

تشخیص و آنالیز ناخالصی‌های عایق‌های الکتریکی ترانسفورماتور با بکارگیری پردازش تصاویر رادیوگرافی

عاطفه شاقلی، پرویز تیموری

شرکت عایق‌های الکتریکی پارس، شرکت عایق‌های الکتریکی پارس

۱. مقدمه

آزمون‌های کنترل کیفیت^۱ و تضمین مرغوبیت^۲ به مجموعه‌ای از فرآیندها گفته می‌شود که به منظور اطمینان از مرغوبیت و مشتری‌پسند بودن محصول و پیشگیری از وجود نقص در محصول تولیدی بکار می‌رود [1,2]. در واحد کنترل کیفیت و تضمین مرغوبیت کارخانجات تولید عایق ترانسفورماتور، عایق‌های الکتریکی از نظر وجود یا عدم وجود ناخالصی‌ها مورد آزمون قرار می‌گیرند. چون در صورت وجود ناخالصی در عایق ترانسفورماتور شدت میدان الکتریکی فراتر از میزان تحمل عایق افزایش می‌یابد که سبب بروز پدیده‌ی تخلیه الکتریکی^۳ خواهد شد. این پدیده در ادوات قدرت مثل ترانسفورماتورها، ژنراتورها، کابل‌ها و ... باعث بروز مشکلاتی از قبیل خرابی و یا از بین رفتن خاصیت عایقی در قسمتی از تجهیز می‌شود [3]. در صورتی که ناخالصی در عایق وجود داشته باشد، به مرور زمان و با توجه به وجود فشارهای مکانیکی و تنش‌های الکتریکی، آسیب عایقی پیشرفت می‌کند و تجهیز از حالت عادی کارکرد خارج و در نهایت منجر به خرابی‌های بزرگ می‌گردد.

برای جلوگیری از بروز ناخالصی در ترانسفورماتور، آزمون‌های کنترل کیفی توسط تصویربرداری رادیوگرافی صورت می‌پذیرد. رادیوگرافی یکی از روشهای کارآمد در بازرسی‌های فنی و یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روشهای آزمون غیرمخرب است. رادیوگرافی عبارتند از بررسی یک شیء با تاباندن پرتوهای ایکس بر آن و تولید تصاویر بر روی کلیشه یا پرده‌های حساس که پس از کشف پرتوهای ایکس توسط ویلهلم رونتگن مشهور شد [4,5]. در حال حاضر رادیوگرافی صنعتی یکی از کاربردی‌ترین روشهای

چکیده — وجود ناخالصی و یا عدم‌یکنواختی در قطعات عایقی ترانسفورماتور منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی می‌گردد که این امر سبب بروز مشکلاتی از قبیل خرابی و یا از بین رفتن خاصیت عایقی در قسمتی از تجهیز می‌شود و تجهیز از حالت عادی کارکرد خارج و در نهایت منجر به خرابی‌های بزرگ می‌گردد. امروزه در آزمونهای کنترل کیفی صنایع تولید عایق ترانسفورماتور، به منظور تشخیص ناخالصی‌های موجود در عایقها، از رادیوگرافی صنعتی استفاده می‌شود. هرچند تصاویر خروجی رادیوگرافی، می‌توانند تا حدودی تعداد این ناخالصی‌ها را نمایان سازند، اما وجود عوامل مختلف از جمله نویز، کافی نبودن کنتراست، کوچک بودن سایز ناخالصی‌ها سبب می‌شوند تا تصاویر خروجی از دقت و کیفیت کافی برخوردار نباشند و تعداد قابل توجهی از ناخالصی‌ها از دید اپراتور انسانی (مفسر) دور بماند از طرفی مفسر قادر به تشخیص جنس ناخالصی‌ها نمی‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود برای ارتقای کیفیت تصاویر رادیوگرافی و افزایش دقت و سرعت تشخیص محل و جنس ناخالصی‌های عایق‌های الکتریکی، از روشهای پردازش تصویر استفاده نمود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، بکارگیری روشهای پردازش تصاویر رادیوگرافی منجر به بهبود دقت و سرعت نتایج آزمونهای کنترل کیفیت می‌گردد.

واژه‌های کلیدی — آزمون‌های کنترل کیفیت؛ پردازش تصویر؛ تصاویر

رادیوگرافی؛ ناخالصی عایق الکتریکی ترانسفورماتور.

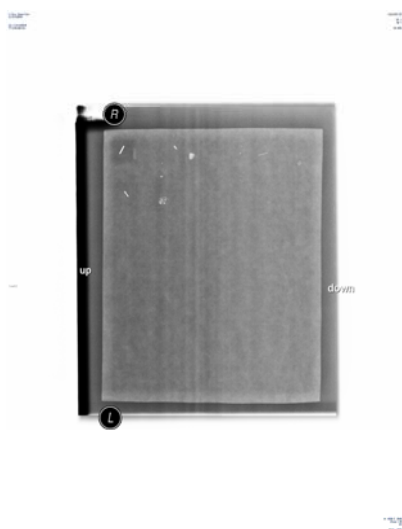
¹ Quality control

² Quality assurance

³ Partial Discharge

الکترونیکی است که با اعمال الگوریتم‌های پردازشی بر روی تصاویر حاصل از رادیوگرافی تراشه مورد نظر استخراج و مورد مطالعه قرار می‌گیرد [10].

در این مقاله پیشنهاد می‌گردد در آزمون‌های رادیوگرافی واحد کنترل کیفیت عایق ترانسفورماتور، با بکارگیری روش های پردازش تصویر، ناخالصی‌های موجود در عایق را آشکارسازی و مورد بررسی قرار داد. هدف از این مطالعه آشکارسازی اتوماتیک ناخالصی‌های موجود در عایق الکتریکی ترانسفورماتور، از طریق پردازش تصاویر رادیوگرافی است. در شکل ۱ نمونه ای از تصویر رادیوگرافی یک قطعه عایقی ترانسفورماتور را مشاهده می‌نمایید نقاط با شدت نور متفاوت نقاط ناخالصی هستند.



شکل ۱: نمونه ای از تصویر رادیوگرافی یک قطعه عایقی ترانسفورماتور

۲. روش تحقیق

۲.۱. تنظیمات آزمایشگاهی

تنظیمات آزمایشگاهی برای پردازش تصاویر رادیوگرافی به این شرح است که پس از تصویربرداری توسط اشعه ایکس در واحد X-ray بخش کنترل کیفیت، تصاویر با فرمت jpeg ذخیره می‌شوند. سپس این تصاویر در محیط نرم افزار متلب^۵ با بکارگیری جعبه ابزار پردازش تصویر^۶، به منظور تحقق اهداف پژوهش، پردازش می‌شوند.

بازرسی و کنترل کیفیت محسوب می‌شود، رادیوگرافی با اشعه ایکس نقش مهمی در کارخانجات صنعتی تولید عایق الکتریکی ترانسفورماتورها دارد که به کمک آن میتوان ناخالصی‌های موجود در عایق را آشکار کرد و مورد بازرسی‌های فنی قرار داد. در این روش اپراتور انسانی یا به اصطلاح مفسر، با تاباندن اشعه ایکس به عایق و مشاهده تصویر خروجی از آن، بخشی از ناخالصی‌های موجود در عایق را که به صورت نقاط روشن هستند، شناسایی می‌نماید اما هیچ اطلاعاتی راجع به جنس ناخالصی‌ها ندارد و از طرفی وجود عوامل مختلف از جمله نویز تصاویر خروجی، آلودگی سطح عایق الکتریکی، کوچک بودن ناخالصی‌های موجود در آن و عواملی از این قبیل منجر به کاهش دقت و سرعت عملکرد آزمون‌های کنترل کیفیت می‌شود. هم چنین تجربه کار با دستگاه رادیوگرافی بیانگر این مهم است که این دستگاه در تشخیص فلزات آهنی در سایزهای کوچک، فلز آلومینیوم، نخ، چسب کاغذی و بسیاری از مواد صنعتی، خطای قابل توجهی دارد و گاهاً در تشخیص آنها ناتوان است. بنابراین با توجه به نیاز واحد رادیوگرافی اشعه ایکس، در بخش کنترل کیفیت شرکت عایق‌های الکتریکی پارس^۴ لزوم بررسی روشی برای بهبود نتایج این واحد احساس شد [6] تا بتوان با تشخیص ناخالصی‌ها و جنس آنها، از ورود مجدد آنها در عایق‌های تولیدی پیشگیری کرد. در نتیجه ی مطالعات صورت گرفته، پیشنهاد می‌شود که با بکارگیری روشهای پردازش تصویر و بینایی ماشین تا حدود زیادی وضوح کیفی تصاویر رادیوگرافی را بهبود بخشید و به صورت اتوماتیک ناخالصی‌های موجود در قطعات عایق‌های الکتریکی ترانسفورماتور را تشخیص داد و با تشخیص جنس ناخالصی‌ها اطلاعاتی راجع به علت وقوع ناخالصی‌ها در خط تولید عایق کسب نمود.

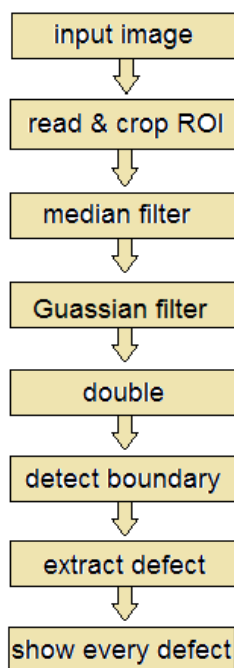
پردازش تصاویر رادیوگرافی با اشعه ایکس، ضمن بهبود کیفیت تصاویر خروجی منجر به افزایش دقت و کارائی کاربرد آن در صنایع می‌گردد و می‌توان با اعمال پردازش‌های مورد نظر، پارامترهای دلخواه را از تصاویر رادیوگرافی استخراج نمود و مورد مطالعه قرار داد [7]. امروزه بکارگیری روش‌های پردازش تصویر در رادیوگرافی دندانانی از اهمیت بالایی برخوردار است، در این روش با پردازش تصاویر خروجی رادیوگرافی دندان می‌توان ضمن بهبود کنتراست و پارامترهای تصویر، هر دندان را استخراج و مورد مطالعه پزشکی قرار داد [8,9]. یکی دیگر از کاربردهای پردازش تصاویر رادیوگرافی، شناسایی و تشخیص اتوماتیک تراشه‌های قدرت در بردهای

⁵ Matlab 2018

⁶ Image processing toolbox

⁴ Pars electrical insurance (P.E.I)

گوسی^{۱۲} به روش کرنل^{۱۳} استفاده می‌شود [12] و تصویر خروجی منظور لبه-یابی^{۱۴} با یک آستانه مناسب دودویی^{۱۵} می‌گردد [13, 14]. در ادامه با لبه‌یابی بر روی تصویر، ناخالصی‌ها تشخیص و نمایش داده می‌شوند.



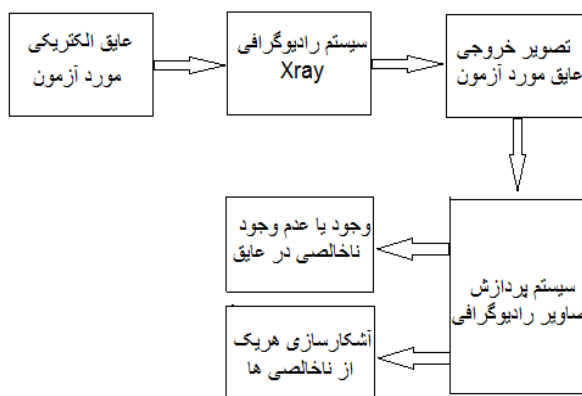
شکل ۳. سیستم پردازش تصاویر رادیوگرافی

۲.۴. فیلتر میانگذر و نویز فلفل نمکی

اگر تصویری دارای نویز فلفل نمکی باشد، آنگاه نقاط تیره و روشن در اکثر بخشهای تصویر ظاهر خواهد شد. این نقاط سیاه و سفید بر روی پیکسلهای تصویر اصلی می‌افتند و کیفیت تصویر را کاهش می‌دهند (شکل ۳). بنا بر درصد نویزی که روی تصویر می‌افتد پراکندگی این نقاط سیاه و سفید، کم یا زیاد می‌شود [15]. یکی از روشهای حذف نویز از تصویر، عبور دادن یک فیلتر از آن است. به گونه‌ای که اگر یک فیلتر مناسب از تصویر عبور داده، ما یک تصویر پردازش یافته خواهیم داشت که در آن نویز به حداقل می‌رسد. معمولاً به منظور حذف نویز فلفل نمکی از یک فیلتر میانگذر مناسب استفاده می‌شود. (شکل ۴)

۲.۲. طرح کلی روند پردازش تصاویر رادیوگرافی

در این بخش ابتدا طرح کلی روش تحقیق و الگوریتم پیشنهادی شرح داده می‌شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، عایق الکتریکی مورد نظر برای تست، در واحد کنترل کیفیت، توسط سیستم رادیوگرافی مورد تصویربرداری با اشعه ایکس قرار می‌گیرد. سپس تصاویر خروجی به سیستم پردازش تصویر پیشنهاد شده در این تحقیق وارد می‌شوند و از لحاظ وجود یا عدم وجود ناخالصی و آشکارسازی هر یک از ناخالصی‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.



شکل ۲. طرح کلی روند پردازش تصاویر رادیوگرافی

۲.۳. عملکرد سیستم پردازش تصاویر رادیوگرافی

نحوه عملکرد سیستم پردازش تصویر رادیوگرافی مورد مطالعه در این تحقیق که در بخش ۱،۲ آورده شد، به شرح شکل ۳ می‌باشد. همانطور که در تصویر مشخص است، ابتدا تصویر خروجی از رادیوگرافی، به عنوان تصویر ورودی وارد سیستم پردازش تصویر می‌شود، سپس ناحیه ROI^۷ از تصویر ورودی بریده^۸ می‌شود. در واقع ناحیه ROI بخشی از تصویر رادیوگرافی است که فقط شامل عایق می‌شود.

در ادامه به منظور حذف نویز فلفل نمکی^۹ از تصویر، یک فیلتر میانگذر^{۱۰} به آن اعمال می‌گردد [11]. سپس به منظور هموار کردن^{۱۱} لبه‌ها از فیلتر

¹² Gaussian filter

¹³ kernel

¹⁴ Boundary

¹⁵ double

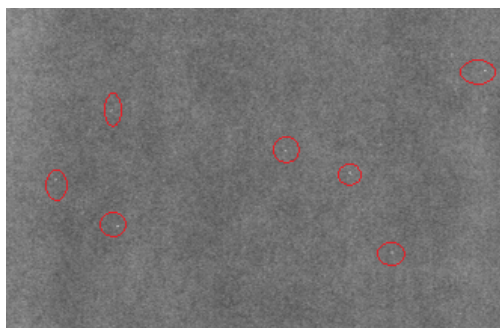
⁷ Region of interest

⁸ crop

⁹ Salt & pepper noise

¹⁰ Median filter

¹¹ smooth



شکل ۵: نمونه‌ای تصویر عایق دارای نویز فلفل نمکی

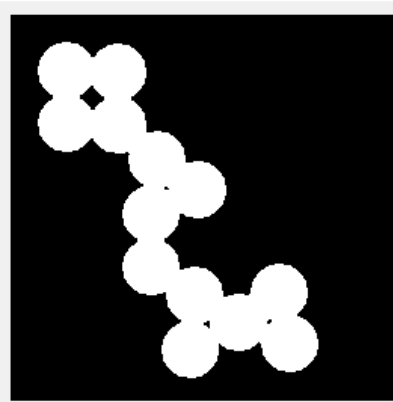
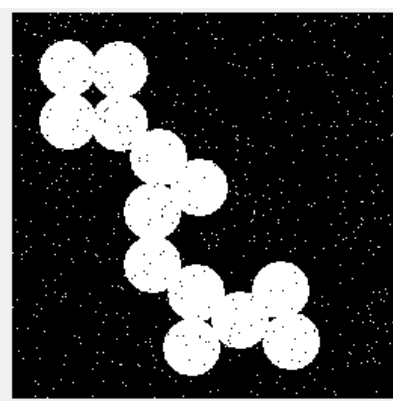
۲.۵. فیلتر گوسی

در مباحث پردازش تصویر، فیلتر گوسی عبارتند از فیلتری که منجر به هموار شدن می شود. از این فیلتر در نرم افزارهای گرافیکی به طور گسترده استفاده می شود که منجر به کاهش نویز و جزئیات غیرضروری می شود. هم چنین فیلتر گوسی کرنل در بینایی ماشین کاربرد وسیعی در بهبود کیفیت تصاویر دارد [16]. بنابراین از فیلتر گوسی کرنل برای هموار کردن، کاهش نویز و بهبود کیفیت تصاویر خروجی اشعه ایکس استفاده می شود.

۲.۶. آستانه گذاری ولبه یابی

در تصاویر رادیوگرافی قطعات عایقی، ناخالصی ها با شدت روشنایی متفاوت ظاهر می شوند، بنابراین به منظور جداسازی ناخالصی ها از روش آستانه گذاری و لبه یابی استفاده می شود.

هدف از لبه یابی، نشان گذاری نقاطی از تصویر است که در آنها شدت روشنایی به تندی تغییر می کند. معمولاً تغییرات تند در خصوصیات تصویر نماینده ی رویدادهای مهم و تغییرات در خصوصیات است [17]. در یک تصویر از قطعه عایقی، آن بخش از تصویر که در آنها شدت روشنایی تغییر می کند، با روش آستانه گذاری تشخیص داده می شود و هر ناخالصی استخراج می گردد.



شکل ۴: نمونه ای تصویر دارای نویز فلفل نمکی و فیلتر شده

تصاویر خروجی از رادیوگرافی دارای نقاط ریز تیره و روشن هستند که به علت وجود گرد و خاک در سطح عایق، در تصویر ظاهر می شوند. این نقاط تنها ناشی از آلودگی ظاهر عایق هستند که در نتیجه جابجایی ها بر روی سطح عایق ایجاد می شوند، در نتیجه ناخالصی عایق محسوب نمی شوند و نویز هستند. لذا وجود این نقاط در تصویر ممکن است منجر به خطا شود و این نقاط به عنوان ناخالصی اعلام شوند بنابراین نیاز است که از یک فیلتر مطلوب (فیلتر میانی) برای حذف این نویزها که نوعی از نویز فلفل نمکی محسوب می شوند، استفاده کرد. در شکل ۵ نمونه ای از تصویر یک عایق است که در آن نقاط نویزی با دایره قرمز رنگ مشخص شده اند.

۳. نتایج

۳.۲. نتایج سیستم پردازش تصاویر رادیوگرافی

در این بخش نتایج حاصل از اعمال الگوریتم شرح داده شده به تصاویر رادیوگرافی شرح داده می‌شود.

به منظور بررسی صحت عملکرد سیستم طراحی شده، در یک قطعه عایقی، یک سری ناخالصی عمدی ایجاد می‌نماییم (شکل ۷) و سپس با تصویربرداری از نمونه عایقی مذکور، تصویر خروجی را با روش پیشنهادی پردازش می‌کنیم. در ادامه نتایج را تحلیل می‌کنیم تا بررسی شود که آیا سیستم طراحی شده چند درصد ناخالصی‌ها را تشخیص می‌دهد.



شکل ۷: نمونه‌ی قطعه‌ی عایقی با ناخالصی‌های عمدی

تصویر رادیوگرافی قطعه عایقی مورد آزمون، به عنوان تصویر ورودی وارد سیستم پردازش تصویر می‌شود، سپس ناحیه ROI^{۱۶} از تصویر ورودی بریده می‌شود و با اعمال فیلتر میانگذر، نویز فلفل نمکی تصویر کاهش می‌یابد. سپس با عبور فیلتر گوسی کرنل لبه‌های تصویر هموار می‌شوند و تصویر خروجی با یک آستانه مناسب دودویی می‌گردد (شکل ۸). در ادامه با لبه‌یابی بر روی تصویر، ناخالصی‌ها تشخیص و نمایش داده می‌شوند. (شکل ۹ و ۱۰)

در بخش قبل روش پیشنهادی پژوهش شرح داده شد، در این بخش نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی به تصاویر رادیوگرافی عایق الکتریکی، مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

۳.۱. بخش رادیوگرافی واحد کنترل کیفیت

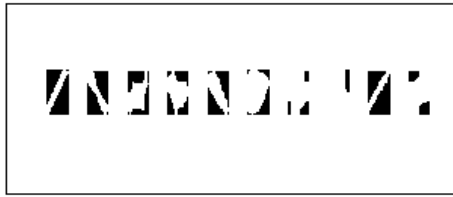
به منظور درک بهتر مفاهیم این پژوهش، در این بخش تصویری از واحدهایی که درباره آنها صحبت شد، آورده شده است.

در شکل ۶ بخش رادیوگرافی با اشعه ایکس، در واحد کنترل کیفیت عایقهای الکتریکی ترانسفورماتور را مشاهده می‌نمایید. در تست رادیوگرافی کلیه قطعات عایقی ریختگی، بویژه قطعات سیستم خروجی فشار قوی، توسط تصویربرداری با اشعه ایکس بررسی می‌شوند تا ذرات فلزی یا حفره های احتمالی داخل قطعات ردیابی شده و محصول نهایی عاری از هرگونه ناخالصی باشد.



شکل ۶: تست رادیوگرافی

¹⁶ Region of interest



شکل ۱۰: نمایش جداگانه هریک از ناخالصی قطعه عایقی

پس از جداسازی هر ناخالصی می‌توان با بکارگیری روش‌های پردازش تصویر، پارامتر خاص هر ناخالصی را استخراج نمود و با برچسب زنی هر ناخالصی جنس آنها را تشخیص داد.

۳.۳. تحلیل تصاویر خروجی

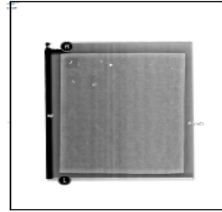
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود تعداد ناخالصی‌های عمده ایجاد شده در قطعه عایقی ۱۲ مورد بود که پس از آشکارسازی آنها، تعداد ۱۰ مورد از ناخالصی‌ها یافت شد. لذا روش پیشنهادی این پژوهش توانست ضمن کاهش سطح نویز تصاویر خروجی رادیوگرافی با اشعه ایکس، تعداد ناخالصی‌های موجود در عایق الکتریکی ترانس را تا حد خوبی آشکارسازی نماید و به صورت اتوماتیک آنها را تشخیص دهد.

در جدول ۱ ناخالصی‌های موجود در عایق الکتریکی و ناخالصی‌های تشخیص داده شده مشخص شده است.

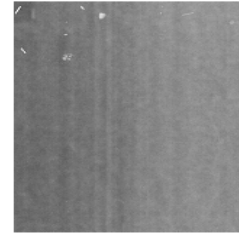
جدول ۱: ناخالصی‌های تشخیص داده شده

نوع ناخالصی	تشخیص	عدم تشخیص
پرس اشپان	*	
نخ کش	*	
لاستیک کش	*	
سمباده		*
چوب فشرده		*
سلفون	*	
رنگ	*	
آلمینیوم	*	
سیم مسی	*	
شیت	*	
میخ منگنه	*	
اکسید آهن	*	

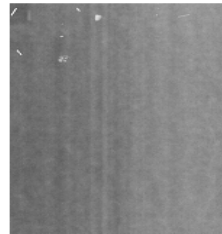
1:original image



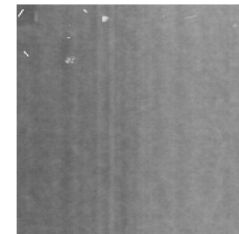
2:crop



3:median filter



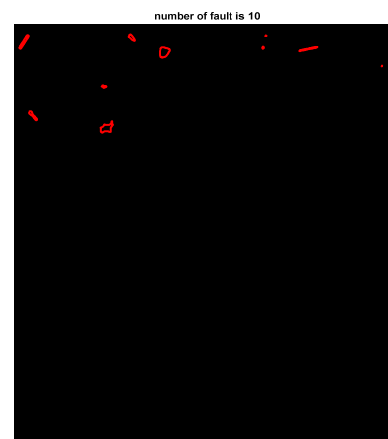
4:kernel filter



5:double



شکل ۸: نتایج پردازش تصویر رادیوگرافی به قطعه عایقی



شکل ۹: تشخیص ناخالصی قطعه عایقی

Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), Herlany, pp. 147-152, 2016.

- [8] S. Oprea, C. Marinescu, I. Lita, M. Jurianu, D. A. Visan and I. B. Cioc, "Image processing techniques used for dental x-ray image analysis," *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, Budapest, pp. 125-129, 2008.
- [9] A. H. Setianingrum, A. S. Rini and N. Hakiem, "Image segmentation using the Otsu method in Dental X-rays," *2017 Second International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, Jayapura, pp. 1-6, 2017.
- [10] O. Kovac, T. Girasek and A. Pietrikova, "Image processing of die attach's X-ray images for automatic voids detection and evaluation," *2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Pilsen, pp. 199-203, 2016.
- [11] Gonzales, Rafael C. and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [12] Bowman, A. W., and A. Azzalini. *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis*. New York: Oxford University Press Inc., 1997.
- [13] L. Li, Y. Zheng, X. Bai and F. Zhou, "Background prior and boundary weight-based pedestrian segmentation in infrared images," *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, pp. 839-843, 2016.
- [14] A. Aghaei, "A cellular Automata approach for noisy images edge detection under null boundary conditions," *2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, pp. 771-777, 2018.
- [15] L. Hou, H. Liu, Z. Luo, Y. Zhou and T. Truong, "Image deblurring in the presence of salt-and-pepper noise," *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Beijing, pp. 2389-2393, 2017.
- [16] B. Chen, Z. Qin, N. Zheng and J. C. Principe, "Kernel adaptive filtering subject to equality function constraints," *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Budapest, pp. 1-5, 2016.
- [17] L. Yuan and X. Xu, "Adaptive Image Edge Detection Algorithm Based on Canny Operator," *2015 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application (AITS)*, Harbin, pp. 28-31, 2015.

۴. نتیجه گیری

بروز ناخواسته‌ی ناخالصی و عدم یکنواختی در قطعات عایقی، بویژه قطعات عایقی ترانسفورماتورهای ویژه، منجر به بروز مشکلاتی از قبیل خرابی‌ها و از بین رفتن خاصیت عایقی می‌گردد. لذا در واحد کنترل کیفیت شرکت تولید عایق‌های الکتریکی ترانسفورماتور، با اجرای آزمون‌های رادیوگرافی با اشعه ایکس، وجود یا عدم وجود ناخالصی بررسی می‌شود.

در تصاویر خروجی از رادیوگرافی، وجود عواملی مثل نویز، کوچک بودن سایز ناخالصی‌ها، جنس ناخالصی، خطای مفسر و ... منجر به بروز خطا در تشخیص ناخالصی‌ها می‌گردد، از طرفی جنس آنها برای مفسر قابل تشخیص نیست. لذا در این پژوهش پیشنهاد شد که با بکارگیری روش‌های پردازش تصویر در متلب، ناخالصی قطعات عایقی به صورت اتوماتیک مشخص و تعداد آنها تعیین گردد و در گام بعدی بتوان جنس ناخالصی‌ها را تشخیص داد تا از بروز مجدد آنها در خط تولید عایق جلوگیری کرد.

به منظور بررسی دقت و صحت روش پیشنهادی، در یک قطعه عایقی، یک سری ناخالصی عمدی با نوع ناخالصی مشخص، ایجاد نمودیم و با تصویر برداری از آن، تصویر خروجی رادیوگرافی را پردازش کردیم. سپس با تحلیل نتایج خروجی این تحقیق نشان دادیم که از ۱۲ نوع ناخالصی موجود در نمونه آزمایشی، ۱۰ نوع آن تشخیص و آشکار شدند. با آشکارسازی ناخالصی‌های موجود در عایق الکتریکی ترانس با روش پردازش تصویر رادیوگرافی، توانستیم دقت و سرعت تست‌های کنترل کیفی را بهبود ببخشیم. در ادامه این تحقیق میتوان با محل‌یابی ناخالصی‌های عایقی روی هرکدام از آنها مانور داد و سایر پارامترهای مورد اهمیت در عایق ترانس از جمله جنس ناخالصی‌ها را تشخیص داد.

منابع

- [1] Praxiom Research Group Limited (16 August 2017). "ISO 9001 Translated Into Plain English". Praxiom Research Group Limited. Retrieved 29 November 2017.
- [2] Aft, L.S.. "Chapter 1: Introduction". *Fundamentals of Industrial Quality Control*. CRC Press. 1997. pp. 1-17.
- [3] D. F. Warne *Advances in high voltage engineering*, Institution of Electrical Engineers ISBN 0-85296-158-8, 2004, page 166
- [4] Novelline, Robert. *Squire's Fundamentals of Radiology*. Harvard University Press. 5th edition. ISBN 0-674-83339-2, 1997.
- [5] "X-ray". *Oxford English Dictionary*, 3rd ed. *Oxford University Press*. September 2005.
- [6] <http://pei-co.com/index.aspx?siteid=2&fkeyid=&siteid=2&pageid=184>
- [7] Z. Garaguly, M. Kozlovsky and L. Kovács, "The optimization of medical X-ray images," *2016 IEEE 14th International Symposium on*