

## تشخیص گرمای بیش از حد در سیستم‌های قدرت با استفاده از مواد ترموکرومیک و پردازش تصویر

مهدی عبدی<sup>(۱)</sup> - وحید قدس<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - گروه برق و مکترونیک، دانشکده فنی مهندسی، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

(۲) استادیار - باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۴

**خلاصه:** با توجه به اینکه تشخیص نقص در تجهیزات الکتریکی باعث جلوگیری از بروز حادثه، خسارت و تلفات می‌شود، ضرورت ایجاد می‌کند تا کارهای مؤثر در تشخیص دادن نقص انجام شود تا بتوانیم خطا را پیش‌بینی و پیش‌گیری نماییم. در حال حاضر در سیستم‌های قدرت نقص‌های حرارتی توسط ابزار ترموگرافی شناسایی می‌شوند که دارای محدودیت‌هایی از قبیل نیاز داشتن به تجهیزات گران قیمت ترموگرافی می‌باشد. در این مقاله، یک روش جدید برای شناسایی نقص در تجهیزات برقی ارائه می‌شود. در این روش استفاده از مواد ترموکرومیک در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است. ترموکرومیک‌ها نوعی از مواد هوشمند می‌باشند که به صورت برگشت‌پذیر رنگشان با دما تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه اغلب نقص‌ها در تجهیزات باعث تولید حرارت می‌شوند، در صورتی که مواد ترموکرومیک روی تجهیزات پوشش داده شوند، با افزایش دما در محل نقص، تغییر رنگ حاصل می‌شود. در این مقاله، تجهیزات الکتریکی با مواد ترموکرومیک پوشش داده شدند. سپس با معرفی ویژگی‌های نوین مربوط به هیستوگرام در مرحله اول و همچنین DRLBP و شبکه عصبی در مرحله دوم به دو دسته دارای نقص و بدون نقص طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که در روش پیشنهادی با افزایش دما در محل دارای نقص تغییر رنگ مشهود حاصل می‌شود و شناسایی نقص به سادگی و با دقت بالایی قابل تشخیص است.

**کلمات کلیدی:** گرمای بیش از حد، اتصالات سست، ترموکرومیک، ترموگرافی، LBP.

## Overheating Recognition in Power Systems Using Thermochromic Materials and Image Processing

Mahdi Abdi<sup>(1)</sup> - Vahid Ghods<sup>(2)</sup>

(1) MSc - Department of Electrical and Mechatronics Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

abdi5500@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Young Researchers and Elite Club, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

v.ghods@semnaniau.ac.ir

Since the diagnosis of defects prevents accidents, damage and losses in electrical equipment, it is necessary to work effectively in identifying defects so that the errors can be predicted and prevented. Nowadays, thermal defects detect by thermography in power systems. However, there is limitation such as requiring expensive thermography equipment. In this paper, a new method for detecting defects in the electrical equipment is presented. In this method, the use of thermochromic materials has been suggested in power systems. Thermochromic is a kind of smart materials, which the color is returnable with its temperature change. Since most of the defects in the equipment produce heat, if the equipment covers with thermochromic material, the color change is obtained with temperature rising in defect location. In this paper, the equipment was covered with thermochromic materials. Then, with introducing the novel feature regarding the histogram in the first level and DRLBP and a neural network in the second level, the equipment was classified into two categories, with defect and without defect. The results showed that with increasing temperature, color changed in the defect locations and the defects recognized easily with high accuracy.

**Index Terms:** Overheating, Loose connections, Thermochromic, Thermography, LBP.

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه تعمیر و نگهداری از تجهیزات نقش مهمی در هزینه دارد، در صورتی که تجهیزات به صورت صحیح عیب‌یابی و نگهداری شوند باعث طولانی‌تر شدن عمر تجهیزات، پیشگیری از بروز حادثه و در نهایت موجب کاهش هزینه می‌شود [۱]. در حال حاضر نظارت بر تاسیسات الکتریکی به روش‌های نظارت سنتی، نظارت<sup>۱</sup> PM، تعمیرات پیشگیرانه، و نظارت به روش<sup>۲</sup> PPM، تعمیرات پیشگویانه و پیشگیرانه، انجام می‌شود. در روش سنتی هیچگونه دستورالعمل خاصی برای شناسایی نقص وجود ندارد و کاربر هنگامی متوجه نقص می‌شود که تجهیزات دیگر کار نکنند. در روش PM جداولی از دفتر فنی مهندسی که طبق دستورالعمل‌های مشخصی، متناسب با هر تجهیز، تدوین شده است دریافت می‌شود و در متوسط زمانی که سیستم بدون خطا کار می‌کند<sup>۳</sup>، این جداول تکمیل می‌شود و متناسب با این جداول برنامه‌ریزی جهت تعمیرات پیشگیرانه انجام می‌شود. در روش PPM علاوه بر PM احتمال وجود نقص در تجهیزات پیشگویی می‌شود و تجهیزات طبقه‌بندی می‌شوند [۷-۲]. در تجهیزات برقی عموماً دو علت باعث افزایش دما می‌شود. اولین عامل عبور جریان می‌باشد که با افزایش گرما رابطه مستقیم دارد و دلایلی از قبیل سست بودن اتصالات، اکسید شدن محل اتصال و خوردگی اتصالات باعث افزایش دما می‌شوند و دومین عامل عدم خنک‌کاری می‌باشد. بیشتر تجهیزات الکتریکی دارای سیستم‌های خنک‌کاری می‌باشند اگر به هر علتی سیستم خنک‌کاری از مدار خارج شود، باعث افزایش دما می‌شود. در حال حاضر از ترموگرافی جهت شناسایی نقص در تجهیزات استفاده می‌شود. از آنجا که عمده نقص‌ها در مدارات، دستگاه‌ها و تجهیزات الکتریکی همواره با تولید حرارت همراه می‌باشد، لذا اندازه‌گیری درجه حرارت تاسیسات الکتریکی از قبیل خطوط انتقال نیرو، پستهای فشار قوی، ترانسفورماتور، الکتروموتورها و تهیه عکس‌های حرارتی توسط دوربین‌های ترموگرافی از آنها راهنمای مطمئنی هستند، برای آشکار نمودن نقص و برطرف کردن نقاط ضعف، قبل از اینکه منجر به اتفاقات مخرب در سیستم برق گردند [۱۰-۸]. امروزه علاوه بر تصویربرداری حرارتی از شبکه‌های عصبی مصنوعی و بردار پشتیبان ماشین<sup>۴</sup> برای طبقه‌بندی تجهیزات الکتریکی استفاده می‌شود. به این‌گونه که ابتدا از تجهیزات توسط دوربین‌های ترموویشن عکس حرارتی تهیه می‌شود و پس از پردازش تصویر و استخراج ویژگی از تصاویر، به شبکه عصبی اعمال می‌شوند تا تصاویر به صورت اتوماتیک طبقه‌بندی شوند [۱۳-۱۱]. ساختارهای مختلفی برای شبکه عصبی مصنوعی اعم از LVQ، RBF، MLP و RNN وجود دارد که MLP به علت سادگی الگوریتم و پارامترهای محدود و همچنین ضریب اطمینان بالا محبوبیت بیشتری دارد [۱۴، ۱۵]. شبکه عصبی MLP الگوریتم‌های آموزشی متفاوتی اعم از SCG، BR، RP و LM دارد [۱۸-۱۶].

در این مقاله، راه حل نوینی برای شناسایی نقص در تجهیزات ارائه می‌شود که در آن از مواد ترموکرومیک استفاده شده است. با توجه به اینکه اغلب نقص‌ها در تجهیزات باعث تولید حرارت می‌شوند در صورتی

که مواد ترموکرومیک که رنگشان با دما تغییر می‌کند، روی تجهیزات پوشش داده شوند به صورت هوشمند با افزایش دما در محل نقص، تغییر رنگ حاصل می‌شود که بیان‌گر وجود اشکال در تجهیزات می‌باشد. جهت اجرایی شدن این ایده، یک تجهیز دارای نقص با پوشش ترموکرومیک شبیه‌سازی گردید که نتایج نشان داد، استفاده از مواد ترموکرومیک جهت نمایان کردن نقص‌هایی که در تجهیزات، بر اثر گرما به وجود می‌آیند امکان‌پذیر می‌باشد. نکته مهم در این مقاله ارائه یک ایده جدید در استفاده از مواد ترموکرومیک در تجهیزات قدرت به جای استفاده از دوربین‌های ترموویشن است (که گران بودن یا در دسترس نبودن دوربین ترموویشن در همه زمان‌ها از معایب آن است). اما تجهیزات پوشانده شده یا برچسب زده شده با مواد ترموکرومیک با چشم غیر مسلح و با دوربین معمولی قابلیت دیدن و کسب تصویر تغییرات دمایی را دارد.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ مطالب مربوط به مراحل انجام شناسایی نقص و طبقه‌بندی کردن تجهیزات با استفاده از دوربین ترموگرافی و هوش مصنوعی مرور می‌شود. در بخش ۳، ایده استفاده از مواد هوشمند جهت شناسایی نقص‌هایی که باعث ایجاد حرارت در تجهیزات الکتریکی می‌شوند، بیان می‌گردد. سپس مطالب مربوط به مواد هوشمند مطرح شده و مراحل انجام شبیه‌سازی این ایده توضیح داده می‌شود. در بخش ۴، آزمایش قطعه شبیه‌سازی شده انجام می‌شود و نتایج ارائه می‌گردد. در بخش ۵، مطالب مربوط به استخراج ویژگی، شناسایی و طبقه‌بندی کردن تجهیزات الکتریکی با پوشش ترموکرومیک توسط شبکه عصبی بیان می‌شود. در نهایت، نتایج طبقه‌بندی تصاویر نشان داده می‌شود. در بخش ۶، نتیجه‌گیری و مزایای مطالعات انجام شده بیان می‌شود و پیشنهادهایی جهت اجرای عملی این طرح ارائه می‌شود.

## ۲- شناسایی نقص و طبقه‌بندی تجهیزات با استفاده از ترموگرافی و هوش مصنوعی

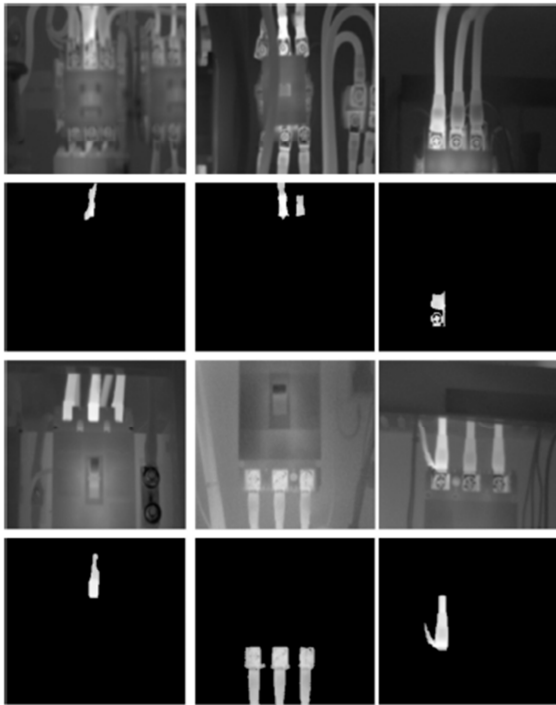
به منظور شناسایی نقص در تجهیزات به روش ترموگرافی و استفاده از هوش مصنوعی ابتدا از تجهیزات مورد نظر تصویربرداری حرارتی انجام می‌شود. تصویربرداری باید طبق دستورالعمل مشخصی انجام شود. رعایت نکات مربوط به تصویربرداری حرارتی در نتایج به دست آمده مهم می‌باشد [۸، ۹]. پس از تهیه تصویر از تجهیزات، این تصاویر به صورت دستی متناسب با اختلاف دمای موجود در تصویر، به تصاویر دارای نقص و بدون نقص طبقه‌بندی می‌شوند. معیار طبقه‌بندی با اختلاف دما، توسط استانداردهایی از قبیل<sup>۵</sup> NETA،<sup>۶</sup> ASTM،<sup>۷</sup> NFPA انجام می‌شود. جدول (۱) نمونه استاندارد NETA را نشان می‌دهد [۲۱-۱۹].

برخی از نمونه‌های وضعیت حرارتی تجهیزات الکتریکی در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به اختلاف دما در تصاویر مشخص است که شکل (۱-الف) دارای نقص در یک منطقه، شکل (۱-ب) عادی و شکل (۱-ج) در سه منطقه دارای نقص می‌باشد [۸].

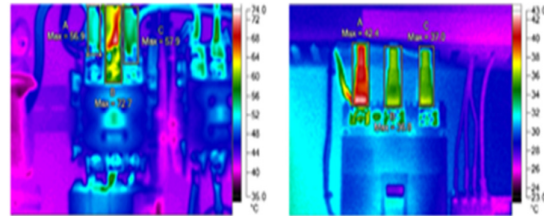
با الگوریتم SCG حاصل شده است که این دقت در مرحله آموزش با ۸۰/۲۶٪ و در مرحله آزمون ۷۵/۲۴٪ می‌باشد.

Table (1): Equipment classification with NETA standard  
جدول (۱): طبقه‌بندی تجهیزات با استاندارد NETA

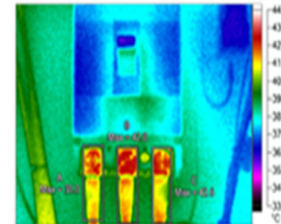
چگونگی تعمیر تجهیز	شرایط تجهیز از نظر عیب	اختلاف درجه حرارت اندازه‌گیری شده
تجهیز باید تحت کنترل باشد.	احتمال وجود عیب	با محیط: ۱ تا ۱۰ درجه C یا جزء مشابه: ۱ تا ۳ درجه C
نوبت بعدی تعمیرات سرویس گردد.	وجود عیب	با محیط: ۱۱ تا ۲۰ درجه C یا جزء مشابه: ۴ تا ۱۵ درجه C
در اولین فرصت سرویس گردد.	عیب توسعه یافته	با محیط: ۲۱ تا ۴۰ درجه C یا جزء مشابه: بیشتر از ۱۵ درجه C
بدون فوت وقت سرویس گردد.	عیب حاد	با محیط: بیشتر از ۴۰ درجه C یا جزء مشابه: بیشتر از ۱۵ درجه C



شکل (۲): تصاویر سطوح خاکستری حرارتی از تجهیزات [۸]  
Fig. (2): Thermal gray levels images of the equipment [8]



(الف) (ب)



(ج)

شکل (۱): وضعیت حرارتی تجهیزات [۸]  
Fig. (1): The heat status of equipment [8]

### ۳- استفاده از مواد هوشمند جهت شناسایی نقص در تجهیزات برقی

طبق تحقیقات به عمل آمده مشخص شد که در طبیعت موادی وجود دارند که معروف به مواد هوشمند می‌باشند [۲۷]. این مواد محرک‌های مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی را درک کرده و به آنها عکس‌العمل نشان می‌دهند. به طور کلی می‌توان مواد هوشمند را به دو دسته تقسیم‌بندی کرد.

۱- موادی که در پاسخ به محرک‌ها در خصوصیت خود تغییر ایجاد می‌کنند، مانند ترموکرومیک.

۲- موادی که در پاسخ به محرک‌ها انرژی را از نوعی به نوع دیگر تبدیل می‌کنند، مانند فتوولتائیک‌ها.

در جدول (۲) انواع مواد کرومیک نشان داده شده است.

Table (2): Chromic materials types [28]

جدول (۲): انواع مواد کرومیک [۲۸]

نام مواد	عامل تغییر رنگ
فتوکرومیک	تغییر نور
ترموکرومیک	تغییر دما
مکانوکرومیک	فشار یا تغییر شکل
کموکرومیک	شرایط شیمیایی خاص
الکتروکرومیک	تغییر ولتاژ

پس از تصویربرداری حرارتی، ابتدا آنها را پردازش و به تصویر سطوح خاکستری تبدیل می‌کنند. در تصویر سطوح خاکستری، منطقه معیوب روشنایی بیشتری از منطقه عادی را نشان می‌دهد. در شکل (۲) برخی از تصاویر سطوح خاکستری حرارتی نشان داده شده است [۸].

جهت طبقه‌بندی کردن این تصاویر توسط شبکه عصبی، از تصاویر پردازش شده ویژگی‌هایی استخراج می‌شود تا شبکه عصبی متناسب با این ویژگی‌ها آموزش دیده و تصاویر را طبقه‌بندی کند [۲۵-۲۲]. یکی از شبکه‌های محبوب برای برنامه تشخیص الگو شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه<sup>۸</sup> است. این شبکه شامل لایه ورودی، لایه پنهان و خروجی می‌باشد [۲۶].

در مرجع [۹]، کل مجموعه داده‌ها شامل ۲۵۳ نمونه می‌باشد که از ۲۵۳ نمونه، ۱۵۲ نمونه را به عنوان آموزش انتخاب کرده و ۱۰۱ نمونه باقیمانده را به عنوان داده آزمون انتخاب کرده است. برای مجموعه داده‌های آموزشی، ۹۲ وضعیت طبیعی بوده و ۶۰ نمونه باقیمانده معیوب بودند. برای مجموعه داده‌های آزمون، ۶۱ وضعیت طبیعی بوده و ۴۰ نمونه باقیمانده معیوب بودند [۹]. نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که بیشترین دقت مربوط به ویژگی maximum در شبکه عصبی MLP



شکل (۵): قطعه شبیه‌سازی شده  
Fig. (5): The simulated part

قطعه شبیه‌سازی شده شامل دو منطقه دارای نقص و بدون نقص می‌باشد که در صورت عبور جریان از قطعه شبیه‌سازی شده، در منطقه دارای نقص حرارت تولید می‌شود و به دلیل اینکه این منطقه دارای پوشش ترموکرومیک می‌باشد، تغییر رنگ در این منطقه حاصل خواهد شد و به سادگی و بدون نیاز به دوربین ترموگرافی، می‌توان از وجود نقص در تجهیزات آگاه گردید.

#### ۴- آزمایش قطعه شبیه‌سازی شده و ارائه نتایج

پس از اعمال و افزایش جریان به قطعه شبیه‌سازی شده، همانطور که در شکل (۶) مشخص است در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد هر دو منطقه دارای نقص و بدون نقص هم رنگ می‌باشند.

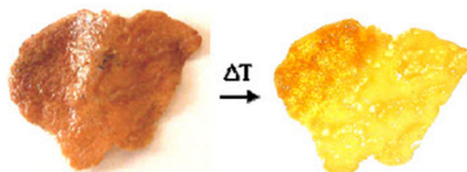
با افزایش جریان الکتریکی، دما در منطقه دارای نقص افزایش یافته و در دمای ۷۴ درجه سانتی‌گراد، رنگ محل دارای نقص کاملاً سفید شده است. در شکل (۷)، محل نقص با دایره مشخص شده است. مطابق شکل (۸) با کاهش دما به ۳۲ درجه، مجدداً هر دو منطقه دارای نقص و بدون نقص هم رنگ می‌باشند.

با توجه به نتایج به دست آمده از اتصال مورد آزمایش مشخص گردید، ایده استفاده از مواد ترموکرومیک برای شناسایی نقص در تجهیزات الکتریکی امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل (۶): اتصال مورد آزمایش در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد  
Fig. (6): The tested connection at 28 °C

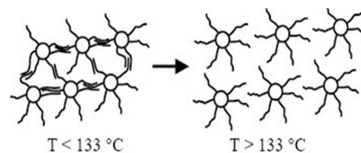
به موادی که به صورت برگشت‌پذیر، رنگشان با دما تغییر می‌کند، مواد ترموکرومیک گویند. تغییرات رنگی مواد ترموکرومیک به سبب یک واکنش شیمیایی انجام می‌شود. شکل (۳) مواد ترموکرومیک را نشان می‌دهد که بر اثر اختلاف دما دو رنگ متفاوت از خود ساطع می‌کند.



شکل (۳): مواد ترموکرومیک در دماهای متفاوت [۲۸]

Fig. (3): Thermo-chromic materials at different temperatures [28]

ساختار این مواد به گونه‌ای است که با اعمال محرک‌های خارجی خصوصیات نوری این مواد مانند ضریب جذب، قابلیت بازتاب و یا شکست نور، باعث تغییر رنگ این مواد می‌گردد. شکل (۴) ساختار اتمی مواد ترموکرومیک را نشان می‌دهد.



شکل (۴): ساختار اتمی مواد ترموکرومیک [۲۸]

Fig. (4): Atomic structure of thermo-chromic materials [28]

طبق بررسی‌های به عمل آمده مشخص گردید رنگ‌های ترموکرومیک وجود دارند که با افزایش و کاهش حرارت دچار تغییر رنگ محسوس می‌شوند. این رنگ‌ها مانند رنگ‌های معمولی روی هر جسمی قابل پوشش‌دهی می‌باشد.

مزایای استفاده از رنگ ترموکرومیک برای شناسایی نقص در اتصالات سست عبارت است از:

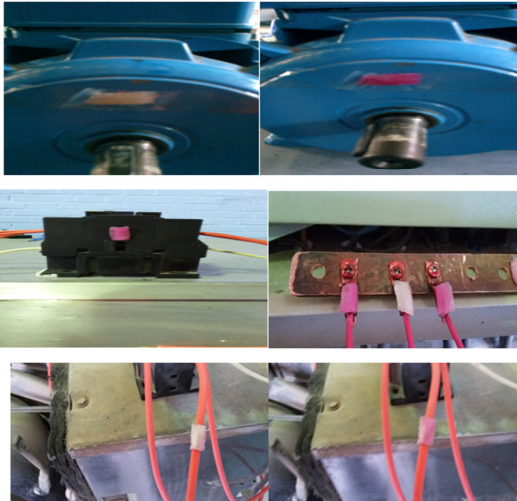
- شناسایی نقص در تجهیزات با دید غیر مسلح
- عدم نیاز به تجهیزات و نرم‌افزارهای تخصصی جهت شناسایی نقص
- شناسایی توسط هر فرد با آموزش ابتدایی
- شناسایی نقص با فاصله دور و بدون نزدیک شدن به تجهیزاتی که دارای محدودیت دسترسی می‌باشند و
- ضریب اطمینان بالا.

جهت اجرایی کردن ایده جدید استفاده از مواد هوشمند جهت شناسایی نقص در تجهیزات، شبیه‌سازی قطعه دارای نقص با پوشش ترموکرومیک در مرکز شهید رهبری آموزش فنی و حرفه‌ای استان تهران انجام گردید. در این قطعه از زله ترموکرومیک جهت پوشش دادن منطقه دارای نقص و بدون نقص استفاده گردید. شکل (۵) قطعه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که با مواد ترموکرومیک پوشش داده شده است.

- ۲- یکسان‌سازی اندازه تصویر
- ۳- تنظیم شدت درخشندگی رنگ
- ۴- تبدیل تصویر رنگی به سطوح خاکستری
- ۵- دودویی کردن تصویر (تصویر به سطوح سیاه و سفید تبدیل می‌شود)
- ۶- اعمال فیلتر حذف نویز به تصویر (این فیلتر نویزهای موجود در تصویر را از بین می‌برد. به عنوان مثال مجموعه پیکسل‌هایی که مساحت آنها کمتر از عدد ۵۰ باشد حذف می‌شوند) و نمایش نهایی تصویر استخراج شده.



شکل (۷): اتصال مورد آزمایش در دمای ۷۴ درجه سانتی‌گراد  
Fig. (7): The tested connection at 74 ° C



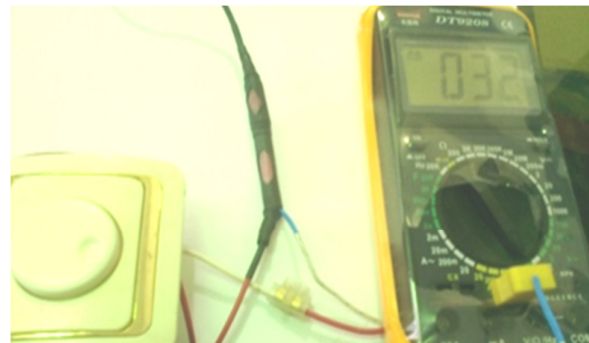
شکل (۹): تصویر تجهیزات برقی دارای پوشش ترموکرومیک  
Fig. (9): Thermo-chromic coated electronic equipment images

پس از پردازش نهایی تصویر، در صورتی که تصویر نهایی دارای نقاط سفید باشد در دسته تصاویر دارای نقص قرار می‌گیرد و عدد یک به آن تعلق می‌گیرد (معیوب). در غیر این صورت تصویر بدون نقص می‌باشد و عدد صفر به آن تعلق می‌گیرد (بدون عیب). شکل (۱۰)، مراحل الگوریتم پردازش تصویر را برای دو تصویر دارای نقص (سمت چپ) و بدون نقص (سمت راست) نشان می‌دهد.

### ۳-۵- استخراج ویژگی‌ها

در این مقاله، به منظور افزایش دقت سیستم پیشنهادی، در دو مرحله اقدام به شناسایی می‌شود. در مرحله اول، یک ویژگی نوین به نام  $F_{Hist}$  معرفی می‌شود. ابتدا هیستوگرام تصویر (دارای سطوح خاکستری) محاسبه می‌شود. سپس تعداد پیکسل‌هایی که در یک دهم انتهایی نمودار هیستوگرام قرار می‌گیرند به دست می‌آید؛ یعنی، اگر یک تصویر ۲۵۶ سطح داشته باشیم، تعداد پیکسل‌هایی که دارای سطوح روشنایی بین ۲۳۰ تا ۲۵۵ هستند را به دست می‌آوریم.  $K$  برابر این تعداد نسبت به تعداد کل پیکسل‌های تصویر یک ویژگی نوین است که  $K$  یک عدد ثابت است. اگر این ویژگی بسیار نزدیک صفر باشد نشان می‌دهد که تصویر حتماً بدون نقص است و اگر از صفر دور باشد وارد مرحله دوم سیستم پیشنهادی می‌شود.

$$F_{Hist} = K * \frac{\text{تعداد پیکسل‌های یک دهم انتهایی هیستوگرام}}{\text{تعداد کل پیکسل‌ها}} \quad (1)$$



شکل (۸): اتصال مورد آزمایش در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد  
Fig. (8): The tested connection at 32 ° C

### ۵- طبقه‌بندی تجهیزات الکتریکی با پوشش ترموکرومیک توسط شبکه عصبی

در ادامه تحقیق، در مواردی که ورود کاربر به محل نصب تجهیزات به دلایل مختلف ممکن نباشد یا به صرفه نباشد، مراحل زیر جهت طبقه‌بندی تجهیزات برقی پیشنهاد می‌شود. از تجهیزاتی که با مواد ترموکرومیک پوشش داده شده‌اند تصویر تهیه می‌شود. سپس توسط نرم‌افزار متلب، این تصاویر پردازش شده و ویژگی‌های پیشنهادی از این تصاویر استخراج می‌شوند. در نهایت، این ویژگی‌ها به شبکه عصبی اعمال شده تا شبکه عصبی این تصاویر را طبقه‌بندی نماید.

### ۵-۱- تهیه تصویر از تجهیزات دارای مواد ترموکرومیک

یکی از مزایای این ایده این است که تهیه این تصاویر نیاز به دوربین‌های ترمووژن ندارد و تهیه تصویر با دوربین‌های معمولی انجام می‌شود. در این مطالعه تعداد ۲۵۳ عکس توسط دوربین موبایل از تجهیزات برقی موجود در کارگاه برق صنعتی، کارگاه برودتی و تهویه مطبوع، تابلو برق اداری و تابلو برق توزیع مرکز آموزشی شهید رهبری سازمان فنی و حرفه‌ای کشور تهیه گردید. در شکل (۹) تعدادی از این تصاویر نشان داده شده است.

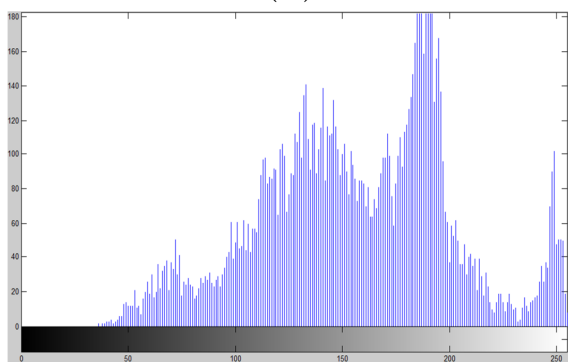
### ۵-۲- پردازش تصویر

توسط نرم‌افزار متلب، پردازش تصویر بر روی تصاویر گرفته شده طی مراحل پیشنهادی زیر انجام شد.

### ۱- فراخوانی تصویر



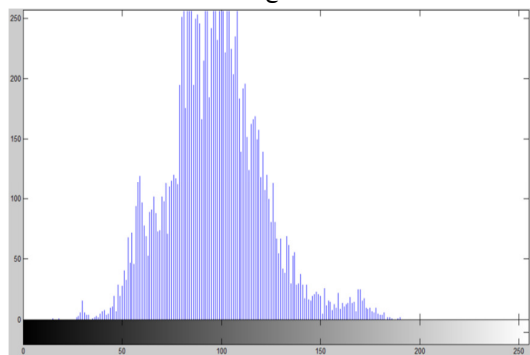
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۱): الف) تصویر دارای نقص و ب) هیستوگرام آن، ج) تصویر بدون نقص و د) هیستوگرام آن

Fig. (11): a) Image with defect and b) its histogram, c) image without defect and d) its histogram

در شکل (۱۱)، تصاویر با نقص و بدون نقص به همراه هیستوگرام آنها نشان داده شده است. در شکل (۱۱-الف) با فرض  $K=20$  داریم:  

$$F_{Hist} = 20 * \frac{801}{13398} = 20 * 0.0598 = 1.198$$
  
 در شکل (۱۱-ج) نیز خواهیم داشت:  

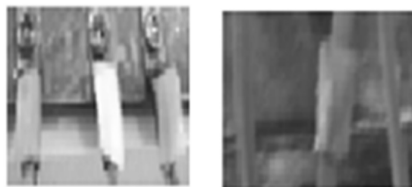
$$F_{Hist} = 20 * \frac{0}{13398} = 0$$
  
 همانطور که مشاهده می‌شود در تصویر بدون نقص (شکل ۱۱-ج، د)،  $F_{Hist}$  صفر است.



الف



ب



ج



د



ه

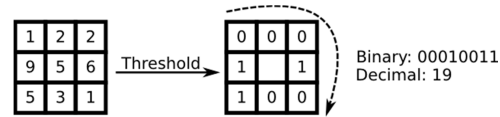
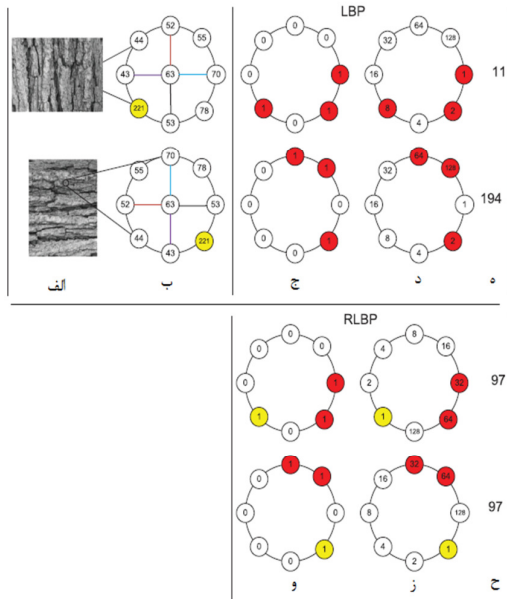
شکل (۱۰): خروجی مراحل پردازش تصویر الگوریتم پیشنهادی (شکل سمت چپ دارای نقص است) الف) تصویر اصلی ب) یکسان‌سازی و تنظیم شدت درخشندگی ج) تبدیل به سطوح خاکستری د) دودویی کردن تصویر ه) فیلتر کردن

Fig. (10): The output of image processing of the proposed algorithm (The figure on the left is defected) a) Original image b) Resizing and intensity adjusting c) Gray level transformation d) Image binary e) Image filtering

در شکل (۱۱)، تصاویر با نقص و بدون نقص به همراه هیستوگرام آنها نشان داده شده است. در شکل (۱۱-الف) با فرض  $K=20$  داریم:  

$$F_{Hist} = 20 * \frac{801}{13398} = 20 * 0.0598 = 1.198$$
  
 در شکل (۱۱-ج) نیز خواهیم داشت:  

$$F_{Hist} = 20 * \frac{0}{13398} = 0$$
  
 همانطور که مشاهده می‌شود در تصویر بدون نقص (شکل ۱۱-ج، د)،  $F_{Hist}$  صفر است.



شکل (۱۲): نحوه استخراج ویژگی LBP  
Fig. (12): LBP feature extraction

$$LBP_p = \sum_{p=0}^{P-1} S(g_p - g_c) \cdot 2^p \quad (2)$$

$$S(g_p - g_c) = \begin{cases} 1 & g_p \geq g_c \\ 0 & g_p < g_c \end{cases}$$

به دلیل آنکه ادوات قدرت می‌توانند در جهات مختلف نصب شده باشند و دارای چرخش در تصویر باشند، در این مقاله از روش DRLBP<sup>۱</sup> به استخراج ویژگی پرداخته شده است [۲۹]. در DRLBP ترتیب ثابت وزن‌ها اصلاح می‌شود؛ به این ترتیب که یک جهت غالب<sup>۱۱</sup> برای وزن‌ها تعریف می‌شود. شروع جهت غالب از جایی است که اختلاف پیکسل‌های همسایه از پیکسل مرکزی ( $g_c$ ) بیشینه باشد. شکل (۱۳) نحوه عملکرد DRLBP در مقابل LBP را نشان می‌دهد.

به طور خلاصه، در مرحله اول روش پیشنهادی با استفاده از ویژگی  $F_{Hist}$ ، تصاویری که حتماً بدون نقص هستند جدا می‌شوند. سپس، در مرحله دوم با استخراج ویژگی DRLBP و توسط شبکه عصبی به شناسایی تصاویر بدون نقص و با نقص پرداخته می‌شود.

#### ۵-۴- نتایج عملکرد ویژگی‌ها

ویژگی معرفی شده مرحله اول در بخش ۵-۳ توسط نرم‌افزار متلب از ۲۵۳ عدد تصویر استخراج گردید. در پایگاه داده ۱۵۲ عدد از تصاویر بدون نقص و ۱۰۱ عدد دارای نقص می‌باشند. با فرض  $K=20$ ، تصاویری که  $F_{Hist}$  آنها کوچکتر از  $0/1$  بود بدون نقص تشخیص داده شدند؛ در غیر این صورت ویژگی DRLBP برای آن‌ها محاسبه شد و به شبکه عصبی MLP با یک لایه پنهان و ۱۰ نرون توسط الگوریتم LM آموزش داده شد. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد برای آزمون شبکه در نظر گرفته شد.

نتایج نشان داد که ویژگی  $F_{Hist}$  و DRLBP می‌تواند تصاویر را با دقت  $92/6\%$  طبقه‌بندی کند. در نتیجه ترکیب این ویژگی‌ها کارایی مناسبی را برای طبقه‌بندی کردن تصاویر دارد. جدول (۳) نتایج به دست آمده از عملکرد سیستم پیشنهادی را در دو حالت استفاده تنها از DRLBP و استفاده از  $F_{Hist}$  در مرحله اول و سپس به کارگیری DRLBP در مرحله دوم نشان می‌دهد.

اگر زاویه تصویربرداری مناسب نباشد، سیستم در تشخیص دچار خطا می‌شود. از دیگر عوامل خطا نور نامناسب محیط و همچنین مساحت کوچک ماده ترموکرومیک نسبت به کل تجهیز برقی است. شکل (۱۴) یک نمونه از تجهیزاتی که دارای نقص است ولی تشخیص داده نشده را نشان می‌دهد.

شکل (۱۳): اثر چرخش در عملگرهای LBP و DRLBP (الف) تصویر اصلی (در بالا) و ۹۰ درجه چرخش یافته آن (در پایین)، (ب) پیکسل‌های همسایه (که در پایین چرخش یافته است)، (ج) محاسبه مقادیر آستانه همسایه‌ها، (د) محاسبه وزن‌ها، (ه) مقادیر LBP به دست آمده، (و) محاسبه مقادیر آستانه همسایه‌ها و یافتن بیشترین اختلاف، (ز) محاسبه وزن‌ها با ترتیب جدید، (ح) مقادیر DRLBP

به دست آمده که در تصویر اصلی و چرخش یافته برابر یکدیگرند [۲۹].  
Fig. (13): Effect of the rotation on LBP and DRLBP operators, a) Original image (top) and 90° counter-clockwise rotated image (bottom), b) Neighboring pixels (which rotated at the bottom), c) Thresholded neighbors d) The weights corresponding to the thresholded neighbors, e) LBP values, f) Thresholded neighbors and finding the maximum difference, g) The weights of the new thresholded neighbors h) DRLBP values which the values for the original and rotated image is the same [29]

Table (3): The defect detection results

جدول (۳): نتایج تشخیص نقص

دقت تشخیص MLP (%)	ویژگی
۸۹/۸	DRLBP
۹۲/۶	مرحله اول $F_{Hist}$ و سپس DRLBP



شکل (۱۴): یک تصویر دارای خطا در تشخیص تجهیز عیب‌دار  
Fig. (14): An image with error in defect recognition

#### ۵-۵- مقایسه با کار دیگران

استفاده از تصاویر حرارتی<sup>۱۲</sup> در کاربردهای پزشکی و صنعتی گسترده است [۳۰ و ۳۱]. مقاله [۳۲] به تشخیص نقص در موج‌شکن<sup>۱۳</sup> با استفاده از روش ترموویژن پرداخته است. در آن مقاله از روش آب

مشاهده توسط کاربر باشد، نقص به سادگی شناسایی می‌شود. در مواردی که ورود کاربر به محل نصب تجهیزات به دلایل مختلف ممکن نباشد یا به صرفه نباشد می‌توان با نصب دوربین از تجهیزات تصویربرداری کرد و توسط الگوریتم پیشنهادی تجهیزات را به دو گروه دارای نقص یا بدون نقص طبقه‌بندی کرد.

همچنین به دلیل تغییر رنگ محسوس مواد ترموکرومیک، پردازش تصویر و استخراج ویژگی‌ها به راحتی انجام می‌گیرد. در این مقاله، با استفاده از ویژگی‌های معرفی شده  $F_{Hist}$  و  $DRLBP$  در دو مرحله گرمای بیش از حد قطعات تشخیص داده شد که در بهترین حالت دقت ۹۲/۶ درصد را به ارمغان آورد. با توجه به تغییر رنگ با افزایش دما پیشنهاد می‌گردد در گستره وسیعی از تجهیزات برقی قدرت از جمله موارد زیر از پوشش رنگ ترموکرومیک استفاده شود.

- پوشش در ترانس‌های قدرت
- پوشش بر روی الکتروموتورها
- پوشش بر روی شین‌های سه فاز
- پوشش بر روی ادوات برقی
- پوشش به عنوان ترمو شیلد برای انواع اتصال‌ها

#### قدردانی

در پایان لازم می‌دارد از مدیر، مدرسان کارگاه لوازم خانگی، مکانیک و کارآموزان مرکز آموزش فنی و حرفه‌ای شهید رهبری استان تهران که در پیاده‌سازی تجهیزات دارای نقص و تهیه تصاویر دارای پوشش ترموکرومیک مساعدت نمودند، تشکر و قدردانی نماید.

#### پی‌نوشت:

1. Preventive Maintenance
2. Preventive Predictive Maintenance
3. MTTF
4. Support Vector Machine
5. National Electrical Testing Association
6. American Society for Testing & Materials
7. National Fire Protection Association
8. MLP
9. Local Binary Patterns
10. Dominant Rotated LBP
11. Dominant Direction
12. Thermal
13. Surge Arresters
14. Watershed

پخشان<sup>۱۴</sup> برای بخش‌بندی تصویر استفاده شده است. شرایط موج‌شکن به چهار وضعیت دارای نقص، عادی، برقدار و مشکوک طبقه‌بندی شده است و همچنین از شبکه عصبی-فازی برای طبقه‌بندی استفاده شده است که در بهترین حالت به دقت ۹۰/۶ درصد رسیده است. در مقاله [۳۳] برای تشخیص نقص از ویژگی‌های ممان و آماری بر روی تصاویر حرارتی استفاده شده است. ممان زرنیک به عنوان ویژگی و بردار پشتیبان ماشین به عنوان طبقه‌بند استفاده شده است. با استخراج ویژگی از تصاویر سطوح خاکستری به دقت ۸۳ درصد رسیده‌اند. در مقایسه با کارهای قبلی، در این مقاله به عنوان یک کار نوین با استفاده از مواد ترموکرومیک، تصاویر حرارتی به راحتی در دسترس قرار دارد که ویژگی‌ها و روش‌های مقاله‌های قبلی بر روی آن قابل استفاده است. با توجه به جدید بودن روش در حال حاضر به تصاویری که دارای برجسب ترموکرومیک هستند دسترسی داشتیم که تشخیص عیب راحت‌تر از حالتی بود که کل تجهیز مورد نظر دارای پوشش باشد (که آماده‌سازی پایگاه تصاویر آن جزء پیشنهادات آینده است). به همین دلیل استفاده از ویژگی‌های ساده و همچنین ویژگی پیشنهادی برای تشخیص عیب با دقت مناسب کارگشا بود. با آماده‌سازی پایگاه تصاویر حرارتی تجهیزات پوشش‌دار که امکانات صنعتی خاص نیاز دارد، استفاده از ویژگی‌های سطح بالاتر و روش‌های مناسب‌تر در آینده قابل تحقیق است.

در مجموع، یک روش کارا برای تشخیص گرمای بیش از حد در سیستم‌های قدرت با استفاده از مواد ترموکرومیک در این مقاله ارائه شده است. در سیستم‌های فعال و در حال کار پیشنهاد می‌شود از برجسب‌های ترموکرومیک استفاده شود (شکل (۹) برجسب‌ها را نشان می‌دهد). با توجه به مشخصات رنگ‌های ترموکرومیک، این رنگ‌ها مشکلات شیمیایی برای تجهیزات و یا انسان ندارد [۳۴]. همچنین قیمت این رنگ‌ها بسته به نوع کاربرد و نوع پیگمنت‌ها متغیر است و از رنگ‌های معمولی گران قیمت‌تر است. اما با توجه به نشان دادن سریع تغییرات دمایی تجهیزات و جلوگیری از آسیب‌های بعدی آن مقرون به صرفه است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مراحل بیان شده در این مقاله مشخص گردید در صورتی که مواد ترموکرومیک بر روی تجهیزات برقی پوشش داده شود، نقص‌های حرارتی با تغییر رنگ مواد ترموکرومیک به سادگی قابل شناسایی می‌باشد و دیگر نیازی به تجهیزاتی از قبیل دوربین‌های ترمووژن نیست. اگر تجهیزات دارای پوشش ترموکرومیک در دسترس و قابل

#### References

- [1] N. Hou, "The infrared thermography diagnostic technique of high-voltage electricalequipments with internal faults", Proceeding of the IEEE/POWERCON, Vol. 1, pp. 110-115, Beijing, China, Aug. 1998.
- [2] S.P. Garnaik, "Infrared thermography: a versatile technology for condition monitoring and energy conservation", <www.reliabilityweb.com>. (accessed11.08.11).
- [3] Z. Korendo, M. Florkowski, "Thermography based diagnostic of power equipment", Power Engineering Journal, Vol. 15, No. 1, pp. 33-42, Feb. 2001.
- [4] R.A. Epperly, G.E. Heberlein, L.G. Eads, "A tool for reliability and safety: predict and prevent equipment failures with thermography", Proceeding of the IEEE/, pp. 59-68, Banff, Alta., Canada, Sep. 1997.



- [5] M.A. Kregg, "Benefits of using infrared thermography in utility substations", *Proceeding of the SPIE*, pp. 249–257, 2004.
- [6] R. Salisbury, "Thermal image and predictive maintenance: what the future has store", *Proceeding of the IEEE/PCA*, Salt Lake City, Utah, pp. 277–287, May 2000.
- [7] F. Lizak, M. Kolcun, "Improving reliability and decreasing losses of electrical system with infrared thermography", *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 8, No. 1, pp. 60–63, 2008.
- [8] A.S.N. Huda, S. Taib, D. Ishak, "Analysis and prediction of temperature of electrical equipment for infrared diagnosis considering emissivity and object to camera distance setting effect", *Proceeding of the PIERS.*, Kuala Lumpur, Malaysia, March 27–30, March 2012.
- [9] A.S.N. Huda, S. Taib, "Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography", *Infrared Physics and Technology*, Vol. 61, pp. 184–191, Nov. 2013.
- [10] E.T.W. Neto, E.G. da Costa, M.J.A. Maia, "Influence of emissivity and distance in high voltage equipments thermal imaging", *Proceeding of the IEEE/PES*, pp. 1-4, Caracas, Venezuela, Aug. 2006.
- [11] B.B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar, J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review", *Infrared Phys. Technol*, Vol. 55, No. 4, pp. 221–235, July 2012.
- [12] M.S. Jadin, S. Taib, "Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipments by using infrared thermography", *Infrared Phys. Technol*, Vol. 55, No. 4, pp. 236–245, July 2012.
- [13] M.A. Shafi'i, N. Hamzah, "Internal fault classification using artificial neural network", *Proceeding of the IEEE/PEOCO*, pp. 352–357, Shah Alam, Malaysia, June 2010.
- [14] M. Negnevitsky, *Artificial intelligence: A guide to intelligent system*, Second ed., Addison-Wesley, England, 2004.
- [15] K. Mahmood, A. Zidouri, A. Zerguine, "Performance analysis of a RLS-based MLP-DFE in time-invariant and time-varying channels", *Digital Signal Process*, Vol. 18, No. 3, pp. 307–320, May 2008.
- [16] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares", *Quart. Appl. Math.* Vol. 2, No. 2, pp. 164–168, 1944.
- [17] D.W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters", *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, pp. 431–441, 1963.
- [18] C.M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Oxford University Press, Oxford, pp. pp. 253–424, 2004.
- [19] M.S. Jadin, S. Taib, S. Kabir, M.A.B. Yousuf, "Image processing methods for evaluating infrared thermographic image of electrical equipments", in: *Progress of Electromagnetics Research Symposium Proc.*, Marrakesh, Morocco, Mar. 20–23, 2011.
- [20] *Standard for Infrared Inspection of Electrical Systems & Rotating Equipment*, Infrasppection Institute, 2008.
- [21] ASTM, *ASTM E 1934: Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography*, West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM International, 2005.
- [22] NFPA, *NFPA 70B: Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 2006.
- [23] Y. Chou, L. Yao, "Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography", *Proceeding of the IEEE/SOCPAR*, pp. 155–160, Malacca, Malaysia, Dec. 2009.
- [24] M.S. Jadin, S. Kabir, S. Taib, "Thermal imaging for qualitative-based measurements of thermal anomalies in electrical components", *Proceeding of the IEEE/ECPC*, Saudi Arab, 24–26, June 2011.
- [25] J.N. Kapur, P.K. Sahoo, A.K.C. Wong, "A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram", *Comput. Vision Graphics Image Process.* 29, pp. 273–285, 1985.
- [26] M. Azarbad, A. Ebrahimzade, V. Izadian, "Segmentation of infrared images and objectives detection using maximum entropy method based on the bee algorithm", *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, Vol. 3, pp. 26-33, 2011.
- [27] N.A. Mat Isa, M.S. Al-Batah, K.Z. Zamli, K.A. Azizli, A. Joret, N.R. Mat Nor, "Suitable features selection for HMLP and MLP networks to identify the shape of aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 3, pp. 402–410, March 2008.
- [28] <http://www.stardustcolors.co.uk>
- [29] R. Mehta, K. Egiazarian, "Dominant rotated local binary patterns (DRLBP) for texture classification", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 71, pp. 16-22, Feb. 2016.
- [30] T. Dutta, J. Sil, P. Chottopadhyay, "Condition monitoring of electrical equipment using thermal image processing", *Proceeding of the IEEE/CMI*, pp. 311-315, Kolkata, India, Jan. 2016.
- [31] M. Suguna, S. Mohamed Mansoor Roomi, I. Sanofer, "Fault localisation of electrical equipments using thermal imaging technique", *Proceeding of the IEEE/ICETT*, pp. 1-3, Kollam, India, Oct. 2016.
- [32] J.V.B. Soares, J.J.G. Leandro, R.M. Cesar, H.F. Jelinek, M.J. Cree, "Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A new approach", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 24, No. 2, pp. 751 – 757, April 2009.
- [33] A. Rahmani, J. Haddadnia, O. Seryasat, "Intelligent fault detection of electrical equipment in ground substations using thermo vision technique", *Proceeding of the IEEE/ICMEE.*, Vol. 2, pp. 150-154, Kyoto, Japan, Aug. 2010.
- [34] S. Rouhani, Z. Bahrami niya, "Review on smart thermochromics and their application", *Journal of Studies in Color World*, Vol. 3, No. 3, pp. 23-32, Autumn 2013.

