

Nondestructive Evaluation of Reformer Tubes in Direct Reduction of Iron Unit by Eddy Current Test Method

Karim Yosefpour Shirsavar¹, Majid Abbasi^{2*}, Seyed Jamal Hosseinipour³

1- MSc Student, Faculty of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

2- Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran.

*abbasim@nit.ac.ir

Abstract

The eddy current nondestructive evaluation was investigated to estimate the service life of cast austenitic stainless steel tubes in the reformer unit of the direct reduction iron ore plan. This evaluation was performed at 60 kHz based on the impedance plane and as a point inspection method. Reference tubes with specified microstructure and service life were used for calibration. The optical and SEM microscopes were used for microstructural studies. The microscopic examination showed that the ascast microstructure has austenitic matrix with eutectic cells containing chromium and niobium carbides. It was also observed that with increasing operating time and increasing the intensity of aging, the microstructural changes occur more severely. These changes include oxidation and carburization of surface, creating of destructive phases, and depletion of chromium in the austenite matrix, variation of eutectic cells morphology and formation of the creep microcracks. The results of eddy current evaluation showed that microstructural changes due to increasing the service life have a significant effect on the electromagnetic response of the tube. As the life of the tubes increases, the self-inductance resistance index increases sharply and the resistivity index decreases. The interaction of these two index is indicated as a point on the impedance plane of for each tube. Comparison of the position of these points in the impedance plane indicates the existence of linear changes between electromagnetic and aging behaviors. Therefore, the service life of the reformer tubes can be estimated from the electromagnetic responses in the eddy current method.

Keywords: Reformer, Direct Reduction of Iron, Life Assessment, Cast Stainless Steel, Eddy Current Testing, Impedance Plane.

ارزیابی غیرمخرب لوله‌های ریفورمر در واحد احیا مستقیم آهن به روش آزمون جریان گردابی

کریم یوسف پور شیرسوار^۱، مجید عباسی^{۲*}، سید جمال حسینی پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*abbasim@nit.ac.ir

چکیده

ارزیابی غیرمخرب به روش آزمون جریان گردابی برای برآورد عمر کارکردی لوله‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی ریختگی مربوط به واحد ریفورمر احیا مستقیم سنگ آهن بررسی شد. این ارزیابی تحت فرکانس ۶۰ kHz و بر اساس نقشه امپدانی و به صورت بازرسی نقطه‌ای انجام شد. از لوله‌های مرجع با ریزساختار و عمر کارکرد مشخص برای کالیبراسیون استفاده شد. از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی برای بررسی‌های ریزساختاری استفاده شد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که ریزساختار ریختگی این فولاد شامل زمینه آستنیت به همراه سل‌های یوتکتیک حاوی کاربیدهای غنی از کروم و نیوبیم است. همچنین مشاهده شد که با افزایش زمان کارکرد و افزایش شدت پیری، تغییرات ریزساختاری با شدت بیشتری رخ می‌دهد. این تغییرات شامل اکسید شدن و کربوراسیون سطحی، ایجاد رسوبات مخرب، کم شدن مقدار کروم محلول در زمینه آستنیت، تغییر مورفولوژی سل‌های یوتکتیک و ایجاد میکروتورک‌های خزشی است. نتایج ارزیابی جریان گردابی نشان داد که تغییرات ریزساختاری ناشی از افزایش عمر کارکردی بر پاسخ الکترومغناطیسی لوله تأثیر معنی‌داری دارد. با افزایش عمر لوله‌ها، شاخص مقاومت خودالقایی با افزایش شدید و شاخص مقاومت اهمی با کاهش همراه است. در نقشه امپدانی دستگاه جریان گردابی، نمایش برهمکنش این دو شاخص برای هر لوله به صورت نقطه مشخص شده است. مقایسه موقعیت این نقاط در نقشه امپدانی نشان‌دهنده وجود تغییرات خطی بین رفتارهای الکترومغناطیسی و پیری است. بنابراین می‌توان از روی پاسخ‌های الکترومغناطیسی در روش جریان گردابی، عمر کارکردی لوله‌های ریفورمر را برآورد کرد.

واژگان کلیدی: ریفورمر، احیا مستقیم آهن، تخمین عمر، فولاد زنگ‌زن ریختگی، آزمون جریان گردابی، نقشه امپدانی.

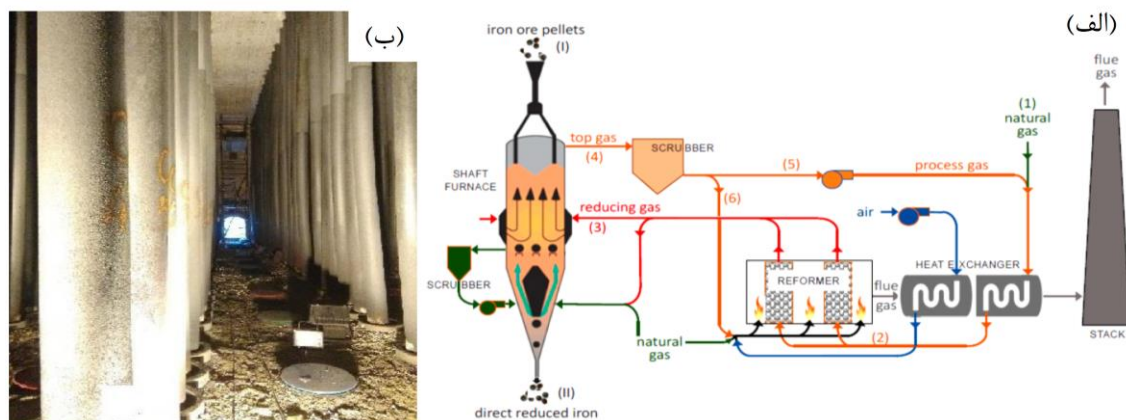
۱- مقدمه

کوره ریفورمر^۱ و چینی از این لوله‌ها را نشان می‌دهد. این لوله‌ها به روش ریخته‌گری گریز از مرکز افقی تولید می‌شوند و عموماً از جنس فولادهای مقاوم به حرارت حاوی مقادیر زیادی نیکل و کروم هستند. فولاد زنگ‌زن آستنیتی HP اصلاح‌شده با Nb از گریدهای ریختگی پرکاربرد برای ساخت لوله‌های کوره ریفورمر صنایع پتروشیمی و صنایع تولید آهن است [۳]. در حین کار، تغییرات ریزساختاری با دما موسوم به پیری^۲ در این فولادها رخ می‌دهد که می‌تواند خواص کارکردی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین به دلیل شرایط سخت کارکرد در دمای بالا و اکسیداسیون، وجود تنش‌های مکانیکی و حرارتی در

شکل (۱-الف) تصویری نمادین از فرایند تولید آهن اسفنجی به روش میدرکس را نشان می‌دهد. تولید گازهای احیایی در ریفورمر یکی از بخش‌های اصلی این فرایند است که در داخل لوله‌های ریفورمر انجام می‌شود [۱]. گازهای ورودی به ریفورمر، بخشی از گاز خروجی کوره احیاء، گاز طبیعی و بخار آب است که در مجاورت کاتالیست‌های مخصوص در داخل لوله‌ها در نتیجه یک واکنش گرماگیر در دمای بالا (بین ۷۰۰ °C و ۱۰۰۰ °C و فشار داخلی ۱ تا ۵ مگاپاسکال) به گازهای احیایی هیدروژن و مونوکسید کربن تبدیل می‌شوند. سپس این گازها، برای احیاء سنگ آهن و تولید آهن اسفنجی به داخل کوره میدرکس (کوره استوانه‌ای احیاء) تزریق می‌شود [۲]. شکل (۱-ب) تصویری از داخل

¹Reformer Tubes

²Aging Phenomenon



شکل ۱- الف: تصویر نمادین از واحد احیا مستقیم میدرکس [۱]، ب: چینش عمودی لوله‌های ریفرمر از جنس فولاد زنگ‌زن آستنیتی ریختگی

درون زمینه آستنیتی نفوذ می‌کند و موجب رسوب کاربیدهای $M_{23}C_6$ و M_7C_3 می‌شود. رسوب کاربید موجب کاهش غلظت کروم در زمینه می‌شود که باعث کاهش استحکام کششی و مقاومت به خزش خواهد شد [۸]. پدیده پیری و تشکیل فازهای مخرب با تغییر میزان کسر حجمی فازهای آستنیت و کاربیدها، خواص الکترومغناطیسی فولادهای زنگ‌زن آستنیتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۶]. در این زمینه، تحقیقات متعدد انجام شده و در حال توسعه است که از آن جمله می‌توان به استفاده از آزمون جریان گردابی برای نمایش فازهای ثانویه و یا تشکیل لایه‌های اکسیدی در فولادهای زنگ‌زن دوفازی [۹] و یا آستنیتی [۱۰، ۸-۱۲] نام برد.

سیلوا و همکاران [۸] به بررسی مشخصات ساختاری و مغناطیسی لوله‌های کارکرده از جنس فولاد زنگ‌زن آستنیتی با استفاده از آزمون جریان گردابی و میکروسکپ نیروی مغناطیسی^۱ پرداخت و نشان دادند که بین رفتار فرومغناطیسی لوله‌های کارکرده با فقیر شدن کروم^۲ در زمینه با رسوب‌گذاری کاربیدهای ثانویه رابطه‌ای وجود دارد. همچنین علی‌نژاد و عباسی [۹] در بررسی الکترومغناطیسی پدیده پیری در فولاد زنگ‌زن دوفازی ۲۳۰۴ نشان دادند که با تشدید پدیده پیری از طریق کاهش میزان فریت و تشکیل فازهای مخرب، امپدانس کاهش می‌یابد.

آرناز و همکاران [۱۲] با استفاده از آزمون جریان گردابی و میکروسکپ نیروی مغناطیسی به ارزیابی خواص مغناطیسی لایه‌های خارجی لوله از جنس فولاد زنگ‌زن آستنیتی

داخل ریفرمر و شکستن کاتالیست‌های درون لوله و در نتیجه بسته شدن لوله، احتمال بروز پدیده‌هایی نظیر اکسیداسیون، کربوره شدن، ترک‌دار شدن و اعوجاج و بشکه‌ای شدن لوله‌ها وجود دارد [۲].

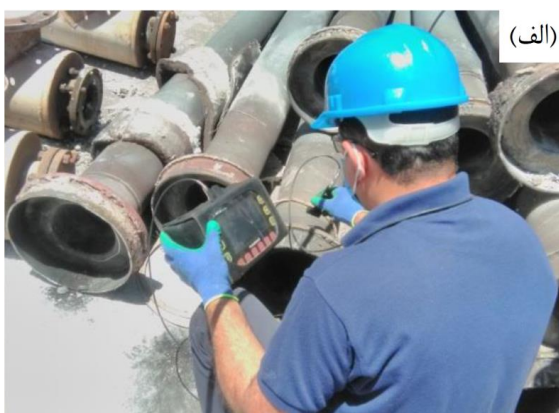
بر همین اساس، یک روش بازرسی غیرمخرب برای پایش و بررسی شرایط ساختاری این لوله‌ها نیاز است. به این منظور، روش جریان گردابی می‌تواند گزینه مناسبی برای فلزات به ویژه برای بررسی تغییرات فاز آستنیت در آلیاژهای پایه آهن باشد [۴، ۵].

طول لوله‌ها ۱۰-۱۴ متر و قطر خارجی ۱۰-۲۰ میلی‌متر و عمر واقعی این لوله‌ها بر طبق استاندارد API 530، ۱۰۰۰۰۰ ساعت (بیش از ۱۱ سال) برآورد شده است. عمر واقعی آن‌ها به متغیرهای مختلفی مانند فشار داخلی، درجه حرارت دیواره لوله‌ها، زمان سرویس و همچنین استحکام ساختاری بستگی دارد [۶]. مواد بکار رفته در ساخت این لوله‌ها باید خواصی چون مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر پوسته‌پوسته شدن و استحکام خزشی مناسبی برخوردار باشد. تولیدکنندگان آلیاژهای HP با اضافه کردن تعدادی عناصر موجب بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها در دمای بالا شدند. برای مثال، اضافه کردن Nb و Ti سبب تشکیل کاربیدهای پایدار و در نتیجه ارتقاء مقاومت به خزش این آلیاژها می‌شود [۷].

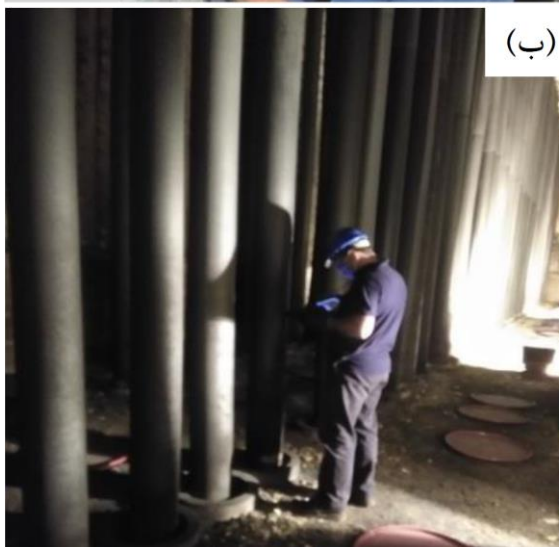
در شروع کار در درجه حرارت بین ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، یک لایه محافظ اکسید کروم روی لوله‌ها شکل می‌گیرد. این لایه می‌تواند سدی در برابر نفوذ کربن باشد. در دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، این لایه اکسیدی از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است و کربن به

¹Magnetic Force Microscopy (MFM)

²Chromium-Depleted



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصاویری از بازرسی جریان گردابی از: لوله‌های کار کرده خارج شده از محل نصب و (ب) لوله در محل نصب

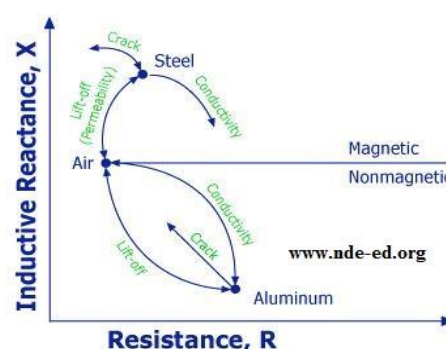
جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌زن آستنیتی مورد استفاده (Gx40NiCrSiNb35-25) (درصد وزنی)

Fe	Ni	Cr	Si	Mn	Ti	Nb	C	S	P
34.91	35.03	25.04	1.75	1.50	0.01	1.29	0.41	0.03	0.03

برای مطالعات میکروسکوپی، نمونه‌هایی از لوله‌های کارکرده، لوله‌های نو و قطعات ریخته‌گری شده جدید (نمونه‌هایی با ترکیب مشابه مجدد ذوب و ریخته‌گری شده است) تهیه شد. از محلول Glyceregia (گلیسرین، هیدروکلریک اسید، اسید نیتریک با نسبت ۱:۳:۳) برای حکاکی نمونه‌ها بکار گرفته شد. از میکروسکپ نوری مجهز به نرم‌افزار تحلیل تصویر، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم تحلیل‌گر شیمیایی برای تحلیل ریزساختار و شناسایی فازها استفاده شد.

ریختگی در حالت‌های مختلف پیرسازی پرداخت و مشاهده شد که شرایط کارکردی لوله‌های کوره ریفورمر بر تشکیل لایه اکسید سطحی و پاسخ مغناطیسی مؤثر است و هرچه دما و زمان پیرسازی افزایش یابد، نمونه‌ها دارای لایه اکسیدی ضخیم‌تر و پاسخ فرومغناطیسی بیشتری است. لذا روش جریان‌های گردابی که بر پایه خواص الکترومغناطیس مواد فلزی است، توانمندی مناسب برای شناسایی و تعیین این فازها در فولادهای زنگ‌زن آستنیتی را دارا خواهد بود [۴، ۹، ۱۲]. مطابق شکل (۲)، بر اساس نقشه امیدانسی می‌توان تغییرات خواص مغناطیسی و الکتریکی نمونه‌های فلزی ناشی از تغییرات ریزساختاری را ارزیابی کرد [۸]. هدف از این مقاله، ارزیابی غیرمخرب و تعیین عمر کارکردی لوله‌های واحد ریفورمر احیاء مستقیم در شرکت فولاد بردسیر کرمان است.

Eddy Current Impedance Plane Responses



شکل ۲- نقشه امیدانسی آزمون جریان گردابی

۲- روش تحقیق و بازرسی

بازرسی به صورت میدانی و در هنگام تعمیر و نگهداری اساسی واحد ریفورمر احیاء مستقیم شرکت فولاد بردسیر کرمان در سال ۱۳۹۹ خورشیدی انجام شد. شکل (۳) تصاویری از نحوه انجام بازرسی در محل را نشان می‌دهد. ارزیابی اصلی روی ۵۰۴ لوله (در ۶ ردیف ۸۴ تایی) در ارتفاع‌های ۱/۵ متری از کف کوره ریفورمر انجام شد. البته ارزیابی‌های مقدماتی تا زیر سقف کوره (ارتفاع تقریبی ۱۰ متر) انجام شده است. لوله‌ها از جنس فولاد زنگ‌زن آستنیتی گرید HP بود که ترکیب شیمیایی آن با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی نشری با جرقه^۱ مشخص و در جدول (۱) آورده شده است.

^۱Spark Optical Emission Spectrometer

جدول ۲- دسته‌بندی لوله‌ها بر حسب عمر کارکردی و امیدانس معادل آن و تعداد لوله شاهد منتخب برای کالیبراسیون

رده / کلاس	دسته‌بندی عمر کارکردی لوله‌ها	امیدانس (± 25)	تعداد لوله شاهد
کلاس ۱	نو و معادل نو یا کارکرد کمتر از ۲ سال	۷۰۰	۵
کلاس ۲	کارکرد معادل تا ۳ سال	۷۵۰	۵
کلاس ۳	کارکرد معادل تا ۴ سال	۸۰۰	۳
کلاس ۴	کارکرد معادل تا ۵ سال	۹۰۰	۵
کلاس ۵	کارکرد معادل تا ۶ سال (شروع فرایبری)	۹۵۰	۳
کلاس ۶	کارکرد معادل تا ۷ سال (فرایبری)	۱۰۰۰	۵
کلاس ۷	کارکرد معادل بیش از ۷ سال (فرایبری شدید)	۱۰۵۰	۵

برای بازرسی غیرمخرب از دستگاه جریان گردابی مدل IH-HCP 103 و یک پراب مخصوص بازرسی لوله با هسته فریتی استفاده شده است. فریت یک فرومغناطیس نرم است که میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ را به شکل مناسبی روی نمونه مورد آزمون متمرکز می‌کند و دقت و کیفیت بازرسی را بهبود می‌دهد. شکل (۴) تصویری از این تجهیزات را نشان می‌دهد. از لوله‌های مرجع با عمر کارکردی برای کالیبره کردن دستگاه مشخص استفاده شده است (از لوله‌های نو و تعویض شده قبلی با تاریخچه کارکرد مشخص استفاده شده است). بنابراین مقایسه عمر کارکردی لوله‌ها بر اساس نمونه‌های شاهد با عمر کارکردی مختلف موجود در کارخانه انجام شده است که راهنمایی برای تعیین وضعیت کارکردی لوله‌های بعدی بوده است.



شکل ۴- تصویری از: (الف) دستگاه جریان گردابی پرتابل مدل IH-ECP 104 و (ب) پراب مخصوص مورد استفاده.

جریان گردابی برگزیده شده است. کلیه داده‌های ارائه شده در این مقاله مربوط به این شرایط آزمایش است. قابل ذکر است که در بازرسی مواد فرومغناطیسی به دلیل غالب شدن اثرهای مغناطیسی از فرکانس‌های پایین برای افزایش عمق نفوذ میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. ولی چون لوله مورد بازرسی از جنس فولاد آستنیتی با خاصیت پارامغناطیسی است، فرکانس بالاتر توانسته پاسخ بهتری ارائه دهد. از این‌رو، فرکانس ۶۰ kHz انتخاب شده است. برای لوله‌هایی که نگرانی‌هایی از ارزیابی عمر عملکرد آنها وجود داشته، بازرسی در نقاط دیگر غیر از نقطه مرجع مکانی (بر حسب طولی یا شعاعی) نیز تکرار شده است.

ابتدا بازرسی‌های مقدماتی در راستای طول لوله‌های نو و کارکرده و در راستای شعاعی چند لوله (تا ۱۰۰ لوله) در نقاط مختلف کوره انجام شده است تا نحوه تغییرات پاسخ الکترومغناطیس لوله‌ها مشخص شود. همچنین در این بررسی مقدماتی، اثر فرکانس در محدوده ۱-۲۰۰ کیلوهرتز (با دو پراب با محدوده کارکردی مختلف ۱-۴۰ و ۴۰-۲۰۰ کیلوهرتز) مشخص شده است.

بر اساس آزمایش‌های مقدماتی و تحلیل‌های آماری انجام شده، نقطه‌ای از لوله در ارتفاع ۱۵۰ سانتی‌متری از کف کوره به عنوان مرجع مکانی لوله و فرکانس ۶۰ kHz و قدرت تفکیک ۳۷ dB به عنوان شرایط مناسب آزمون

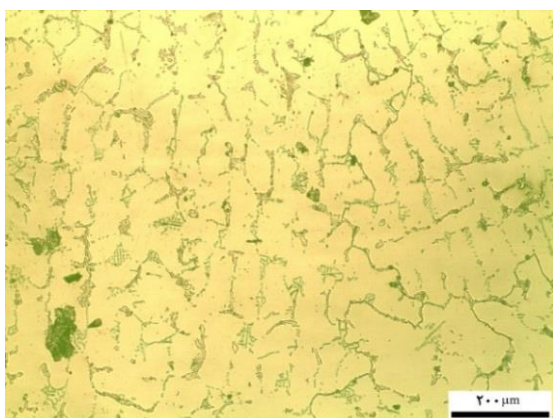
تفاوت دارند. بنابراین از نظر کارکردی می‌توان انتظار داشت که لوله‌ها با طول عمر و مدت نصب یکسان، وضعیت کارکردی و در اصطلاح "عمر کارکردی" متفاوتی داشته باشند.

به دلیل وجود لایه کربوره یا اکسید شده، سطح بیرونی لوله‌ها در نقطه مورد بازرسی به طور جزئی تا عمق ۱ میلی‌متر و مساحت تقریبی ۹۰۰ میلی‌متر مربع (معادل مربعی با ابعاد ۳۰ میلی‌متر) سنگ زده شده است تا بازرسی جریان گردابی به‌درستی انجام شود و نتایج با کمترین تأثیر از کیفیت سطح خشن به دست آید. البته لوله‌ها در حالت سنگ‌زده شده دارای X_L به مقدار حداکثر ۷ واحد بیشتر و R_X به مقدار حداکثر ۱۰ واحد کمتر از حالت سنگ‌زده نشده داشته‌اند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار لوله‌ها

شکل (۵)، تصویر میکروسکپ نوری لوله‌های ریفرمر با عمر کارکردی کلاس ۱ از نمونه ریخته‌گری‌شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریزساختار به دلیل دارا بودن مقدار زیاد نیکل، کروم و کربن در ماده، شامل زمینه‌ای از دندریت‌های آستنیت و شبکه پیوسته سل‌های یوتکتیکی غنی از کاربید کروم (M_7C_3) و نیوبیم (NbC) است. این فازهای یوتکتیکی در مرزخانه و زمینه آستنیتی به‌صورت جدا از هم قابل تشخیص هستند. شکل و توزیع کاربیدها به‌صورت لایه‌ای^۵ و پیوسته است [۲،۳].



شکل ۵- تصویر میکروسکپی نوری لوله‌ها در حالت ریختگی شامل زمینه آستنیتی با شبکه پیوسته کاربیدهای یوتکتیک.

^۵Lamellar

دستگاه بازرسی به کار رفته تغییرات ولتاژ و جریان پراب را در هر لحظه اندازه‌گیری و هم‌زمان شاخص‌های اولیه جریان گردابی شامل مقدار مقاومت القایی^۱ نرمال شده، (X_L) و مقدار مقاومت اهمی^۲ نرمال شده، (R_X) را محاسبه و سپس به‌صورت اعداد بی‌بعد دیجیتالی شده چهار رقمی (در محدوده ۰-۱۱۰۰) روی صفحه نمایش دستگاه (نقشه امیدانسی) نمایش می‌دهد. همچنین موقعیت مکانی هر نمونه در صفحه نمایش به صورت نقطه نمایش داده می‌شود که قابل نشانه‌گذاری و ثبت است.

در این تحقیق، لوله‌های نو به‌عنوان نمونه مرجع (برای نقطه مبنا^۳) در نقشه امیدانسی^۴ انتخاب شده است. دستگاه به صورت خودکار، مقادیر انتخاب شده برای نقطه مبنا (مقادیر X_L و R_X) را به اعدادی نزدیک 495 ± 5 تبدیل می‌کند (اعداد نرمال شده بدون بعد). پاسخ الکترومغناطیسی بقیه لوله‌ها با این نقطه مبنا، مقایسه شده است. روی صفحه نمایش، مکان نقطه مبنا با مختصات اسمی (۴۹۵،۴۹۵) به گونه‌ای تنظیم شده است که امیدانسی پراب موقعی که از روی نمونه برداشته می‌شود و پراب در هوا است، روی صفحه نمایش قابل مشاهده باشد. به علاوه، مکان نقطه مبنا و محدوده تغییرات برای لوله‌ها در کلاس ۱ با یک محدوده مربعی مشخص شده است. با این کار، بازرسی و کنترل وضعیت دستگاه در حین بازرسی آسان شده است.

بعد از قرار دادن پراب به‌صورت کاملاً عمودی روی نمونه، نقطه متناظر به هر لوله روی صفحه نمایش دستگاه (نقشه امیدانسی) بر حسب مختصاتی از R_X (محور افقی) و X_L (محور عمودی) ثبت و نمایش داده می‌شود که می‌توان آن نقطه را روی صفحه مشاهده و ثبت نمود.

نتایج بازرسی لوله‌ها در ۷ کلاس ارزیابی شده است و در جدول (۲) کلاس‌بندی لوله‌ها از نظر عمر کارکردی‌شان و مقدار اسمی امیدانسی (Z) نشان داده شده است. مقدار اسمی امیدانسی (Z) به صورت مجذور مجموع مربعات دو شاخص R_X و X_L معین شده است. تعداد لوله منتخب برای هر کلاس در مرحله کالیبراسیون دستگاه هم مشخص شده است.

بسته به نحوه کنترل فرایند کار در ریفرمر، وضعیت لوله‌ها در ردیف‌ها و موقعیت‌های مختلف با یکدیگر

^۱Inductance

^۲Resistance

^۳Null Point

^۴Impedance Plane

دارای رنگ‌های سیاه و خاکستری روشن است که رنگ روشن، کاربیدهای غنی از نیوبیم در مرزهای دندریتی را نشان می‌دهد. رنگ‌های سیاه، نشان‌دهنده کاربیدهای غنی از کروم از نوع M_7C_3 است که در دمای بالا ناپایدار شده و بخش زیادی به کاربیدهای ثانویه $M_{23}C_6$ تبدیل می‌شود [۱۵].

محققان زیادی در رابطه با تحولات ریزساختاری شامل نوع، شکل و توزیع عناصر تشکیل‌دهنده در این آلیاژ کار کردند.

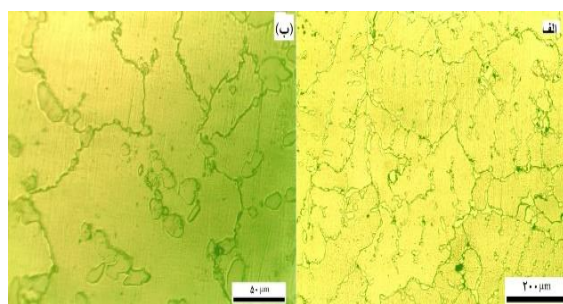
شی و همکاران [۱۴] مشاهده کردند که با افزایش دما و زمان کارکرد، تعداد و تجمع کاربیدهای ثانویه کاهش می‌یابد. به دلیل نفوذ زیاد، کاربیدها در اثر کارکرد در دمای بالا درشت خواهند شد.

مطابق شکل (۸)، در طول فرایند کاری در دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با گذشت زمان، ریزساختار دچار تخریب می‌شود. ابتدا نفوذ کربن رخ می‌دهد و سپس ادغام و درشت شدن کاربیدها مشاهده می‌شود. در نهایت، در اثر تخریب بیشتر ریزساختار، حفره‌های خزشی ایجاد شده و به هم می‌پیوندند. در ادامه، ترک‌دار شدن کاربیدها، تشکیل میکروتُرک‌های بین‌دندریتی و ایجاد ترک‌های درشت در مرحله سوم خزش مشاهده خواهد شد [۱۶].

۲-۳- تهیه نقشه امپدانسی و تحلیل ریزساختار

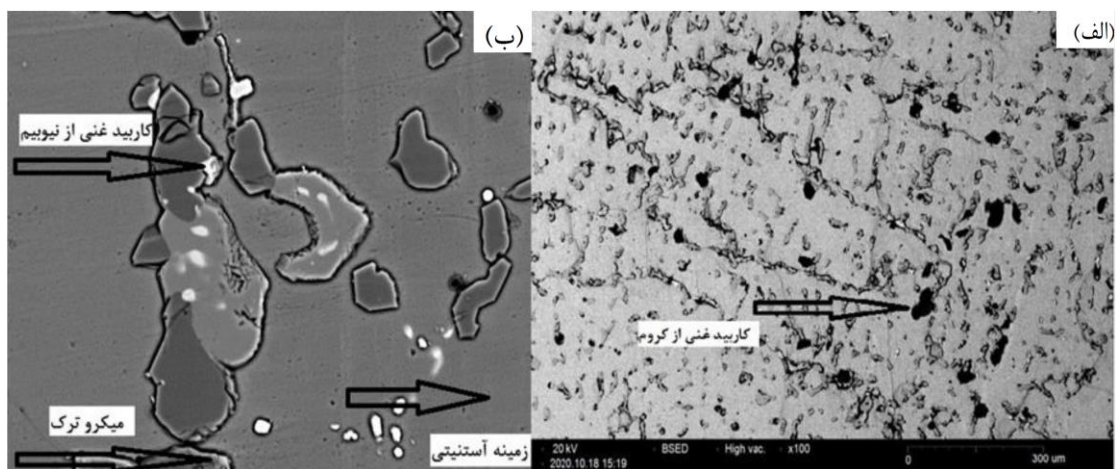
در شکل (۹)، نقشه امپدانسی تعدادی از لوله‌های مختلف حاصل از آزمایش در فرکانس ۶۰ kHz نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که موقعیت مکانی هر لوله (مختصات نقطه‌ای) در نقشه امپدانسی متفاوت است و با افزایش عمر لوله‌ها موقعیت آنها از نقطه مبنا با مختصات اسمی [۵۰۰، ۵۰۰] در ربع سوم به سمت ربع دوم به صورت خطی تغییر جهت می‌دهد. همچنین با افزایش عمر کارکردی لوله‌ها، شاخص مقاومت الکتریکی کاهش و شاخص نفوذپذیری مغناطیسی افزایش می‌یابد.

وقتی لوله‌ها در معرض دما قرار می‌گیرند، شکل و کسر حجمی کاربیدهای تشکیل‌شده تغییر می‌کند، در اثر کارکرد در دمای کاری ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاربید اولیه M_7C_3 مطابق شکل (۶)، ناپایدار شده و تبدیل به کاربیدهای ثانویه غنی از کروم ($M_{23}C_6$) می‌شود [۱۴، ۱۵]. همچنین به‌طور چشم‌گیری، درشت شدن کاربیدهای کروم در طول کار رخ می‌دهد. درحالی‌که اندازه کاربیدهای غنی از نیوبیم بدون تغییر می‌ماند. بعد از کارکرد طولانی در دمای کاری حدود ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل نفوذ کربن در کاربیدهای اولیه، مقدار کاربیدهای ثانویه $M_{23}C_6$ کاهش می‌یابد [۸]. کاربیدهای نیوبیم (NbC) در دمای بین ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در اثر کارکرد خیلی طولانی تبدیل به فاز G (نیکل، نیوبیم، سیلیسیم) می‌شود [۱۴]. این استحاله در ریزساختارهای کاملاً پیر شده رخ می‌دهد که بر خواص مغناطیسی و نتایج جریان گردابی تأثیرگذار است [۹].

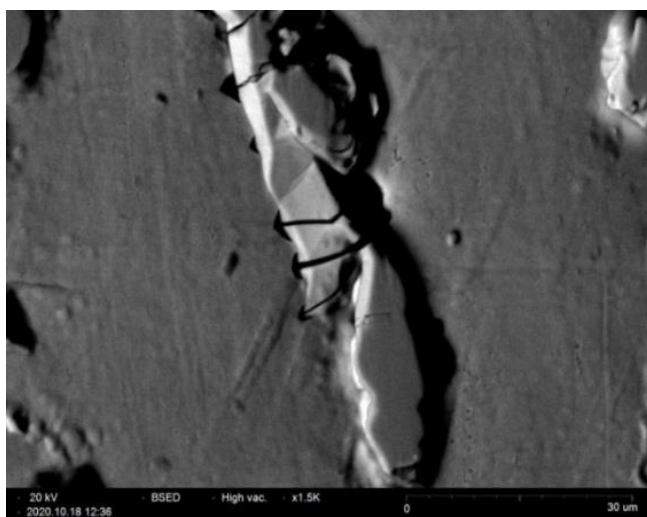


شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نوری لوله‌ها در حالت کارکرده (کلاس ۵) در دو بزرگنمایی مختلف.

شکل (۷)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت الکترون برگشتی از لوله‌های کارکرده در سرویس موردنظر در دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. کاربیدهای غنی از کروم به‌طور چشم‌گیری در طول سرویس (مطابق تصویر ۷ حالت الکترون ثانویه) درشت می‌شود. در حالت الکترون برگشتی، ریزساختار با زمینه آستنیتی و



شکل ۷- تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی از لوله‌های کارکرده در سرویس در حالت الکترون برگشتی در دو بزرگ‌نمایی.



شکل ۸- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی از تخریب ریزساختار: ترک‌های خزشی در مرز فازی و شکست کاربیدها



شکل ۹- تصویر نمایش گر دستگاه جریان گردابی و نقشه امپدانسی لوله‌ها با درجه‌های پیری مختلف

شکل (۲) نیز نشان می‌دهد که با تغییر هدایت الکتریکی و خواص مغناطیسی ماده مورد آزمایش و وجود ترک، پاسخ الکترومغناطیسی در نقشه امپدانس تغییر می‌کند. در آزمایش حاضر مشابه همین پدیده، مشاهده شده است. لوله‌های سالم در کلاس ۱ که دارای مختصات اسمی حدود [۴۹۵، ۴۹۵] است (نقطه آبی رنگ در داخل مربع زرد رنگ در شکل ۹)، رفتار پارامغناطیس بیشتری از خود نشان می‌دهد. با افزایش درجه پیری، پاسخ الکترومغناطیسی تغییر می‌کند که این تفاوت در خواص الکترومغناطیسی را می‌توان به تغییرات متالورژیکی اتفاق افتاده در ریزساختار، وجود لایه‌های اکسیدی در نزدیک سطوح خارجی و ایجاد میکروتُرک‌ها مرتبط دانست [۸، ۱۲].

هر لوله کارکرده‌ای خواص الکترومغناطیسی متفاوتی با یکدیگر و نسبت به نمونه نو و کار نکرده دارد. هرچه عمر و کارکرد لوله‌ها بیشتر باشد یا شرایط کارکرد از نظر دما، شدت بیشتری داشته باشد، ریزساختار آن و خواص فیزیکی آن تغییرات شدیدتری نشان خواهند داد. به عنوان نمونه، شکل، اندازه و توزیع فازهای مختلف تغییر خواهد کرد یا فازهای مخرب جدیدی تشکیل می‌شود و همچنین زمینه آستنیتی از کروم خالی می‌شود [۱۲]. این تغییرات که در بخش ۳-۱ برای لوله‌های آستنیتی از جنس فولاد زنگ نزن HP بررسی شد، می‌تواند سبب تغییرات خواص الکترومغناطیسی باشد که در نقشه امپدانس قابل مشاهده است. نتایج تحقیق حاضر با داده‌های تحقیقات مگید و همکاران [۱۳] تطابق دارد.

داده‌های عددی مربوط به این بازرسی و کالیبراسیون در جدول (۳) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان پیری، مقدار X_L از ۴۹۲ برای لوله های کلاس ۱ تا بیش از ۱۰۰۸ برای لوله های کلاس ۷ افزایش می‌یابد و در مقابل مقدار R_x از ۴۹۶ تا ۲۹۰ کاهش می‌یابد. توجه شود که لوله‌هایی که مقدار X_L آنها از مقدار X_L نقطه هوایی (۸۴۴) بیشتر است، به این معنی می‌تواند باشد که در این لوله های به مقدار جزیی خاصیت فرومغناطیسی مشاهده می‌شود که می‌تواند موید وقوع پدیده فرایپیری باشد. همچنین در برخی از نمونه‌های فرایپیری شده در کلاس‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شود که مقدار R_x آن کمتر از مقدار متناظر نقطه هوایی (۳۲۴) است که می‌تواند نشان دهنده بروز میکروتُرک‌ها در مرز فازها و مرز دانه‌ها باشد.

توجه شود که در شکل (۹)، نقطه سبز رنگ نشان‌دهنده امپدانس نرمال سیم‌پیچ در هوا در لحظه مورد آزمون و نقطه آبی کنار آن، امپدانس نقطه هوایی در شروع آزمون است. تغییرات جزیی امپدانس در حین بازرسی از این طریق مشخص شده و در صورت نیاز (تغییرات ± 5 واحد برای R_x و X_L مورد قبول بوده است) با استفاده از نمونه مبنا (لوله نو و کارنکرده) کالیبراسیون مجدد انجام می‌شد. (تقریباً هر ۱۵ دقیقه اینکار انجام می‌شد).

با توجه به بیان فوق می‌توان با مقایسه موقعیت‌های مکانی نمونه‌ها در صفحه نمایش (نقشه امپدانس)، تحلیل‌ها و مقایسه‌های متالورژیکی روی ریزساختار انجام داد و وقوع پدیده پیری لوله‌ها را دنبال کرد.

جدول ۳- نتایج داده‌های آزمایش جریان گردابی لوله‌های نو و کارکرده در فرکانس ۶۰kHz

شاخص الکترومغناطیس نرمال شده						تعداد مشاهده	امپدانس اسمی	کلاس کارکردی لوله
Z (امپدانس)		X _L (مقاومت القایی)		R _x (مقاومت اهمی)				
انحراف متوسط معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار	متوسط			
۶,۳	۶۹۹	۹,۳	۴۹۲	۵,۰	۴۹۶	۵	۷۰۰	کلاس ۱
۱۶,۱	۷۶۶	۱۶,۱	۶۱۳	۶,۶	۴۵۹	۵	۷۵۰	کلاس ۲
۹,۴	۷۹۷	۹,۸	۶۷۲	۲,۴	۴۲۸	۳	۸۰۰	کلاس ۳
۱۶,۳	۸۹۷	۲۰,۸	۸۰۳	۱۲,۷	۴۰۱	۵	۹۰۰	کلاس ۴
۶,۸	۹۵۲	۸,۸	۸۸۲	۶,۲	۳۵۸	۳	۹۵۰	کلاس ۵
۲۰,۲	۱۰۴۱	۲۳,۱	۹۸۹	۹,۰	۳۲۴	۵	۱۰۵۰	کلاس ۶
۱۰,۵	۱۰۵۸	۱۵	۱۰۰۸	۷,۳	۲۹۰	۵	۱۱۰۰	کلاس ۷
۸,۱۲	۹۰۳	۹,۸	۸۴۴	۳,۱	۳۲۴	۲۰	۹۰۰	نقطه هوا
۱,۸	۶۹۷	۱,۶	۴۹۲	۱,۹	۴۹۵	۲۰	۷۰۰	نقطه مبنا (لوله نو)

۴- نتیجه‌گیری

۱. لوله‌های کوره ریفرمر از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ریختگی گرید HP است که رفتار آن در شرایط کارکردی در دمای بالا با تشکیل لایه‌های اکسیدی و ایجاد فازهای مخرب و میکروتورها تغییر می‌کند. این تغییر رفتار موسوم به پدیده پیری، عامل اصلی واماندگی لوله‌ها به شمار می‌آید که به شکل اعوجاج، بادکردگی و ترکدار شدن لوله‌ها در انتهای عمر کارکردی مشاهده می‌شود.

۲. نتایج بازرسی نشان داد که می‌توان عمر کارکردی این لوله‌ها را با روش جریان گردابی به صورت نقشه امیدانسی بررسی و ارزیابی کرد.

۳. مشاهده شد که با افزایش عمر کارکردی لوله‌ها، شاخص مقاومت القایی افزایش شدید و شاخص مقاومت اهمی کاهش می‌یابد و در نتیجه پاسخ‌های معادل امیدانس آنها در نقشه امیدانسی با حرکت خطی از پایین به بالا تغییر می‌کند و خاصیت پارامغناطیسی لوله‌ها کاهش می‌یابد.

۴. در این بررسی، وضعیت عمر کارکردی لوله‌ها در ۷ کلاس دسته‌بندی شده است. کلاس ۱ معادل نو و کلاس‌های ۲ تا ۷ به ترتیب عمر کارکردی بیشتر دارند. کلاس‌های ۶ و ۷ مربوط به لوله‌هایی است که شدیدترین تغییرات ریزساختاری ناشی از پیری دارند و حتی سیگنال‌های فرومغناطیسی و نشانه‌های پدیده فراپیری را از خود نشان می‌دهند. در مقابل، کلاس‌های ۲ تا ۵ وضعیت قابل قبول‌تری دارند و نگرانی کمتری در تداوم استفاده از آنها نسبت به لوله‌های کلاس ۶ و ۷ وجود دارد.

۴. در برخی از لوله‌ها تغییرات شدید پاسخ الکترومغناطیسی مشاهده شده است که می‌تواند به علت ذوب جزئی لوله در اثر دمای موضعی شدید و تغییر شکل (بادکردگی) و یا تشکیل نواحی مغناطیسی باشد.

مطالعات پیشین [۱۲] با اندازه‌گیری لایه کربوره شده در لوله کوره ریفرمر توسط روش‌های مختلف الکترومغناطیس نشان داد که با رسوب‌گذاری کاربیدهای کروم در زمینه آستنیتی می‌توان این تغییرات مغناطیسی را توجیه کرد که با نتایج این پژوهش تطابق دارد. ابتدا کربوراسیون یک فرآیند شیمیایی اصلی است، سپس پدیده پیری و در نهایت آسیب ناشی از خزش، تحولات ریزساختاری بعدی هستند که در حین کار بوجود می‌آید. در نتیجه با تغییرات ریزساختاری، نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی نیز تغییر کرده است که با آزمون جریان گردابی قابل ارزیابی است [۸].

طبق پژوهش سیلوا و همکاران [۸] زمینه آستنیتی ریزساختار در اثر کارکرد لوله‌ها در دما و زمان طولانی، خالی از کروم می‌شود و همین عامل، کاهش خاصیت پارامغناطیسی زمینه آستنیتی لوله‌ها را در پی دارد. بنابراین آزمون جریان گردابی برای شناسایی تغییرات مرتبط با ریزساختار در لوله‌های فولاد زنگ‌نزن HP مفید است که در مراجع [۱۲] و [۱۳] نیز مشاهده شده است.

در تحقیق حاضر، این امکان فراهم شده است که با طراحی مناسب آزمون جریان گردابی و با استفاده از نقشه امیدانسی، درجه پیری و به عبارت دیگر معادل عمر لوله‌های ریفرمر ارزیابی شود. این بازرسی روی ۵۰۴ لوله در سطح صنعتی انجام شده است. توجه شود که در کنار روش جریان گردابی از سایر روش‌های بازرسی غیرمخرب شامل چشمی، فراصوتی (ساده و آرایه فازی)، ارزیابی ابعادی و MMR^۱ استفاده شد (توسط تیم‌های اجرایی دیگر). همچنین در بازرسی اولیه بر اساس ارزیابی‌های چشمی مشخص شده است که برخی از لوله‌ها دارای عیوب مشهود شامل بشکه‌ای شدن، اعوجاج و پیچ خوردگی شدید و ترک‌دار شدن درشت بوده‌اند که بدون ضرورت بازرسی جریان گردابی تعویض شده‌اند.

طراحی آزمایش جریان گردابی در این بازرسی به گونه‌ای انجام شده است که بیشترین حساسیت را به تغییرات ریزساختار و میکروتورک‌های خزشی ناشی از پدیده‌های پیری داشته باشد.

¹Metal Magnetic Memory Effect

- [7] Soares G. D.de A., De Almeida, L. H., da Silva, T. L., May, I. L. (1992). Niobium additions in HP heat-resistant cast stainless steels. *Mater. Charact.*, Vol. 29, pp. 387-396.
- [8] Silva, I. C., Rebello, J. M., Bruno, A. C., Jacques, P. J., Nysten, B., and Dille, J. (2008). Structural and magnetic characterization of a carburized cast austenitic steel. *Scr. Mater.*, Vol. 59, pp. 1010-1013.
- [۹] علی‌نژاد، ح.، عباسی، م. (۱۳۹۹). ارزیابی میکروسکوپی و الکترومغناطیسی پدیده پیری در فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۳۰۴. *مهندسی متالورژی*، دوره ۲۳، شماره ۲، ص ۱۱۷-۱۰۳.
- [۱۰] اسدی، ا.، عباسی، م.، شامقلی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی غیرمخرب ریزساختار چدن مقاوم به سایش نایه‌دارد ۴ با استفاده از آزمون جریان گردابی، *مجله مهندسی متالورژی*، دوره ۱۸، شماره ۵۹، ص ۳۴-۴۳.
- [۱۱] جواهری، م.، عباسی، م. (۱۳۹۶). ارزیابی ریزساختار و سختی فولاد ریختگی عملیات حرارتی شده با آزمون غیرمخرب جریان گردابی. *پژوهش‌نامه ریخته‌گری*، دوره ۱، شماره ۳، ص ۱۴۹-۱۶۰.
- [12] Arenas, M.P. et al. (2018). Magnetic evaluation of the external surface in cast heat-resistant steel tubes with different aging states. *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 456, pp. 346-352.
- [13] Meguid, S. A., Arenas, M. De Almeida, L. H., Sacramento, R., Pereira, G. R., De Janeiro, R. (2015). Magnetic characterization by eddy current testing to evaluate the aged microstructure of reformer furnace tubes. In: *Proceeding of the 4th Int. Cong. of J. Mech.*, (pp. 1829-1830).
- [14] Shi, S., Lippold, J. C. (2008). Microstructure evolution during service exposure of two cast, heat-resisting stainless steels - HP-Nb modified and 20-32Nb. *Mater. Charact.*, Vol. 59, pp. 1029-1040.
- [15] Rodríguez, J., Haro, S., Velasco, A., Colás, R. (2000). Metallographic study of aging in a cast heat-resisting alloy. *Mater. Charact.*, Vol. 45, pp. 25-32.
- [16] Guglielmino, E., Pino, R., Servetto, C., Sili, A. (2016). Creep damage of high alloyed reformer tubes. Vol. 2. Elsevier Ltd.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از مسئولین آزمایشگاه‌های متالوگرافی و انجماد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و شرکت‌های فولاد بردسیر، آزمون فولاد، ایرانیان هیبرید شمال برای حمایت‌هایشان از انجام این بازرسی و تحقیق صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] Béchara, R., Hamadeh, H., Mirgaux, O., Patisson, F. (2020). Carbon impact mitigation of the iron ore direct reduction process through computer-aided optimization and design changes. *Metals (Basel)*, Vol. 10, pp. 1-12.
- [2] Ray, K., Kumar, G., Krishna, M., Gunjan, B. Goswami, Bose, S. C. (2011). Microstructural studies and remnant life assessment of eleven years service exposed reformer tube. *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 529, pp. 102-112.
- [3] Wang, M., Flahaut, D., Zhang, Z., Jones, I. P., Chiu, Y. L. (2019). Primary carbide transformation in a high performance micro-alloy at 1000 °C. *J Alloy Compd*, Vol. 781, pp. 751-760.
- [4] Asadi, A., Abbasi, M., Shamgholi M. (2018). Eddy current detection of retained austenite in NiHard4 cast Iron, *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 29, pp. 38-47
- [۵] جواهری، م.، عباسی، م.، عزیزی، ن.، بوتراپی، س. م.ع. (۱۳۹۷). ارزیابی غیرمخرب گلوله‌های آسیا چدن پرکروم توسط آزمون جریان گردابی. *فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، دوره ۲، شماره ۲، ص ۴۹-۵۷.
- [6] Alvino, A., Lega, D., Giacobbe, F., Mazzocchi, V., Rinaldi, A. (2010). Damage characterization in two reformer heater tubes after nearly 10 years of service at different operative and maintenance conditions. *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 17, pp. 1526-1541.