ساعت)				نوع عملیات
۲	۴	۶	۸	
عمق لایه کربن زدایی شده (میلی‌متر)				
۰/۵	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۷۸	نرماله
۰/۴۵	۰/۵	۰/۶	۰/۷۵	کوئینچ
۰/۴۵	۰/۵	۰/۶	۰/۷۵	کوئینچ و تمپر

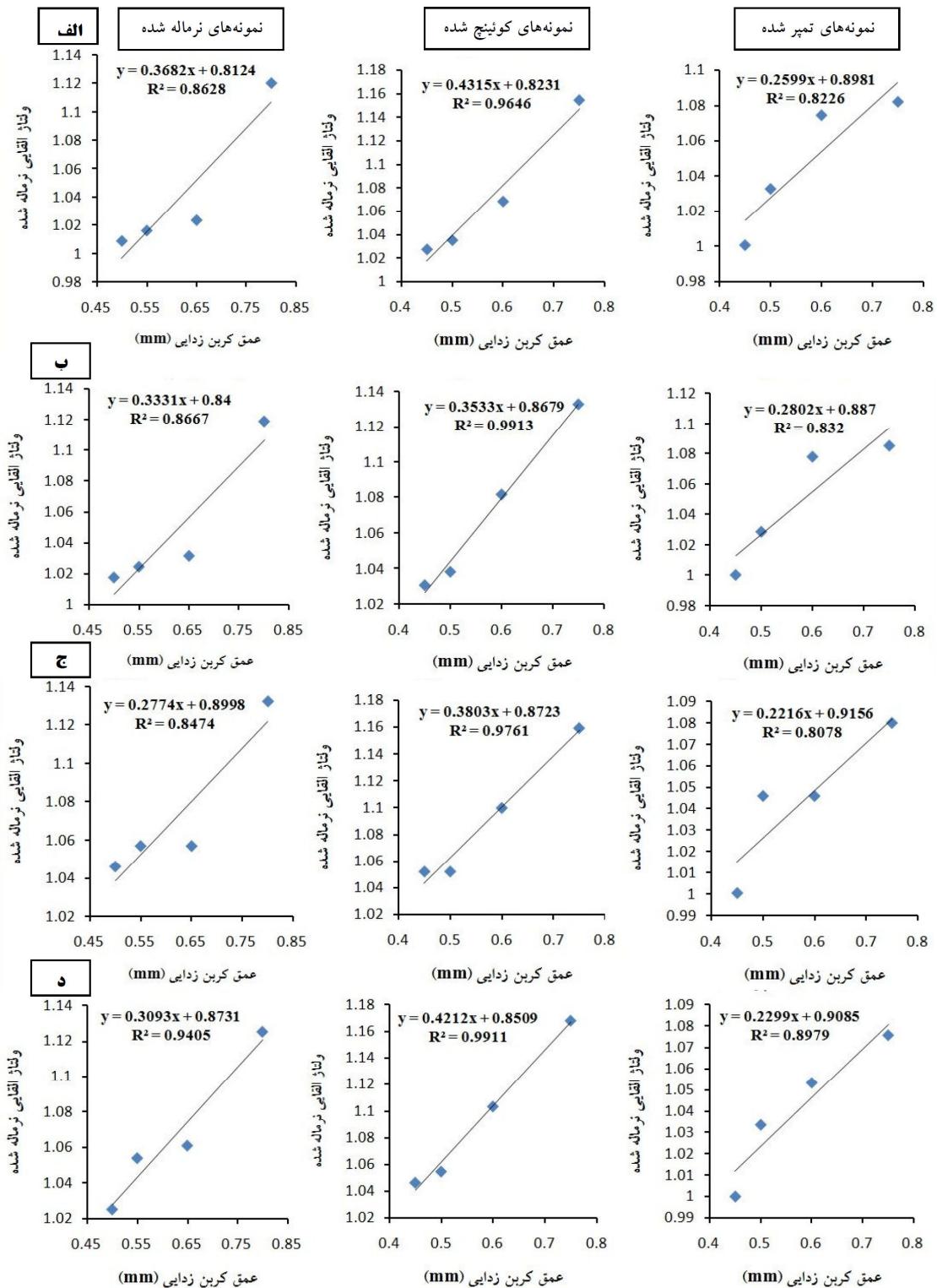
### ۲-۳ بررسی عمق لایه کربن زدایی با استفاده از روش غیرمخرب جریان گردابی

شکل ۴، در چهار فرکانس ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ هرتز، خروجی‌های بی بعد شده جریان گردابی را برای سه نوع عملیات حرارتی در عمق‌های متفاوت نشان می‌دهد. از بررسی این شکل، این نتیجه مهمنا حاصل می‌شود که تقریباً در تمامی فرکانس‌ها، تفاوت در خروجی‌های حاصل شده در اثر تشکیل لایه کربن زدایی، برای نمونه‌های کوئینچ شده بیشتر می‌باشد. این امر مؤید این مطلب می‌باشد که تعیین غیرمخرب عمق لایه کربن زدایی شده بعد از عملیات کوئینچ نسبت به عملیات نرماله و کوئینچ-تمپر با دقت بالاتر و حد تفکیک قابل قبولتری صورت می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که خروجی‌های بی بعد شده که در واقع بیانگر اختلاف نسبت به خروجی حاصل شده از نمونه‌ی کربن زدایی نشده است، مقادیر بیشتری را در عملیات نرماله نسبت به عملیات تمپر دارا می‌باشد. لذا بیشترین و کمترین حد تفکیک در تعیین غیرمخرب ضخامت لایه کربن زدایی را می‌توان به ترتیب برای نمونه‌های کربن زدایی شده ناشی از عملیات کوئینچ و کوئینچ-تمپر نسبت داد.



شکل ۴ : بزرگی خروجی‌های بی بعد شده برای ریز ساختارهای متفاوت کربن زدایی شده در زمان‌های متفاوت آستینیته در فرکانس‌های (الف) ۲۵ Hz، (ب) ۵۰ Hz، (ج) ۷۵ Hz و (د) ۱۰۰ Hz

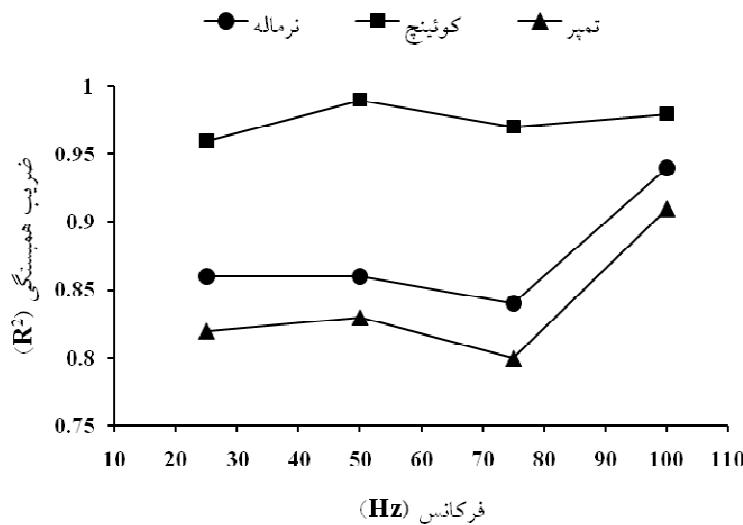
ارتباط بین عمق کرین زدایی شده با ولتاژهای القایی بی بعد شده در ۴ فرکانس مورد آزمایش در شکل ۵ نمایش داده شده است. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بالای بدست آمده نشان‌دهنده ارتباطهای خطی مناسب بین خروجی‌های جریان گردابی و عمق کرین زدایی می‌باشد.



شکل ۵ : ارتباط بین عمق لایه کرین زدایی شده و ولتاژهای القایی بی بعد شده جریان‌های گردابی برای شرایط متفاوت عملیات حرارتی در فرکانس‌های (الف) ۵۰ Hz، (ب) ۷۵ Hz، (ج) ۱۰۰ Hz و (د) ۲۵۰ Hz

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی فرکانس‌ها، بالاترین ضرایب رگرسیون بدست آمده برای ارتباط خطی بین خروجی‌های جریان گردابی و نمونه‌های کربن زدایی با ریزساختار مارتنتزیتی حاصل شده است. این امر بار دیگر مؤید این مطلب است که با استفاده روش غیرمخرب پیشنهادی بهترین زمان برای تعیین عمق لایه کربن زدایی بعد از عملیات کوئینچ می‌باشد.

با بررسی ارتباط بین خروجی‌های آزمون جریان گردابی و عمق‌های کربن زدایی ناشی از عملیات حرارتی‌های متفاوت و تعیین ضریب رگرسیون ناشی از آن، همان طور که در شکل ۶ مشهود است، بیشترین مقادیر ضرایب همبستگی در فرکانس ۱۰۰ هرتز حاصل شده است. این امر نشان دهنده آن است که به منظور تعیین غیرمخرب عمق لایه کربن زدایی شده با استفاده از روش پیشنهادی در این پژوهش، فرکانس بهینه ۱۰۰ هرتز می‌باشد.



شکل ۶: تغییرات ضریب همبستگی بر حسب فرکانس.

پاسخ جریان گردابی به دلیل اختلاف نفوذپذیری نسبی ( $\mu_r$ ) و رسانایی الکتریکی ( $\sigma$ ) بین ریزساختار و فازهای گوناگون، متفاوت می‌باشد. فرایند کربن زدایی در دماهای بالا ( $800\text{--}1200^\circ\text{C}$ ) یک شیب غلظتی از کربن را که از مغز نمونه تا سطح کاهش می‌یابد، ایجاد می‌کند. در حین سرد شدن از فاز آستنیت، لایه سطحی با مقادیر کربن کمتر، به فاز فریت تبدیل می‌شود در حالی که قسمت داخلی در حین سرد شدن بعد از عبور از دمای بحرانی به فاز پرلیت (در سرد کردن تعادلی) و یا فاز مارتنتزیت (در سرد کردن غیر تعادلی) تبدیل می‌شود، که فازهای حاصله دارای خواص مغناطیسی متفاوتی می‌باشند.

جانسون<sup>۲</sup> [۱۲] و همکارانش در پژوهش خود، نفوذپذیری مغناطیسی برای فولاد CK45، با ریزساختارهای مارتنتزیتی و فریت پرلیتی را به ترتیب ۷۰ و ۱۵۰ گزارش کرده‌اند. در پژوهش دیگری که به بررسی خواص مغناطیسی فولادهای مارتنتزیت تمپر شده در حرارتی شده پرداخته شده است، نفوذپذیری مغناطیسی نسبی فولاد با  $45/40$  درصد کربن با ریزساختار مارتنتزیت در دمای  $500$  درجه سانتیگراد،  $90$  اندازه گیری شده است [۱۳]. این در حالی است که این کمیت فیزیکی در فولادی با  $17/280$  کربن، (شامل فریت با مقادیر بسیار کمی پرلیت که معادل با لایه کربن زدایی در پژوهش حاضر می‌باشد)، در حدود گزارش شده است [۱۴]. مقادیر گزارش شده توسط محققین نشان می‌دهد که در بین ریزساختارهای ایجاد شده، ریزساختارهای مارتنتزیت و فریت به ترتیب کمترین و بیشترین نفوذپذیری مغناطیسی را دارا می‌باشند.

<sup>2</sup> Johnson

بنابراین مشخص است که نفوذپذیری مغناطیسی در فاز فریت در لایه کربن زدایی بیشتر از فازهای فریت-پرلیت، مارتنتزیت و مارتنتزیت تمپر شده در مغز نمونه‌ها می‌باشد. پس با افزایش عمق لایه کربن زدایی شده یا به عبارتی درصد فاز فریت، افزایش نفوذپذیری مغناطیسی (L) را شاهد هستیم. از طرفی رابطه ۱ بیان می‌کند که با افزایش نفوذپذیری مغناطیسی (L)، مقدار ضریب خودالقایی (L) افزایش می‌یابد.

$$(1) \quad L = \mu N^2 A/l$$

که در آن  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی،  $N$  تعداد دور سیم پیچ،  $A$  سطح مقطع سیم و  $l$  طول سیم پیچ می‌باشد. در نتیجه طبق روابط ۲ و ۳ با افزایش  $\mu$ ، مقدار مقاومت القایی ( $X_L$ ) و امپدانس ( $Z$ ) نیز افزایش می‌یابد.

$$(2) \quad X_L = 2\pi f L$$

$$(3) \quad Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = V/I$$

بنابراین افزایش در امپدانس دلیلی بر افزایش ولتاژ القایی در نمونه‌های با عمق کربن زدایی بیشتر می‌باشد که در شکل ۵ چنین ارتباط‌هایی مشاهده شد.

روش غیرمخرب جریان گردابی بر اساس تفاوت خواص مغناطیسی ایجاد شده ناشی از تغییرات ریزساختاری در مواد فرومغناطیسی، قادر به شناسایی تغییرات فازی می‌باشد. از این رو در مورد نمونه‌های کربن زدایی شده، به دلیل اینکه بیشترین تفاوت بین خواص مغناطیسی در سطح و مغز برای نمونه‌های کوئینچ شده حاصل شده است، بهترین شرایط برای شناسایی لایه کربن زدایی بعد از عملیات کوئینچ می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- براساس تفاوت خواص مغناطیسی ریزساختار فریت در لایه کربن زدایی شده و فریت-پرلیت، مارتنتزیت و مارتنتزیت تمپر شده در مغز نمونه‌ها، امکان مشخصه یابی فولادهای کربن زدایی شده با استفاده از روش غیر مخرب پایه مغناطیسی جریان گردابی فراهم شد.

۲- خروجی‌های جریان گردابی بی بعد شده که از تقسیم خروجی نمونه‌های کربن زدایی شده بر خروجی نمونه کربن زدایی نشده حاصل شده، در مورد نمونه‌های کوئینچ شده دارای بیشترین مقادیر در مقایسه با نمونه‌های نرم‌المه شده و تمپر شده باشد.

۳- بررسی ارتباطات خطی ایجاد شده بین عمق لایه کربن زدایی و خروجی‌های جریان گردابی و اعمال آنالیز رگرسیون، بار دیگر نشان داد که بهترین ارتباط خطی مربوط به نمونه‌های کربن زدایی شده با ریزساختار مارتنتزیتی می‌باشد. لذا امکان تعیین عمق لایه کربن زدایی برای این نمونه‌ها با دقت بالاتری فراهم می‌باشد.

۴- با بررسی آنالیز رگرسیون ناشی از ارتباط‌های عمق کربن زدایی و خروجی جریان گردابی، برای تمامی ریزساختارها، حداقل ضریب همبستگی در فرکانس ۱۰۰ هرتز حاصل شد و در نتیجه این فرکانس به عنوان فرکانس بهینه در تعیین غیرمخرب عمق لایه کربن زدایی با روش جریان گردابی معرفی شده است.

#### مراجع

- [1] R.B. Waterhouse and DE. Taylor, "The effect of heat treatment and decarburization on the fatigue behaviour of a 0.7% carbon steel", Proc, Inst Mech Eng Wear, 19, pp. 364-365 1972.
- [2] P.L.F. Rademakers, B.H. Kolster, "Corrosion of various ferritic steels in an isothermal sodium loop system", Journal of Nuclear Materials, 97, pp. 309-318, 1981.

- [3] S. Wei, Z. Jinhua, X. Liujie, L. Rui, "Effects of carbon on microstructures and properties of high vanadium high-speed steel", Materials Design, 27, pp. 58-63, 2006.
- [4] E. Bray Don, K. Stanley Roderic, "Nondestructive evaluation: a tool design, manufacturing and service", Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 415, 1997.
- [5] J. Donald. Hagemair, "Fundamentals of eddy current testing", ASNT, 1990.
- [6] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, and D. Chicot, "Eddy Currents and Hardness Testing for Evaluation of Steel Decarburizing", NDT and E International, 39, pp. 652–660, 2006.
- [7] S. Kahrobaee, M. Kashefi, A. Saheb Alam, "Magnetic NDT Technology for characterization of decarburizing depth" Surface and Coatings Technology, 205, pp. 4083–4088, 2011.
- ۸- مهرداد کاشفی، سعید کهربائی و علیرضا صاحب علم، کاربرد روش غیرمخرب جریان گردابی در تعیین عمق لایه کربن زدابی در فولادها، علوم و مهندسی سطح، ۱۰(۱۳۸۹)۴۹-۴۱.
- [9] X.J. Hao, W. Yin, M. Strangwood, A.J. Peyton, P.F. Morris, C.L. Davis, "off-line measurement of decarburization of steels using a multifrequency electromagnetic sensor, Scripta Materialia, 58, pp. 1033–1036, 2008.
- [10] M. Blaow, J.T. Evans, B.A. Shaw, "Surface decarburisation of steel detected by magnetic barkhausen emission, journal of materials science", 40, PP. 5517-5520, 2005.
- [11] O. Stupakov, O. Perevertov, I. Tomas, B. Skrbek, "Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 323, 1692-1697, 2011.
- [12] M. Johnson, C. Lo, S. Hentscher, E. Kinser, Analysis of conductivity and permeability profiles in hardened steel. In: Udpal L, Bowler N, editors. Electromagnetic nondestructive evaluation (IX), IOS, Amsterdam, pp. 135-42, 2005.
- [13] L.Kh. Kogan, A.P. Nichipuruk, L.D. Gavrilova, "Effect of the carbon content on the magnetic and electric properties of thermally treated carbon steels and the possibilities of testing the quality of tempering of articles produced from them via the eddy-current method", Russian Journal of Nondestructive Testing, 42, pp. 616-629, 2006.
- [14] S. M. Thompson, B.K. Tanner, The magnetic properties of pearlitic steels as a function of carbon content, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 123, pp. 283-298, 1993.