

Application of Nondestructive Magnetic Flux Leakage Method in Characterization of Mechanical Properties of API X65 Steel

Hossein Norouzi Sahraei¹, Farzad Akhlaghi Modiri², Saeed Kahrobaee³, Iman Ahadi Akhlaghi⁴

1- MSc, Materials Science and Metallurgy, Center of Nondestructive Evaluation, Sadjad University of Technology

2- BSc, Electrical Engineering, Center of Nondestructive Evaluation, Sadjad University of Technology

3- Assistant Professor of Materials Engineering, Department of Mechanical and Materials Engineering, Sadjad University of Technology

4- Associate Professor of Electrical Engineering, Department of Electrical and Bioelectric Engineering, Sadjad University of Technology

*kahrobaee@sadjad.ac.ir

Abstract

In this paper, the capability of non-destructive method of magnetic flux leakage in characterizing the microstructure and mechanical properties of API X65 steel has been evaluated. Magnetic flux leakage method is a popular non-destructive inspection method for oil and gas pipelines based on the detection of magnetic flux leakage from the surface of the part. This test is widely used to identify all discontinuities including surface and subsurface cracks as well as thickness changes due to latent corrosion in the inner wall of pipelines. In this study, four different microstructures subjected to four different types of heat treatment have been used. The results show that changes in microstructural characteristics, including morphology of the ferrite phase (polyhedral or needle) as well as the size of the ferrite grains, affect the density of magnetic flux lines emitted inside the part and the amount of magnetic flux leaked from the surface. Therefore, one can use the magnetic flux leakage test to efficiently determine the type of microstructure as well as the mechanical properties of the part.

Keywords: Magnetic flux leakage test, Non-destructive testing, API X65 Steel, Mechanical properties, Microstructural changes.

کاربرد روش غیرمخرب نشت شار مغناطیسی در مشخصه‌یابی خواص مکانیکی فولاد API X65

حسین نوروزی صحرائی^۱، فرزاد اخلاقی مدیری^۲، سعید کهربائی^{۳*}، ایمان احدی اخلاقی^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، مرکز بررسی‌های غیرمخرب، دانشگاه صنعتی سجاد

۲- کارشناسی مهندسی برق، مرکز بررسی‌های غیرمخرب، دانشگاه صنعتی سجاد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و مکانیک، دانشگاه صنعتی سجاد

۴- دانشیار، دانشکده برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی سجاد

*kahrobaee@sadjad.ac.ir

چکیده

در این مقاله، از روش غیرمخرب آزمون نشت شار مغناطیسی برای مشخصه‌یابی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد API X65 استفاده شده است. آزمون نشت شار مغناطیسی یک روش غیرمخرب پرکاربرد در بازرسی خطوط لوله‌های نفت و گاز می‌باشد که بر پایه شناسایی شارمغناطیسی نشت یافته از سطح قطعه عمل می‌کند. از این آزمون به طور گسترده در شناسایی ناپیوستگی‌هایی شامل انواع ترک‌های سطحی، زیرسطحی و همچنین تغییرات ضخامت ناشی از خوردگی نهان در جداره داخلی خطوط لوله استفاده می‌شود. در بررسی حاضر، از چهار ریزساختار متفاوت این فولاد که تحت چهار نوع عملیات حرارتی مختلف قرار گرفته، استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که تغییر در مشخصه‌های ریزساختاری این فولاد شامل مورفولوژی فاز فریت (چندوجهی یا سوزنی) و همچنین اندازه دانه‌های فریتی، بر چگالی خطوط شارمغناطیسی نشت یافته در داخل قطعه و میزان شار مغناطیسی نشت یافته از سطح قطعه اثر گذار می‌باشد. بنابراین آزمون غیرمخرب نشت شارمغناطیسی پیشنهادی می‌تواند به عنوان روشی کارا در تعیین نوع ریزساختار و همچنین خواص مکانیکی قطعه مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: آزمون نشت شار مغناطیسی، بررسی غیرمخرب، فولاد API X65، خواص مکانیکی، تغییرات ریزساختاری.

۱- مقدمه

یوزارک و وارنک^۳ [۳] در پژوهشی با بهره‌گیری از تکنولوژی MFL به تعیین شکل، ابعاد و عمق حفرات خوردگی در لوله‌های گاز پرداخته‌اند. گائو^۴ [۴] و همکارانش به شناسایی ترک‌های چندگانه در قطعات فولاد کم کربن با استفاده از روش MFL پرداختند. آنها نشان دادند که با استفاده از این روش غیرمخرب نه تنها امکان تعیین کمی ابعاد، جهت و عمق ترک‌ها وجود دارد، بلکه می‌توان نمایش سه بعدی از وضعیت قرارگیری آن‌ها در نزدیکی سطح نیز ارائه داد. لی^۵ [۵] و همکارانش با بهره‌گیری از یک پل میکرومغناطیسی در آزمون MFL، امکان شناسایی میکروناپیوستگی‌ها را نیز فراهم نموده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با روش پیشنهادی خود ترک‌های زیرسطحی ناشی از سنگ‌زنی تا عمق ۷ میکرومتر

آزمون نشت شار مغناطیسی (MFL)^۱، یک روش غیرمخرب رایج برای تشخیص خوردگی و ترک‌یابی در لوله‌های فولادی و چدنی انتقال نفت و گاز می‌باشد. مکانیزم عملکردی این آزمون به این صورت است که با قرارگیری یک ماده فرومغناطیس تحت یک میدان مغناطیسی خارجی، در صورت وجود ناپیوستگی‌هایی در نزدیکی سطح، شار مغناطیسی از آن مواضع نشت‌یافته و توسط حسگرهایی قابل شناسایی می‌باشد. به طور معمول این حسگرها از نوع حسگرهای اثر هال^۲ بوده که هرگونه تغییر در میدان مغناطیسی مجاورشان را حس کرده و ولتاژی متناسب با میزان شار مغناطیسی در آن القا خواهد شد [۱و۲].

⁴Gao

⁵Li

¹Magnetic Flux Leakage (MFL)

²Hall effect sensor

^۳Usarek and Warnke

منجر به تغییر مشخصه‌های ریزساختاری و در نتیجه خواص مکانیکی این فولاد می‌شود [۱۴].

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، ۴ قطعه از جنس فولاد API X65 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ و ابعاد $70 \times 20 \times 4 \text{ mm}^3$ تهیه شده و پس از آستنیت‌دهی (950°C و ۴۵ دقیقه) تحت شرایط متفاوتی سرد شدند. عملیات حرارتی‌هایی شامل آنیل کامل (سرد کردن در کوره خاموش)، نرماله (سرد کردن در هوای ساکن)، کوئنچ در روغن و همچنین کوئنچ در آب انجام شد تا ریزساختارهای متفاوت ایجاد شود. بعد از انجام عملیات حرارتی، عملیات سمباده‌زنی، پولیش مقطع عرضی نمونه‌ها، سپس اچ با محلول نایتال ۲٪ و نهایتاً بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری صورت گرفت. جهت تعیین خواص مکانیکی از آزمون‌های سختی‌سنجی و کشش استفاده شد. با استفاده از دستگاه سختی‌سنج، در هر نمونه از پنج نقطه سختی در مقیاس ویکرز اندازه‌گیری شده و میانگین مقادیر گزارش شده است. با انجام آزمون کشش مقادیر استحکام نهایی (UTS)، استحکام تسلیم و درصد انعطاف‌پذیری (از دیاد طول) برای چهار نمونه مورد آزمایش تعیین شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (بدست آمده با آنالیز کوانتومتری-اعداد بر حسب درصد وزنی)

Nb	Cu	Cr	Mn	C
۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۰۶	۱/۴۸	۰/۱۰
Ti	Al	V	Ni	Si
۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۵۰	۰/۱۷

پس از بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی، آزمون MFL در مرکز بررسی‌های غیرمخرب دانشگاه صنعتی سجاد^۶ بر روی تمامی نمونه‌ها اعمال شد. اجزای تشکیل دهنده آزمون MFL به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. در سیستم طراحی شده به منظور انجام این آزمون ابتدا شکل موج مثلی در نرم افزار لب ویو^۷ با فرکانس ۰/۱ هرتز ایجاد و از طریق کارت دیجیتال به آنالوگ پس از تقویت به دامنه ولتاژ ۱۰V- +۱۰V و جریان ۱ آمپر رسیده و به دو سر سیم پیچ‌های

نیز در قطعات فولادی قابل شناسایی می‌باشند. کیم و پارک^۱ [۶] با استفاده از روش MFL به روبش مفتول‌های فولادی و شناسایی عیوب آن پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که با روبش مفتولی فلزی توسط مجموعه یوک و حسگرهای هال می‌توان تمامی مشخصه‌های عیوب مصنوعی ایجاد شده در مفتول‌های فولادی، شامل موقعیت و اندازه آن‌ها را مشخص نمود. یکی دیگر از حوزه‌های مهم کاربرد روش MFL، که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، صنایع ریلی می‌باشد. در این حوزه، پژوهشگران زیادی از روش MFL در شناسایی ترک‌های ناشی از خستگی تماسی غلتشی (RCF^۲) که بر سطح خطوط ریلی تشکیل می‌شود، استفاده کرده‌اند [۷-۹]. نتایج حاصل از بررسی این پژوهشگران نشان می‌دهد که با استفاده از این روش غیرمخرب می‌توان عمق ترک‌های RCF را قبل از رسیدن به مقدار بحرانی و شاخه‌ای شدن آن‌ها تشخیص داده و به موقع عملیات سنگ‌زنی پیشگیرانه را جهت جلوگیری از وقوع اتفاقات ناگواری همچون کنده شدن و شکست بخشی از ریل، انجام داد.

همان‌طور که در بالا عنوان شد، پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه متمرکز بر بررسی و بهبود قابلیت آزمون MFL در عیب‌یابی (ترک‌یابی) می‌باشند. اما با توجه به اینکه خروجی این روش تحت تأثیر تغییرات شار مغناطیسی در نزدیکی سطح تغییر می‌کند، می‌توان از آن در شناسایی تغییرات ریزساختاری در مواد فرومغناطیس نیز بهره برد. لذا در پژوهش حاضر، امکان شناسایی تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی در فولاد API X65 که زیرمجموعه‌ای از فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA^۳) بوده و به منظور بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نسبت به فولادهای ساده کربنی، با هدف کاربرد در لوله‌های نفت و گاز طراحی و تولید شده [۱۰ و ۱۱]، بررسی شده است. این فولاد به وسیله عملیات نورد کنترل شده ترمومکانیکی (TMCR^۴) تولید می‌شود که در نتیجه آن حاوی ریزساختار بهینه فریت سوزنی^۵ می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهند که هرگونه تغییر در شرایط عملیات حرارتی شامل دمای آستنیت‌دهی و یا نرخ سرمایش نمونه‌های آستنیت‌دهی شده

^۵Acicular ferrite

^۶Sadjad CNDE

^۷Labview

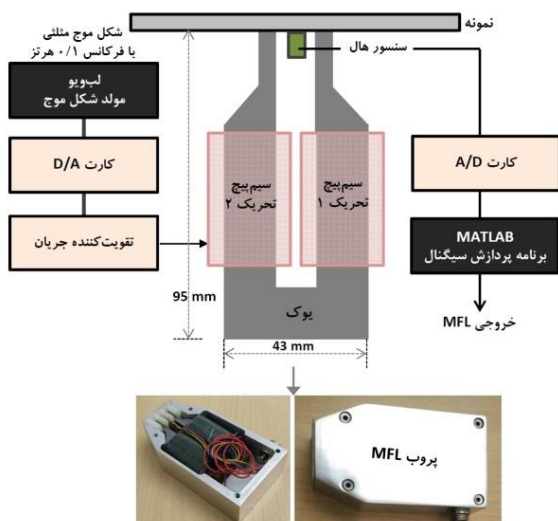
^۱Kim and Park

^۲Rolling Contact Fatigue

^۳High-strength low-alloy

^۴Thermo-mechanical controlled rolling

ولتاژ (تحت عنوان پارامتر β) به عنوان پارامترهای حاصل از روش MFL در مشخصه‌یابی استفاده شده‌اند.



شکل ۱- شماتیک سیستم غیرمخرب طراحی شده جهت انجام آزمون نشت شار مغناطیسی.

۳- نتایج و بحث

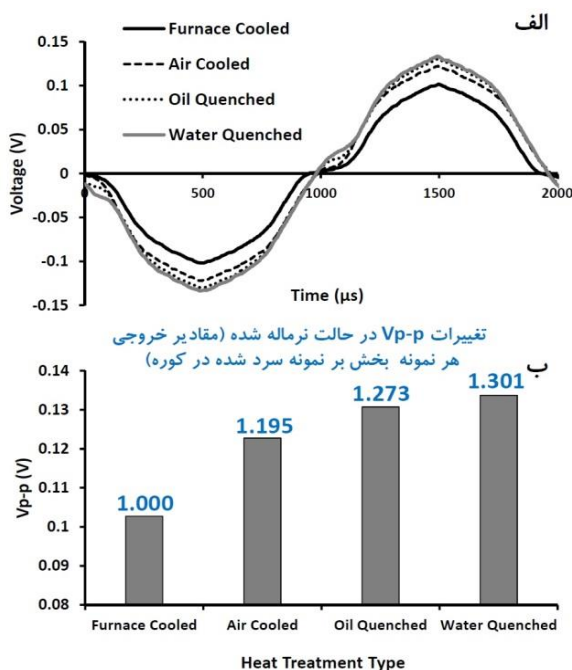
در شکل ۲، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نوری از مقطع عرضی ریزساختار نمونه‌های عملیات حرارتی شده با شرایط متفاوت، نشان داده شده است. در ریزساختار نمونه آنیل شده (شکل ۲-الف)، نوارهای پرلیتی پیوسته و درشت در زمینه فریتی با دانه‌های چند وجهی مشهود است. ریزساختار نمونه سرد شده در هوا شامل پرلیت‌های جزیره‌ای شکل توزیع شده در زمینه فریت با دانه‌های چند وجهی شکل (با اندازه‌های کوچکتر نسبت به نمونه آنیل شده) می‌باشد (شکل ۲-ب). شکل‌های ۲-ج و ۲-د، تصاویر مربوط به ریزساختار حاصل از عملیات کوئنچ در محیط‌های به ترتیب روغن و آب را نمایش می‌دهند. در این ساختارها، به دلیل اعمال سرعت‌های سرمایش بالا، شکل فریت‌ها از چند وجهی به سوزنی تبدیل شده و ساختار پرلیتی به خوبی مشهود نیست.

نتایج حاصل از آزمون‌های سختی‌سنجی و کشش مربوط به نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که کمترین میزان سختی و استحکام (و بیشترین انعطاف‌پذیری) برای ریزساختار حاصل از عملیات حرارتی با کمترین نرخ سرمایش (سرد شده در کوره) حاصل شده که به دلیل پرلیت‌ها و دانه‌های فریتی درشت در این ریزساختار می‌باشد. با افزایش سرعت سرد شدن به دلیل

تحریک^۱ (با تعداد هر کدام ۱۵۰۰ دور سیم مسی با قطر ۰/۴۵ میلی‌متر) اعمال می‌شود. علت انتخاب امواج مثلثی شکل اعمال نرخ ثابتی از میدان مغناطیسی (dH/dt ثابت) می‌باشد. از آنجا که تغییرات B بر حسب t و همچنین H بر حسب t به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود، در رسم تغییرات B بر حسب H حساسیت برای زمان‌های مختلف یکسان خواهد بود. دلیل نیاز به میدان با نرخ ثابت آن است که حساسیت سیستم اندازه‌گیری نفوذپذیری مغناطیسی مبتنی بر حلقه هیستریزس در صورتی که نرخ تغییرات میدان ثابت باشد، برای زمان‌های مختلف یکسان خواهد بود. برای همین، لازم است منحنی زمانی شدت میدان مغناطیسی (و در نتیجه جریان تحریک) به صورت یک خط راست باشد (تا مشتق زمانی یا نرخ تغییرات آن ثابت بماند). البته، در عمل برای آن که جریان تحریک به مقدار غیر عملی بی‌نهایت میل نکند، از شکل موج مثلثی (که در بازه‌های زمانی مشخص مانند یک خط راست است) برای تحریک استفاده می‌شود. همچنین اعمال فرکانس پایین در این سیستم اندازه‌گیری به دلیل کاهش اثرات ناشی از تشکیل جریان‌های گردابی است. در واقع یکی از راه‌های متداول برای کاهش جریان‌های گردابی کاهش فرکانس تحریک و در نتیجه نرخ تغییرات میدان مغناطیسی است. در اثر عبور جریان از سیم پیچ تحریک، شار مغناطیسی تولید و در یوک مغناطیسی و همچنین قطعه مورد آزمایش انتشار می‌یابد. سپس متناسب با رفتار مغناطیسی نمونه، بخشی از شار از سطح قطعه نشت یافته و توسط حسگر اثر هال (آنالوگ و خطی با محدوده اندازه‌گیری ۹۰۰ G تا -۹۰۰) قرار گرفته بر روی سطح نمونه شناسایی می‌شود. حسگر اثر هال یک حسگر میدان مغناطیسی است که در اثر عبور شار مغناطیسی از آن، شدت شار مغناطیسی را به سیگنال الکتریکی متناظر با آن مرتبط می‌سازد. این سیگنال‌ها پس از عبور از کارت آنالوگ به دیجیتال توسط نرم‌افزار MATLAB مورد پردازش قرار می‌گیرد. در این پژوهش تغییرات ولتاژ خروجی حسگر اثر هال و تغییرات شیب ولتاژ بر حسب زمان، به عنوان نمودارهای خروجی این آزمون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از نمودارهای تغییرات ولتاژ خروجی حسگر اثر هال بر حسب زمان و تغییرات شیب ولتاژ خروجی حسگر اثر هال بر حسب زمان به ترتیب مقادیر بیشینه ولتاژ (V_p-p) و عمق دره dV/dt در نقطه گذر از صفر

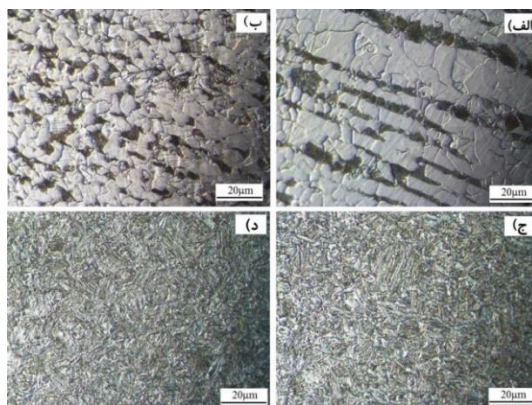
¹Driving or excitation coil

مغناطیسی شدن ماده را تسهیل می‌نماید [۱۵]. در نتیجه شار عبوری از قطعه بیشترین و میزان شار نشستی کمترین خواهد بود. با توجه به رابطه مستقیم ولتاژ خروجی حسگر اثر هال و میزان نشت شار، حداقل بودن خروجی آزمون MFL برای نمونه سرد شده در کوره، کاملاً قابل توجیه است. مقدار بیشتر Vp-p در نمونه سرد شده در هوا به دلیل اندازه دانه‌های ریزتر فریت و همچنین وجود مخلوط‌های ظریف‌تر در این ریزساختار می‌باشد. لذا چگالی بالاتر مرزهای دانه و همچنین وجود مرزهای بیشتر بین لایه‌های فریت و سمانتیت (ناشی از ظریف شدن پرلیت‌ها) به عنوان موانعی در مقابل حرکت DWs عمل نموده و فرآیند مغناطیسی شدن را نسبت به نمونه آنیل شده مشکل‌تر نموده [۱۶] و در نتیجه میزان نشت شار و ولتاژ خروجی حسگر اثر هال افزایش می‌یابد. در نهایت، در نتیجه کوئنچ نمونه‌ها در آب و روغن، تشکیل فریت‌های سوزنی منجر به ایجاد سد بسیار قوی در برابر DWs نموده و نشت شار مغناطیسی از سطح را به حد اکثر رسانده و لذا شاهد بیشترین میزان ولتاژ خروجی حسگر اثر هال خواهیم بود. مقدار بیشتر فریت‌های سوزنی در ریزساختار حاصل از عملیات کوئنچ در آب منجر به افزایش جزئی نشت شار و در نتیجه افزایش کمی در Vp-p در مقایسه با نمونه کوئنچ شده در روغن شده است.

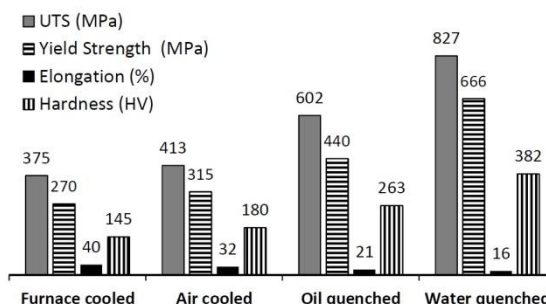


شکل ۴- الف) منحنی‌های ولتاژ بر حسب زمان و ب) تغییرات حداکثر ولتاژ (Vp-p) برای قطعات فولادی با شرایط متفاوت حرارتی

کاهش سایز دانه‌های فریتی و تغییر مورفولوژی آن‌ها از چند وجهی به سوزنی، سختی و استحکام ساختار افزایش و انعطاف‌پذیری کاهش یافته است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های الف) آنیل شده (سرد شده در کوره)، ب) نرماله شده (سرد شده در هوا)، ج) کوئنچ شده در روغن و د) کوئنچ شده در آب



شکل ۳- تغییرات خواص مکانیکی برای نمونه‌های با ریزساختار متفاوت که تحت عملیات حرارتی مختلف قرار گرفته‌اند.

در شکل ۴- الف، منحنی‌های تغییرات ولتاژ خروجی حسگر اثر هال (پس از پردازش‌های اولیه) بر حسب زمان برای نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده‌اند. این شکل‌ها به وضوح نشان می‌دهند که با تغییر در سرعت سرمایش، رفتار مغناطیسی یا به عبارت بهتر پاسخ ریزساختارها به میدان مغناطیسی خارجی تحت تأثیر قرار گرفته است. به منظور بررسی دقیق‌تر، مشخصه Vp-p از این منحنی‌ها برای ریزساختارهای مختلف استخراج شدند (شکل ۴- ب). این شکل نشان می‌دهد که کمترین مقدار Vp-p برای نمونه سرد شده در کوره بدست آمده است. این امر ناشی از حضور فاز فریتی چند وجهی با بزرگترین دانه‌ها که دربرگیرنده جزایر درشت پرلیتی است، می‌باشد. در این شرایط کمترین عوامل محدود کننده بر سر راه حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی^۱ (DWs) حضور داشته و این وضعیت فرآیند

¹Domain Walls

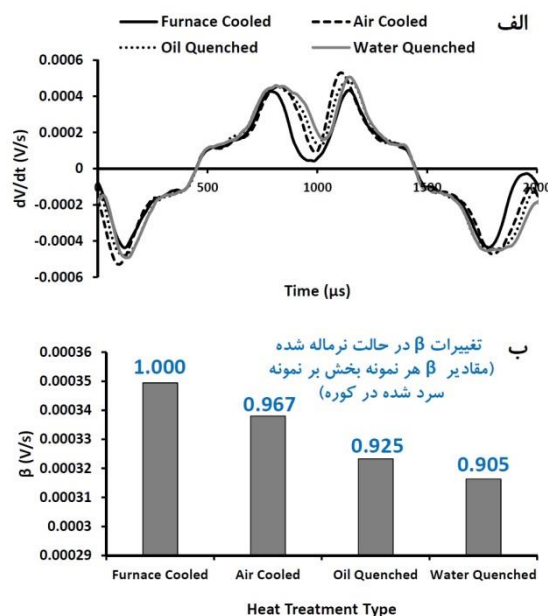
نشت شار مغناطیسی شامل بیشینه ولتاژ (Vp-p) حسگر هال و عمق دره در نمودار مشتق ولتاژ بر حسب زمان (β) به شدت تحت تأثیر تغییر در مورفولوژی و اندازه دانه‌های فریتی تغییر خواهند کرد. به طوری که ریز شدن دانه‌های فریتی و همچنین تبدیل فریت چند وجهی به فریت سوزنی منجر به افزایش Vp-p (به دلیل افزایش میزان شار نشتی از سطح) و کاهش β (به دلیل کاهش نفوذپذیدی مغناطیسی) می‌شود. لذا از این روش می‌توان جهت حصول اطمینان از انجام صحیح عملیات حرارتی و تشخیص ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب حاصل از عملیات آنیل کامل، نرماله و کوئنچ در روغن و کوئنچ در آب، بهره برد.

۵- منابع

- [1] Shi, Y., Zhang, C., Li, R., Cai, M., & Jia, G., (2015). Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection. *Sensors*, 15(12), 31036-31055.
- [2] Wang, Z. D., Gu, Y., & Wang, Y. S., (2012). A review of three magnetic NDT technologies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, 382-388.
- [3] Usarek, Z., & Warnke, K., (2017). Inspection of gas pipelines using magnetic flux leakage technology. *Advances in Materials Science*, 17.3, 37-45.
- [4] Gao, Y., Tian, G. Y., Li, K., Ji, J., Wang, P., & Wang, H., (2015). =Multiple cracks detection and visualization using magnetic flux leakage and eddy current pulsed thermography=. *Sensors and Actuators A: Physical*, 234, 269-281.
- [5] Li, E., Kang, Y., Tang, J., & Wu, J., (2018). A new micro magnetic bridge probe in magnetic flux leakage for detecting micro-cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(3), 46.
- [6] Kim, J. W., & Park, S., (2018). Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation. *Sensors*, 18(1), 109.
- [7] Li, Y., Wilson, J., & Tian, G. Y., (2007). Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation. *NDT & E international*, 40(2), 179-184.
- [8] Antipov, A. G., & Markov, A. A., (2014). Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50(8), 481-490.
- [9] Kim, J. W., Park, J., Yu, B. J., & Park, S., (2016). MFL Sensing based NDE Technique for Defect Detection of Railway Track. *8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)*. Bilbao, Spain.
- [10] Terada, Y., Yamashita, M. I. T. S. U. G. U., Tamehiro, H., & Ayukawa, N., (1997). Development of API X100 UOE line pipe. *Nippon steel technical report*, 72, 47-52.
- [11] Sherif, E. S. M., Almajid, A. A., Khalil, K. A., Junaedi, H., & Latief, F. H., (2013). Electrochemical studies on the corrosion behavior of API X65 pipeline steel in chloride solutions. *International journal of electrochemical science*, 8, 9360-9370.

در شکل ۵-الف، منحنی‌های تغییرات شیب نمودار ولتاژ (dV/dt) بر حسب زمان برای نمونه‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است. انحراف بیشتر این منحنی‌ها از حالت خطی (مثلثی) نشان‌دهنده بروز رفتار هیستریزیس بیشتر (افزایش نفوذپذیری) در نمونه‌های فرومغناطیس می‌باشد [۱۷]. مهمترین نقطه در این نمودارها جهت مقایسه، بخش گذر از صفر ولتاژ در شکل ۴-الف است که به صورت یک دره در شکل ۵-الف مشهود است. دنبال کردن میزان کاهش عمق این دره (شکل ۵-ب) با افزایش سرعت سرد کردن، نشان دهنده مناسب بودن این پارامتر در جداسازی و تفکیک ریزساختارهای متفاوت می‌باشد.

نتایج حاصل از دو شکل ۴-ب و ۵-ب نشان می‌دهند که هر دو پارامتر Vp-p و β به خوبی می‌توانند ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی قطعات فولادی باریزساختار متفاوت را از یکدیگر تمیز دهند.



شکل ۵-الف) منحنی‌های شیب تغییرات ولتاژ بر حسب زمان و ب) تغییرات پارامتر β برای قطعات فولادی با شرایط متفاوت عملیات حرارتی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش نشت شار مغناطیسی در شناسایی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد API X56 مورد استفاده در خطوط لوله‌های نفت و گاز که تحت شرایط متفاوت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که دو خروجی بدست آمده از آزمون

- variations in API X65 steel using magnetic hysteresis loop and artificial neural networks. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 35(2), 190-206.
- [16] Sahebalam, A., Kashefi, M., & Kahrobaee, S., (2014). Comparative study of eddy current and Barkhausen noise methods in microstructural assessment of heat treated steel parts. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 29(3), 208-218.
- [17] Ahmadzade-Beiraki, E., Kahrobaee, S., Kashefi, M., Akhlaghi, I. A., & Mazinani, M., (2020). Quantitative Evaluation of Deformation Induced Martensite in Austenitic Stainless Steel Using Magnetic NDE Techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39(1), 1-9.
- [12] Hashemi, S. H., (2011). Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel. *Materials Science and Engineering A*, 528, 1648-1655.
- [13] Hashemi, S. H., & Mohammadyani, D., (2012). Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, 8-15.
- [14] El-Danaf, E., Baig, M., Almajid, A., Alshalfan, W., Al-Mojil, M., & Al-Shahrani, S., (2013). Mechanical, microstructure and texture characterization of API X65 steel. *Materials & Design*, 47, 529-538.
- [15] Mirzaee, A., Kahrobaee, S., & Ahadi Akhlaghi, I., (2020). Non-destructive determination of microstructural/mechanical properties and thickness