



تشخیص هوشمند عیوب رادیاتور خنک کاری مبتنی بر تکنیک‌های هوش مصنوعی و پردازش تصاویر گرمایی

امین طاهری‌گراوند^{1*}، محمود امید²، حجت احمدی²، سید سعید محتسبی²، جیوانی ماریا کارلومگنو³

1- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

2- استاد، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج

3- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه ناپل فدریکو II، ناپل، ایتالیا

* خرم‌آباد، صندوق پستی 6815144316، taheri.am@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 آبان 1395

پذیرش: 26 دی 1395

ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

کلید واژگان:

رادیاتور

تشخیص عیوب

گرمانگاری

انفیس

الگوریتم ژنتیک

چکیده

در این تحقیق سامانه مبتنی بر تلفیق فناوری‌های گرمانگاری و پردازش تصویر برای تشخیص و طبقه‌بندی عیوب مختلف رادیاتور توسعه داده می‌شود. ابتدا عیوب متداول در رادیاتورهای سیستم خنک‌کاری شامل گرفتگی لوله‌های رادیاتور، گرفتگی شبکه رادیاتور، اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور، نشتی مایع خنک‌کاری، خرابی درب رادیاتور به صورت مصنوعی ایجاد شد. سپس از شرایط مختلف رادیاتور معیوب و سالم به منظور تشخیص عیوب مختلف رادیاتور در سه سطح دمایی، سه سطح دبی جریان سیال خنک‌کاری در حال گردش و دو سطح سرعت هوای عبوری از شبکه رادیاتور تصاویر گرمایی توسط دوربین فروسرخ تهیه شد. پس از پیش‌پردازش تصاویر گرمایی تهیه شده جهت تجزیه و پردازش چند دقتی از تصاویر یادشده تبدیل مویک در یک سطح تجزیه اعمال شد. از هر کدام از تصاویر گرمایی مقیاس خاکستری، تصاویر تقریب، جزئیات افقی، عمودی و قطری تبدیل مویک آن تصویر، ویژگی‌های آماری بافت استخراج شد، سپس با تلفیق تکنیک‌های هوشمند الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی - فازی تطبیقی (انفیس)، از آن جهت انتخاب ویژگی و ورودی‌های مؤثر به طبقه‌بند و در نهایت از انفیس برای طبقه‌بندی تصاویر گرمایی با استفاده از بردار ویژگی‌های مستخرج و منتخب استفاده شد. از شاخص‌های آماری نظیر دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن محاسبه برای ارزیابی طبقه‌بند بهره برده شد. سامانه پیشنهادی پس از ارزیابی توانست با دقت کلی طبقه‌بندی 94.11% عیوب مختلف رادیاتور سیستم خنک‌کاری را تشخیص و طبقه‌بندی کند؛ بنابراین استفاده از تکنیک پردازش تصاویر گرمایی مبتنی بر هوش مصنوعی برای پایش وضعیت و تشخیص هوشمند عیوب رادیاتور امیدوارکننده است.

Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based on thermal image processing and artificial intelligence techniques

Amin Taheri-Garavand^{1*}, Mahmoud Omid², Hojjat Ahmadi², Seyed Saeid Mohtasebi², Giovanni Maria Carlomagno³

1- Mechanical Engineering of Biosystems Department, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Department of Industrial Engineering-Aerospace Division, University of Naples Federico II, Naples, Italy

* P.O.B. 6815144316 Khorramabad, Iran, taheri.am@lu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 November 2016
Accepted 15 January 2017
Available Online 13 February 2017

Keywords:
Radiator
ANFIS
Genetic Algorithm
Fault Diagnosis Thermography

ABSTRACT

In this study, an intelligent diagnosis system has been developed and applied for classifying six types of cooling radiator conditions by means of infrared thermal images; namely, radiator tube blockage, radiator fin blockage, loose connections between fins and tubes, radiator door failure, coolant leakage and normal. The proposed system consists of several subsequent procedures including thermal image acquisition, preprocessing, of images via two dimensional discrete wavelet transform (2D-DWT), feature extraction, feature selection, and classification. The 2D-DWT was implemented to decompose the thermal images. Subsequently, statistical texture features were extracted from the original and decomposed thermal images. Consequently, statistical texture features are extracted from the original and decomposed thermal images to develop ANFIS classifiers. In this paper, the significant and relevant features are selected based on genetic algorithm (GA) in order to enhance the performance of ANFIS classifier. For evaluating ANFIS classifier performance, the values of the confusion matrix, such as specificity, sensitivity, precision and accuracy were computed. The overall accuracy of the classifier was 94.11 %. The results demonstrated that this system can be employed satisfactorily as intelligent condition monitoring and fault diagnosis for a class of cooling radiator.

1- مقدمه

درون‌سوز برای نگهداری مقدار زیادی آب در مجاورت حجم وسیعی از هوا رادیاتور یک نوع مبدل حرارتی است که در سیستم خنک‌کاری موتورهای به کار می‌رود تا انتقال حرارت از آب به هوا به خوبی و به سرعت امکان‌پذیر

Please cite this article using:

A. Taheri-Garavand, M. Omid, H. Ahmadi, S. S. Mohtasebi, G. M. Carlomagno, Intelligent fault diagnosis of cooling radiator based on thermal image processing and artificial intelligence techniques, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 240-250, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

باشد [1]. در طول فرایند احتراق در سیلندره‌های موتورهای درون‌سوز، دما به بیش از 2000 درجه سلسیوس می‌رسد [2]. بیشتر مواد استفاده شده در ساختار اجزای موتور قادر به تحمل دمای بالای حاصل از احتراق نیستند و اگر به سرعت خنک نشود از کار می‌افتد؛ بنابراین عملیات مناسب انتقال حرارتی که در یک موتور رخ می‌دهد برای عملکرد مناسب موتور در شرایط کاری مختلف بسیار مهم و اجتناب ناپذیر است [3]. مطالعه حرارتی/ساختاری رادیاتورها بیشتر به دلیل نشی ناشی از ترک و دیگر خرابی‌های سیستم خنک‌کاری ماشین‌های سنگین و سستی در ریشه‌یابی نقاط معیوب مطرح می‌شود. تنش‌های حرارتی بزرگ و غیریکنواخت در رادیاتور منجر به فرسایش مواد و خرابی اجزایی مانند واشر سرسیلندر و یا آب‌بند پمپ آب می‌شود. از این گونه موارد کم نیستند که تمام مجموعه رادیاتور به دلیل جلوگیری از کاهش عملکرد سیستم خنک‌کاری و گرم‌شدن بیش از حد موتور که ممکن است منجر به آسیب‌های قابل توجهی در موتور شود تعویض می‌شود. دلایل متعددی سبب ایجاد تنش ساختاری در رادیاتورها می‌شود، گرادیان حرارتی غیریکنواخت جریان آب گرم که حامل یک بار حرارتی ناپایدار از موتور به هدر بالایی، لوله‌ها و هدر پایینی رادیاتور از دلایل اصلی است [4].

مشکلات ناشی از خوردگی، رسوب گذاری و گرفتگی لوله‌ها برای دراز مدت در سیستم‌های خنک‌کننده شدید و بحرانی بوده و در صورت عدم رسیدگی و برطرف نشدن این مشکلات، امکان سوراخ شدن سطوح و نفوذ آب به سایر قسمت‌ها و بخش‌ها نیز وجود خواهد داشت. رسوبات تشکیل شده سبب گرفتگی لوله‌ها و مجاری، کاهش انتقال حرارت بین آب و موتور می‌شوند که می‌تواند منجر به خروج سیستم از چرخه فرآیند شود [5].

رادیاتور یکی از اجزای کلیدی سیستم خنک‌کاری موتور است که نقش به‌سزایی در نگهداری دمای موتور در شرایط کاری مطلوب ایفا می‌کند. عمر قطعات و از کارافتادگی ناگهانی موتور، پایش وضعیت رادیاتور جهت استفاده از سطح بهینه انتقال حرارت با توجه به اهمیت سیستم خنک‌کاری در عملکرد و بازدهی بهتر موتور از جمله مباحث مهم در زمینه پایش وضعیت موتور محسوب می‌شود [6].

دما از مهم‌ترین پارامترهای تشخیص وضعیت ماشین، متفاوت در تجهیزات و اجزا قسمت‌های معیوب ماشین نسبت به سالم است. در نتیجه گرما پارامتری کلیدی برای پایش وضعیت و کارایی ماشین جهت تشخیص عیوب آن است [7]. با توجه به این‌که دما اصلی‌ترین پارامتر در تعیین عملکرد و سلامت رادیاتور است، از روش گرمانگاری جهت پایش وضعیت رادیاتور استفاده می‌شود.

گرمانگاری فروسرخ بر پایه اندازه‌گیری توزیع تشعشعات انرژی گرمایی ساطع شده از سطح جسم مورد نظر و تبدیل کردن آن به یک تصویر است که در واقع اختلاف شدت تشعشعات (نقشه دمایی سطح) در نقاط مختلف سطح جسم را نشان می‌دهد [8]. از فناوری گرمانگاری فروسرخ به‌طور گسترده‌ای در پایش وضعیت ماشین‌ها و تجهیزات استفاده شده است. جی و همکاران از گرمانگاری جهت پایش عملکرد واحد هواخنک مستقیم نیروگاه استفاده کرده‌اند. آن‌ها توزیع دمای کندانسورهای واحد هوا خنک را با استفاده از این فناوری بازرسی کردند و اثرات دمای هوای محیط، جریان طبیعی هوا و عیوب پوشش بر عملکرد واحد را بررسی کردند [9]. مطالعات نشان می‌دهد از تکنیک گرمانگاری می‌توان برای پایش وضعیت اجزای توربین بادی برای جلوگیری از عیوب نابهنگام پره‌های توربین هنگام کار استفاده کرد [10]. باگازوپن و همکاران از گرمانگاری برای پایش وضعیت یاتاقان‌ها، شفت و موتور دمنده سیستم تخلیه استفاده شده در سیستم تهویه هوای نیروگاه هسته‌ای

استفاده کردند [11]. کیم و همکاران از گرمانگاری برای تشخیص عیوب و اثرات ناشی از وجود جسم خارجی نظیر ذرات شن و یا پودر فلزات در داخل یاتاقان تحت بارگذاری دینامیکی استفاده کردند [12]. از گرمانگاری به‌طور گسترده برای پایش بر خط نفوذ جوش، کنترل فرایند جوش‌کاری، کنترل ته‌نشینی مواد، کنترل سیستم جوش‌کاری، اطمینان از کیفیت جوش‌کاری لیزر و پایش کیفیت فرایند برش‌کاری در روش جت آب بهره برده شده است [7]. وانگ و همکاران از گرمانگاری برای تشخیص گرفتگی جریان روغن سیستم خنک‌کاری ترانسفورماتورهای قدرت استفاده کردند [13]. همچنین برای پایش وضعیت انواع مختلف تجهیزات الکتریکی از قبیل واحد کنترل الکترونیکی (ECU)، ترانسفورماتورها، ایستگاه‌های فرعی، سوئیچینگ‌ها، بانک‌های خازن، خطوط نیروی فشار قوی، تابلوهای قدرت و روشنایی، کابل‌های قدرت و متعلقات آن‌ها می‌توان از این فناوری استفاده کرد [14].

گرمانگاری روشی بر خط، زمان واقعی برای پایش وضعیت دمایی تجهیزات و فرایندها، به صورت غیرتماسی و غیرمداخله‌گر در کاربردهای مختلف پایش و تشخیص وضعیت ماشین است، که این روش پایش وضعیت منجر به کاهش توقفات و کاهش خاموشی‌های ناگهانی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش حوادث و خطرات و همین‌طور افزایش بهره‌وری می‌شود. برای پایش وضعیت ماشین می‌توان از تکنیک‌های مدرن پردازش تصویر و هوش مصنوعی در گرمانگاری، تصمیمات دقیق و سریع و بدون دخالت کاربر اتخاذ کرد [7].

یونس و یانگ یک سامانه تشخیص هوشمند برای طبقه‌بندی شرایط مختلف ماشین دوار به کمک اطلاعات حاصل از تصاویر حرارتی ارائه کردند. پس از اکتساب تصاویر حرارتی از شرایط مختلف ماشین دوار و پردازش تصاویر مربوطه، از بردار ماشین پشتیبان (SVM) و آنالیز تفکیک خطی (LDA) به‌عنوان طبقه‌بند جهت طبقه‌بندی عیوب ماشین دوار استفاده کردند [15]. از بازرسی ترموگرافیک برای یافتن تغییرات دمای ناشی از خرابی پیش از وقوع خرابی در تجهیزات و ماشین آلات استفاده می‌شود؛ بنابراین یک سامانه تشخیص هوشمند بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) سبب کاهش زمان عملیات، نیروی کارگری، زحمات انسانی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سامانه می‌شود. هدا و همکاران برای بازرسی تجهیزات الکتریکی از گرمانگاری مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کردند [16]. جادین و همکاران از بردار ماشین پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان طبقه‌بند در پایش وضعیت گرمایی برای تشخیص و طبقه‌بندی تأسیسات الکتریکی استفاده کردند [17]. گامارا و کوینترو از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بردار ویژگی و از شبکه‌های عصبی برای تشخیص تصاویر دیجیتال و کنترل کیفیت استفاده کردند [18].

در این تحقیق یک سامانه مبتنی بر فناوری‌های گرمانگاری و پردازش تصاویر حرارتی برای تشخیص و طبقه‌بندی عیوب مختلف رادیاتور توسعه داده می‌شود. پس از پیش‌پردازش تصاویر گرمایی تهیه شده جهت تجزیه و پردازش چند دقتی از تصاویر یادشده تبدیل موجه در یک سطح تجزیه اعمال شد، سپس با تلفیق تکنیک‌های هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی - فازی تطبیقی (انفیس)، جهت انتخاب ویژگی و ورودی‌های مؤثر به طبقه‌بند استفاده شد. در نهایت از شبکه عصبی - فازی تطبیقی (انفیس) به‌عنوان طبقه‌بند برای طبقه‌بندی تصاویر گرمایی با استفاده از بردار ویژگی‌های منتخب استفاده شد.

2- مواد و روش ها

2-1- ساخت و پیاده سازی بستر آزمایشگاهی پایش وضعیت رادیاتور

یک بستر آزمایشگاهی جهت اجرا و توسعه یک سامانه هوشمند تشخیص عیوب مختلف رادیاتور که بتواند شرایط و نیازمندی های لازم برای پایش وضعیت و تشخیص عیوب رادیاتور را فراهم آورد ساخته شد. شکل 1 طرحواره بستر آزمایشگاهی مورد نظر را نشان می دهد. مهم ترین اجزاء سخت افزاری این سامانه گرمانگاری شامل رادیاتور، شاسی، سامانه گرمایش آب، پمپ آب، دبی سنج، حسگرهای دما، حسگر سرعت هوا، اینورتر، الکتروموتور سه فاز، فن (پروانه)، واحد کنترل دما، دوربین گرمانگاری، دو دستگاه رایانه، شیرهای کنترلی برای تنظیم جریان آب گردش در رادیاتور، لوله، اتصالات و غیره است. مشخصات اجزا در جدول 1 آمده است.

2-2- عیوب رادیاتور و تهیه تصاویر گرمایی

با توجه به بررسی های انجام شده مشخص شد موارد زیر از عیوب متداول رادیاتور است.

- گرفتگی لوله های آب در نقاط مختلف رادیاتور، امکان دارد بر اثر جرم گرفتن داخل لوله های رادیاتور مسدود شده و یا جریان عبور آب آن ها کمتر شود؛ بنابراین قسمتی که لوله های آن گرفته عملاً در عملیات انتقال حرارت نقشی نداشته و آن بخش رادیاتور از مدار خنک کاری خارج شده است.
- گرفتگی شبکه های هوا در نواحی مختلف، ماشین های راسازی، کشاورزی و خارج جاده ای مرسوم تر و معمولاً به دلیل گرد و غبار ناشی از عملیات راه سازی، شخم، تسطیح، خرمن کوبی است، یا برگ درختان، کاه و غیره که به دلیل مکش هوا توسط پروانه به داخل شبکه های رادیاتور کشیده شده و سبب گرفتگی آن ها می شود. این گرفتگی ها از عبور جریان هوا بین پره ها جلوگیری کرده و بدین ترتیب عملیات انتقال حرارت از مایع خنک کاری به هوای محیط به خوبی انجام

- نشی رادیاتور به طور کلی خوردگی از مهم ترین عوامل ایجاد روزه در سیستم خنک کاری است و کارهای بسیاری برای مقابله با این مشکل صورت گرفته است، مانند استفاده از مایع خنک کننده ضد خوردگی و نیز آلیاژهای مقاوم به خوردگی و ...، اما با این حال خوردگی در سیستم خنک کاری از جمله در رادیاتور از مهم ترین عوامل به ویژه در ماشین های ثابت بوده است؛ بنابراین نشی در رادیاتور امکان دارد به دلیل خوردگی، فرسودگی، ضربه، اصابت جسم خارجی و یا شوک حرارتی ناشی از گرم و سرد شدن رادیاتور ایجاد شوی؛ بنابراین سبب شده مایع خنک کاری نشت کرده و گردش آن به درستی انجام نشده و سیستم خنک کاری موتور به خوبی عمل نکند.
- اتصال شل بین پره ها و لوله های رادیاتور ممکن است به دلیل خوردگی یا ایراد در فرآیند تولید که منجر به لحیم ضعیف و اتصالات شل بین پره ها و لوله های رادیاتور می شود، به وجود آید و سبب می شود انتقال حرارت بین پره ها و لوله ها به درستی صورت نپذیرد.
- معیوب بودن درب رادیاتور سبب کاهش یا پایین آمدن نقطه جوش مایع خنک کاری می شود.
- وجود هر یک از عیوب یاد شده در رادیاتور سبب اختلال در سیستم خنک کاری گشته و دمای موتور بالا می رود، و امکان دارد صدمات بسیاری به موتور وارد شود. در هر حال عدم تشخیص به موقع آن نیز سبب از کار افتادگی موتور می شود؛ بنابراین پایش وضعیت رادیاتور و تشخیص عیوب آن برای نگهداری و کارایی در شرایط مطلوب موتور بسیار مهم و ضروری است.
- عیوبی مانند گرفتگی لوله های آب رادیاتور در نقاط مختلف، گرفتگی شبکه های هوا در نواحی مختلف، نشی، اتصال شل بین پره ها و لوله های معیوب بودن درب رادیاتور در نوع مسی- برنجی نصب شده در بستر آزمایشگاهی ایجاد شد.

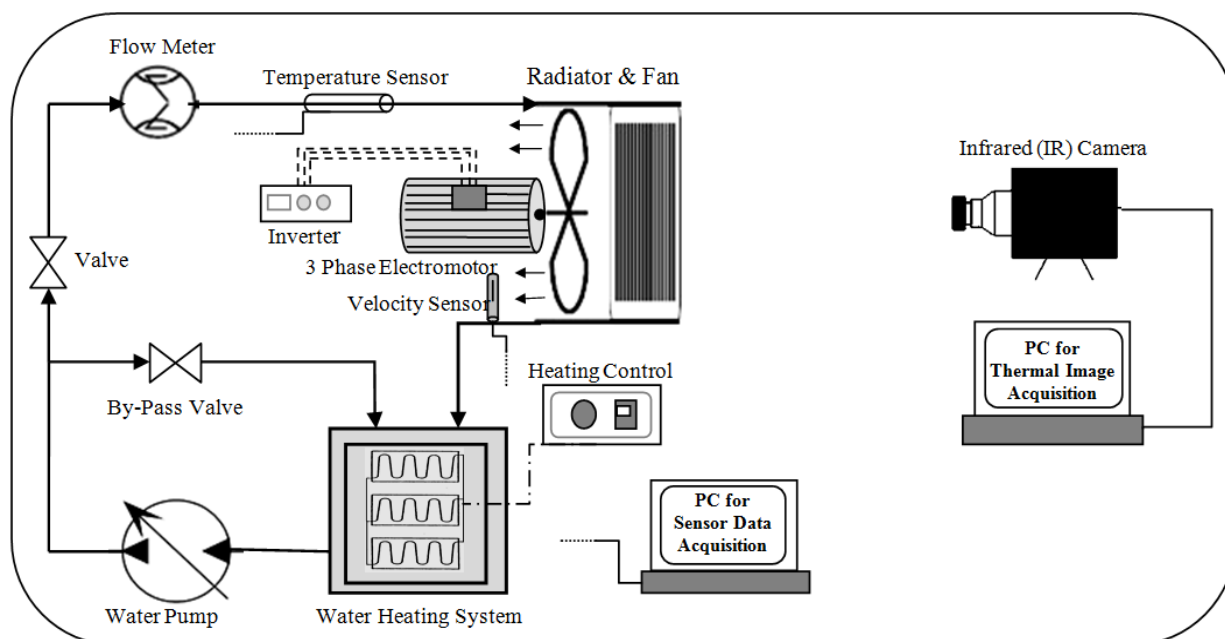


Fig. 1 A schematic diagram of experimental setup for thermographic fault diagnosis of cooling radiator

شکل 1 طرحواره بستر آزمایشگاهی و سامانه گرمانگاری پایش وضعیت رادیاتور

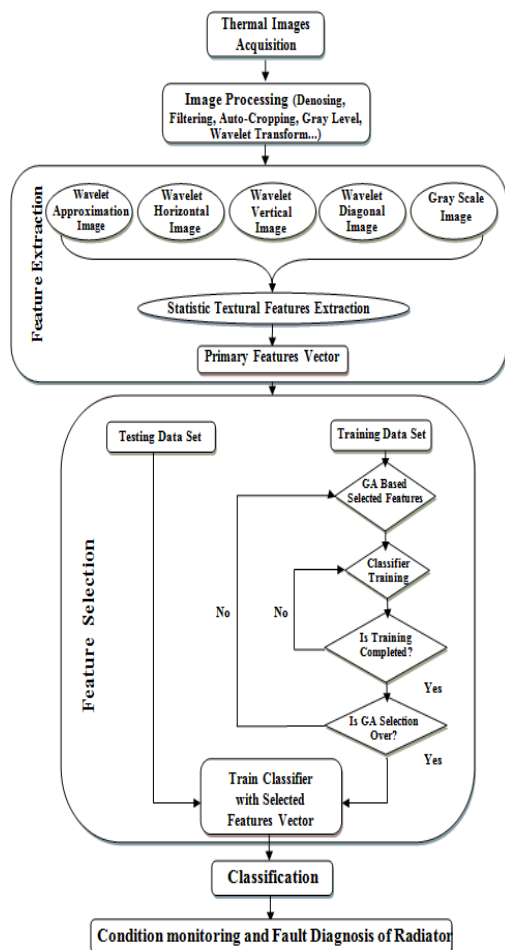


Fig. 2 Proposed framework for intelligent fault diagnosis and condition monitoring of cooling radiator [19]

شکل 2 مراحل مختلف نرم‌افزاری سامانه هوشمند تشخیص عیوب رادیاتور

میانگین پیکسل، انحراف معیار، همواری، چولگی، یکنواختی و آنتروپی را ارائه می‌دهد. این اطلاعات می‌تواند برای تشخیص ناحیه‌های مورد نظر در یک تصویر استفاده شود [21]. کمی‌کردن محتوای بافت یک روش مهم برای توصیف تصاویر است. از روش‌های آماری و طیفی برای توصیف بافت ناحیه استفاده می‌شود. استفاده از گشتاورهای آماری مربوط به هیستوگرام شدت تصویر از ساده‌ترین روش‌ها برای توصیف بافت است، همچنین روش‌های طیفی مبتنی بر خواص طیف فوریه است و برای توصیف جهت‌دار بودن الگوهای دو بعدی متناوب یا تقریباً متناوب در تصاویر مناسب است [22]. در این مطالعه ویژگی‌های آماری بافت تصویر از سطح خاکستری تصاویر گرمایی و تصاویر تقریب تبدیل موجک، تصاویر جزئیات عمودی، افقی و مورب تبدیل موجک با استفاده از معادلات و روابط ریاضی جدول 2 استخراج شد. ویژگی‌های هیستوگرامی به‌عنوان پایه‌ای‌ترین روش استخراج ویژگی تحلیل بافت تصویر محسوب می‌شوند که براساس احتمال وقوع مقادیر شدت پیکسل در تصاویر عمل می‌کنند. نخست هیستوگرام شدت تصاویر گرمایی (مقیاس خاکستری) پس از انجام عملیات پیش‌پردازش استخراج شد. سپس هیستوگرام‌های شدت به‌دست‌آمده با استفاده از رابطه (1) نرمال شد.

$$P(Z_i) = \frac{H(Z_i)}{N} \quad (1)$$

در آن Z متغیر تصادفی نشان‌دهنده شدت، $H(Z_i)$ هیستوگرام متناظر

جدول 1 جزئیات تجهیزات مورد استفاده در سامانه عیب یابی رادیاتور

Table 1 Details of fault diagnosis and condition monitoring of cooling radiator experimental setup

دوربین گرمابنگاری (ULIRvisionTI160)	تفکیک پذیری: 160.120 پیکسل، توانایی دریافت گستره طیفی: 8-14 μm .
رادیاتور	حساسیت گرمایی: 0.065 K (65 mK) در دمای 30 $^{\circ}\text{C}$ تفکیک پذیری طیفی (میدان دید): 3.2 mrad
فن (پروانه)	رادیاتور شرکت U.T.B مورد استفاده در موتورهای دیزل جنس رادیاتور: مسی - برنجی نوع شبکه: لوله - پره‌ای از نوع مکشی همراه یک الکترو موتور سه فاز به‌عنوان منبع تأمین توان چرخشی پروانه
پمپ آب	پمپ سانتریفیوژ
سامانه گرمایش آب	یک مخزن تحت فشار به ابعاد 50.40.40 سانتی‌متر مکعب از جنس ورق گالوانیزه نه عدد المنت حرارتی 1000 واتی
دبی سنج	دبی سنج مخروطی (روتامتر) با دقت 2 لیتر بر دقیقه
حسگر سرعت هوا	سرعت سنج سیم داغ با دقت $\pm 2\%$
حسگر دما	ترموکوپل با دقت $\pm 1\%$

از حالت‌های مختلف سالم و معیوب رادیاتور نصب‌شده بر سامانه پایش وضعیت حرارتی برای پایش وضعیت و تشخیص عیوب مختلف در سه دمای مختلف ورودی آب به رادیاتور (70، 80 و 90 درجه سلسیوس)، دو سطح سرعت جریان هوای 2 و 3 متر بر ثانیه، سه سطح جریان 40، 55 و 70 لیتر بر دقیقه و سه سطح تکرار آزمایشات انجام شد، و از آن‌ها تصاویر گرمایی توسط دوربین فروسرخ تهیه شدند. پیش از تصویربرداری فروسرخ، برای هر تیمار آزمایش مربوطه تعیین و پارامترهای کنترلی، دمای مایع خنک‌کاری، دبی جریان سیال، سرعت هوای عبوری تنظیم‌شده و عملیات تصویر برداری فروسرخ، پس از پایدار شدن شرایط کنترلی انجام گردید. جزئیات کامل در رساله طاهری گراوند (1394) است [19].

2-3- پردازش تصاویر و استخراج ویژگی

تصاویر گرفته‌شده برای شرایط مختلف رادیاتور در هر تیمار مورد پردازش قرار گرفت. برای این کار از کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب 2013 استفاده شد. مراحل پردازش تصاویر گرمایی، استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی، طبقه‌بندی و نهایت تشخیص عیوب رادیاتور به صورت اختصار در شکل 2 نشان داده شده است.

در این مطالعه پیش‌پردازش تصاویر گرمایی شامل بخش‌بندی تصاویر گرمایی، تغییر شکل و اندازه تصاویر گرمایی و فیلتر کردن آن‌ها جهت حذف اغتشاش‌های احتمالی انجام گرفت. اهداف کلی این عملیات را می‌توان ارتقاء تصویر و حذف داده‌های غیر ضروری از تصویر دانست. با انجام عملیات پیش‌پردازش مناسب تصویر، دقت تشخیص و کارایی طبقه‌بندی افزایش می‌یابد [20]. در بخش‌بندی تصاویر گرمایی، با کدنویسی انجام شده به صورت خودکار تصویر گرمایی رادیاتور از قسمت پس‌زمینه برش داده شده و به‌عنوان تصویر ورودی جهت تغییر شکل در نظر گرفته شد. سطوح خاکستری در عملیات تغییر شکل از تصاویر برش خورده استخراج شد. در پایان این بخش تمام سطوح مختلف تصاویر گرمایی فیلتر شده تا اغتشاش‌های احتمالی در تصاویر حذف یا کاهش یابند. استخراج ویژگی در فناوری گرمابنگاری، اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های آماری مرتبه اول تصویر مانند مقدار

جدول 2 ویژگی‌های آماری استخراج شده از تصاویر گرمایی رادیاتور

Table 2 statistical features extracted from thermal images of radiator

ویژگی	توضیح	فرمول*
میانگین سطح خاکستری	برای اندازه‌گیری میانگین شدت بافت تصویر، اطلاعاتی درباره شدت روشنایی کلی تصویر ارائه می‌دهد.	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i P(z_i)$
انحراف معیار	اندازه‌گیری انحراف معیار شدت بافت و یا میانگین کنتراست تصویر است که تغییرات شدت در اطراف میانگین تصویر را بررسی می‌کند.	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 P(z_i)}$
همواری	همواری نسبی نواحی را بیان می‌کند. مقدار همواری برای نواحی با سطوح شدت ثابت، صفر و برای ناحیه‌های با سطوح شدت، متغیر یک است.	$R = 1 - 1/(1 + \sigma^2)$
چولگی (ممان سوم)	معیاری از ارب بودن هیستوگرام است و به عبارت دیگر میزان تقارن یک هیستوگرام را نشان می‌دهد. این مقدار برای هیستوگرام‌های متقارن صفر، برای هیستوگرام‌های متمایل به راست منفی و در مورد هیستوگرام‌های متمایل به چپ مثبت است.	$S = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 P(z_i)$
یکنواختی (انرژی)	بیانگر میزان یکنواختی توزیع سطح خاکستری یک تصویر است. بیشترین مقدار آن زمانی است که همه مقادیر شدت تصویر با هم برابر باشند (بیشینه یکنواختی).	$U = \sum_{i=0}^{L-1} P^2(z_i)$
آنتروپی	معیاری برای اندازه‌گیری میزان تصادفی بودن مقادیر شدت است. معیاری از ناهمگنی و بیانگر میزان تغییرات شدت در یک تصویر است.	$E = - \sum_{i=0}^{L-1} P(z_i) \log_2 P(z_i)$

تصویر، N تعداد کل درایه‌های موجود در ماتریس تصویر مقیاس خاکستری و $P(z_i)$ هیستوگرام نرمال شده تصویر مقیاس خاکستری است. تبدیل موجک یکی از پرکاربردترین تبدیلات ریاضی در حوزه پردازش

سیگنال و تصویر است. این تبدیل با توجه به ماهیت تحلیل چند دقتی جای خود را در بسیاری از کاربردهای پردازشی باز کرده و گاهی به‌عنوان توانمندترین رخ می‌نماید. نظریه چند دقتی برای نمایش و تحلیل سیگنال‌ها (یا تصاویر) در بیش از یک دقت به‌کار می‌رود. در چنین روشی بدیهی است ویژگی‌هایی که ممکن است در یک دقت تشخیص داده نشوند ممکن است به آسانی در دقت دیگر تشخیص داده شوند [22]. تحلیل موجک یک ابزار پردازش جهت توصیف بافت تصویر در وضوح پذیری‌های مختلف است.

برای تحلیل تصاویر گرمایی مربوط به شرایط مختلف رادیاتور سیستم خنک‌کاری، ابتدا ضرایب تبدیل گسسته دو بعدی موجک محاسبه شد. تجزیه موجک در یک سطح و با استفاده از تابع موجک هار انجام گردید. برای هر تصویر گرمایی مقیاس خاکستری از شرایط مختلف رادیاتور چهار تصویر، تصویر تقریب، تصویر جزئیات افقی، تصویر جزئیات عمودی و تصویر جزئیات قطری به‌دست می‌آید. از هر یک از تصاویر زیر باند به‌دست‌آمده شش ویژگی آماری شامل میانگین، انحراف معیار، همواری، چولگی، انرژی و آنتروپی استخراج شد؛ بنابراین 24 ویژگی (6 ویژگی آماری $\times$ 4 ضریب موجک) از تبدیل موجک گسسته هر تصویر گرمایی استخراج، و در نتیجه در مجموع 30 ویژگی (24 ویژگی مستخرج از تبدیل موجک + 6 ویژگی آماری تصویر مقیاس خاکستری) از هر تصویر گرمایی رادیاتور استخراج شد.

2-4- انتخاب ویژگی

انتخاب ویژگی نقش مهمی را در برخی از وظایف یادگیری ماشین، تشخیص الگو و طبقه‌بندی دارد [23]. بسیاری از ویژگی‌ها معمولاً با یک الگوریتم یادگیری برای تولید خصوصیات کامل عمل طبقه‌بندی تهیه می‌شوند. بسیاری از ویژگی‌ها در اغلب موارد برای عمل یادگیری نامربوط و زائد است، و کارایی به‌کارگیری الگوریتم یادگیری را نامناسب خواهند کرد. ممکن است دقت یادگیری (طبقه‌بندی) و سرعت آموزش به میزان قابل توجهی با این ویژگی‌های زائد نامناسب‌تر شود [24، 25]. هدف اصلی انتخاب ویژگی، ارزیابی کیفیت ویژگی‌های کاندید و تعیین زیرمجموعه ویژگی با حداقل ابعاد از دامنه مسئله با حفظ دقت بالا بطور مناسب در ارائه ویژگی‌های اصلی است [26]. مسئله انتخاب ویژگی می‌تواند به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی فرموله‌سازی شده باشد. پس از تکمیل فرآیند استخراج ویژگی از تصاویر گرمایی شرایط مختلف رادیاتور اندازه ماتریس داده‌های ورودی برابر با 1620.30 (1620 تصویر گرمایی، 30 ویژگی) است؛ بنابراین به منظور کاهش ابعاد ویژگی‌ها، کمتر شدن حجم محاسبات، دقت بالاتر یادگیری طبقه‌بندی، در این تحقیق از ترکیب تکنیک الگوریتم ژنتیک و طبقه‌بند شبکه عصبی فازی تطبیقی (انفیس) جهت عملیات انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی‌ها استفاده شد. شکل 3 پیاده‌سازی شده سامانه پیشنهادی جهت انتخاب ویژگی را نشان می‌دهد.

وظیفه الگوریتم ژنتیک در مسئله انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر گرمایی رادیاتور است که بردار ویژگی‌ها را براساس میزان قدرتشان در تعیین دقت سامانه طبقه‌بند مورد بررسی قرار می‌دهد. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب بهترین زیرمجموعه (بردار ویژگی) از بین مجموعه ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر گرمایی رادیاتور، در ابتدا باید ساختار مناسب برای آن تعریف شود. اجزای این ساختار عبارتند از: نمایش کروموزوم، تابع برازندگی، و عملگرهای ترکیب، جهش و انتخاب.

فرآیند انتخاب بردار ویژگی توسط الگوریتم ژنتیک بدین صورت است که در ابتدا جمعیتی از کروموزم‌ها به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و اعضای این

در این تحقیق اندازه جمعیت اولیه برابر با 30 کروموزوم در نظر گرفته شد. اندازه جمعیت معرف تعداد کروموزوم‌های موجود در جمعیت یا یک نسل است. اگر تعداد کروموزوم‌ها بسیار کم باشد، امکان شکل‌گیری عملیات جا به‌جایی به وسیله الگوریتم ژنتیک کم خواهد بود و تنها قسمت کمی از فضای جستجو مورد کاوش قرار خواهد گرفت. از سوی دیگر اگر تعداد کروموزوم‌ها بسیار زیاد باشد، سرعت الگوریتم بسیار کند خواهد شد. جمعیت براساس تحقیقات پیشین با اندازه مناسب حدود 20 تا 30 کروموزوم دارند [19].

(ب) تابع هدف (برازندگی)

یکی از مراحل الگوریتم ژنتیک ارزیابی پاسخ‌های به‌دست‌آمده در هر مرحله است. تابع هدف شاخصی از نحوه عملکرد پاسخ‌های به‌دست‌آمده در فضای مساله است؛ بنابراین انتخاب تابع برازندگی مناسب از مهم‌ترین مراحل در پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک است. هر اندازه یک پاسخ مناسب‌تر باشد، مقدار تابع هزینه کمتری خواهد بود. با توجه به هدف این تحقیق که طبقه‌بندی عیوب مختلف رادیاتور است؛ بنابراین تابع برازندگی در این پژوهش خروجی طبقه‌بند است. رابطه (2) تابع هزینه الگوریتم بهینه‌ساز است.

$$CF = 1 - CR \quad (2)$$

در آن CF تابع هزینه (برازندگی) و CR دقت کلی طبقه‌بند مورد نظر است. دقت طبقه‌بندی در بخش طبقه‌بندی تصاویر گرمایی توضیح داده خواهد شد.

(پ) عملگرها

عملگر انتخاب: در این تحقیق از عملگر چرخ رولت به‌عنوان عملگر انتخاب استفاده شده است.

عملگر ترکیب: در این تحقیق عملگر ترکیب دو نقطه ای برای تولید فرزندان جدید با احتمال 80% به کار رفته است.

عملگر جهش: در این پژوهش عملگر جهش یکنواخت با احتمال 5% به کار رفته است.

2-5- طبقه‌بندی تصاویر گرمایی

سامانه استنتاج فازی براساس قواعد اگر و آن‌گاه بنا نهاده شده است، به گونه‌ای که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین تعدادی متغیر ورودی و خروجی را به دست آورد. مراحل مدل‌سازی فازی عبارت است از: تعیین توابع عضویت، تعیین سامانه استنتاج براساس داده‌ها، نوشتن قواعد استنتاج، ترکیب آن‌ها، به‌دست‌آوردن نتیجه و در صورت نیاز غیرفازی‌سازی. تشخیص تابع عضویت سامانه در منطق فازی گاهی دشوار است. از سویی شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت یادگیری بالایی دارند و می‌توانند با استفاده از داده‌های مشاهده شده، پارامترهای شبکه به نحوی تعیین کنند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود، همچنین شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت استفاده از دانش بشری را ندارد و نمی‌تواند مانند سامانه‌های فازی با استفاده از عبارات کلامی استنتاج کند؛ بنابراین برای دست‌یابی به قابلیت یادگیری بهتر، دقت تقریب بیشتر و ساختار ساده‌تر، با الهام از مفاهیم استنتاج فازی و قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه عصبی-فازی تطبیقی (انفیس) پیشنهاد شد [27]. در واقع پیشمهاد استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شبکه‌ای است که پارامترهای سامانه فازی را طوری تغییر دهد که در نهایت این پارامترها بهترین تطبیق را با داده‌های آموزش داشته باشند. سامانه عصبی-فازی از یادگیری شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. این مدل یک سامانه فازی سوگنو را در یک ساختار عصبی اجرا می‌کند و توابع عضویت از طریق

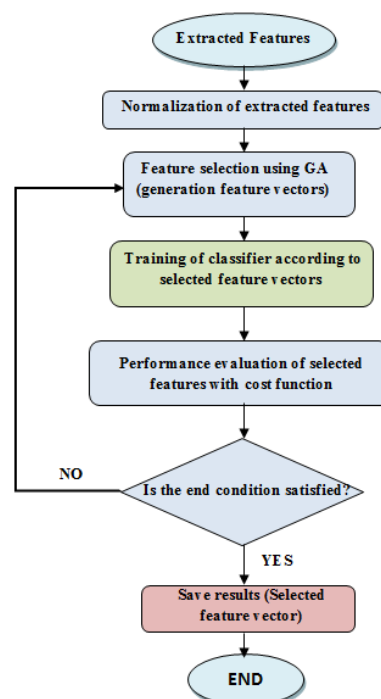


Fig. 3 Flowchart of feature selection process

شکل 3 مراحل اجرای فرآیند انتخاب ویژگی

جمعیت با استفاده از تابع هزینه (برازندگی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از این مرحله با استفاده از روش انتخابی چرخ رولت و عملگرهای ژنتیکی، والدینی انتخاب و فرزندان جدیدی تولید می‌شوند. فرزندان به‌ثمر نشسته دوباره مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و به همراه جمعیت کنونی در استخر انتخاب برای نسل بعدی قرار می‌گیرند. تعدادی کروموزوم از بهترین اعضا جمعیت (نخبه‌ها) این استخر مستقیم به نسل بعد منتقل می‌شوند و مابقی اعضای نسل بعد با استفاده از چرخ رولت گزینش می‌گردند. همین منوال تا زمانی که شرط خاتمه‌ای حاصل شود ادامه می‌یابد. الگوریتم تا هنگام برقراری یکی از سه شرط زیر متوقف می‌شود.

شرط نخست: اگر دسته‌ای از پارامترهای ایده‌آل با تابع هدف (تابع برازندگی) کوچک‌تر از یک آستانه قابل قبول حاصل شود، در آن صورت فرآیند خاتمه می‌یابد. در این پژوهش حد آستانه قابل پذیرش 0.001 تعیین شد.

* در روابط بالا m میانگین، L تعداد سطوح شدت ممکن، σ انحراف معیار، R همواری، S چولگی، U یکنواختی و E آنتروپی است.

شرط دوم: اگر بهترین مقدار برازش جمعیت جهت بهبود آن‌ها در پنج نسل متوالی از دست برود، آن‌گاه فرآیند پایان می‌یابد.

شرط سوم: اگر تعداد تولید نسل بیشتر از 100 باشد، آن‌گاه فرآیند متوقف می‌شود [19].

(الف) نحوه نمایش کروموزوم‌ها

کروموزوم‌ها در مسئله انتخاب ویژگی به صورت بردار دودویی ژن‌ها انتخاب شده است. هر ژن نشان‌دهنده یک ویژگی از ویژگی‌های استخراج‌شده از تصاویر گرمایی است، در واقع مجموعه همه این ژن‌ها نشان‌دهنده راه حل مسئله و یا همان کروموزوم مربوطه است. طول کروموزوم نیز برابر با تعداد کل ویژگی‌ها (30 ویژگی) است. زمانی که ژن نام برابر یک باشد، نشان‌دهنده انتخاب ویژگی نام و هرگاه که ژن نام برابر با صفر باشد، نشانه انتخاب ویژگی نام است.

(مقادیر a, b, c, d, p, q, r) در هر مرحله تغییر کنند و در نهایت مقادیری بهترین این پارامترها پیدا شوند.

از آنجایی که ANFIS با استنتاج فازی روی یک هدف نهایی عمل می‌کند، تعداد توابع عضویت برای هر ورودی و مقدار پارامترهای بخش مقدم و تالی در تمام قوانین فازی باید متناسب انتخاب شود. در سامانه استنتاج فازی-عصبی مقادیر اولیه پارامترهای بخش مقدم باید توسط دانش فرد خبره تنظیم شود. چنانچه مانند این پژوهش از این دانش بی‌بهره باشیم، این مقادیر اولیه با کمک روابط جدول 3 قابل تنظیم است [19].

طبقه‌بندی تصاویر گرمایی از شرایط مختلف رادیاتور سیستم خنک کاری به شش کلاس (گرفتگی لوله‌ها و شبکه‌ها، نشتی مایع خنک‌کاری، خرابی درب، اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور و کلاس سالم) مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مشخص بودن وضعیت‌های مختلف معیوب و سالم بودن رادیاتور می‌توان عملکرد سامانه گرم‌نگاری تشخیص عیوب به همراه مدل‌های طبقه‌بند را ارزیابی کرد. برای ارزیابی روش‌های ارائه شده از شاخص‌های آماری مستخرج از ماتریس اغتشاش استفاده شد. ماتریس اغتشاش حاوی اطلاعات (کلاس‌های) مطلوب یا واقعی و اطلاعات تخمین‌زده توسط طبقه‌بند است. شکل 5 ماتریس اغتشاش برای یک طبقه‌بندی شش کلاسه را نشان می‌دهد که ستون‌ها نشان‌دهنده کلاس‌های مطلوب داده و ردیف‌ها کلاس‌های تخمین‌زده داده‌ها توسط طبقه‌بند است.

عضو n_{ij} بر تصاویری که توسط طبقه‌بند (C_i^*) در کلاس i طبقه‌بندی شده در حالی که در طبقه‌بندی واقعی (C_j) به کلاس j تعلق دارد، دلالت می‌کند؛ بنابراین اعضای قطری اصلی ماتریس $(i=j)$ نمونه‌هایی هستند که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند، و نمونه‌های غیر از قطری $(i \neq j)$ توسط طبقه‌بند به درستی طبقه‌بندی نشده‌اند. برای هر تخمین طبقه‌بند 4 حالت وجود دارد: تصمیمات مثبت صحیح (TP) نمونه‌هایی هستند که به درستی توسط طبقه‌بند (C_i^*) در کلاس نام طبقه‌بندی شده است. تصمیمات مثبت ناصحیح (FP) نمونه‌هایی که به اشتباه توسط طبقه‌بند (C_i^*) به کلاس نام تعلق گرفته است. تصمیمات منفی صحیح (TN) نمونه‌هایی به درستی توسط طبقه‌بند (C_i^*) در کلاس نام طبقه‌بندی نشده، و تصمیمات منفی ناصحیح (FN)

جدول 3 مقادیر اولیه پارامترهای بخش مقدم سامانه استنتاج فازی-عصبی

پارامتر	مقدار (رابطه)
a	$\Delta x / 2(n_{mf} - 1)$
b	2
c	$x_{\min} + (i_{mf} - 1) \cdot \Delta x / (n_{mf} - 1)$

	C_1	...	C_6
C_1^*	n_{11}	...	n_{16}
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
C_6^*	n_{61}	...	n_{66}

Fig. 5 Confusion matrix for classification of six classes

شکل 5 ماتریس اغتشاش برای طبقه‌بندی 6 کلاسه

الگوریتم پس انتشار یا کمینه مربعات تنظیم می‌شود. در انفیس قوانین ثابت است و عامل‌های توابع عضویت بهینه‌سازی می‌شود. شکل 4 ساختار سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی متشکل از 5 لایه را نشان می‌دهد.

لایه اول: این لایه میزان عضویت هر یک از ورودی‌های عددی را نسبت به مجموعه‌های فازی مختلف بیان می‌کند. در واقع محاسبه درجه عضویت با توجه به عضویت تعریف‌شده برای مقادیر کلامی انجام می‌شود.

خروجی لایه اول به صورت روابط (4,3) محاسبه می‌شود.

$$o_i = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (3)$$

$$o_i = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i = 3, 4 \quad (4)$$

در آن $\mu_{A_i}(x)$ و $\mu_{B_i}(y)$ توابع عضویت برای هر کدام از مجموعه‌های فازی A و B هستند. برای نمونه با انتخاب تابع زنگوله‌ای رابطه (5) را به صورت زیر داریم.

$$\mu_{\text{genbell}}(x, a, b, c) = \{1 + |(x - c)/a|^{2b}\}^{-1} \quad (5)$$

پارامترهای a, b و c را به دلیل بودن در بخش مقدم قاعده فازی پارامترهای مقدم می‌گویند.

لایه دوم: در این لایه عملگرهای AND و OR برای به‌دست‌آوردن خروجی به کار می‌روند. در واقع در این لایه قدرت آتش هر قانون فازی محاسبه می‌شود. براساس رابطه (6) خروجی این لایه از ضرب نتایج لایه اول به‌دست می‌آید.

$$o_i = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

لایه سوم: در این لایه نرمالیزه کردن قدرت آتش با استفاده از مجموع قواعد قدرت آتش انجام می‌شود. در واقع در این لایه طبق رابطه (7) نسبت به هر یک از خروجی‌های لایه پیش به کل خروجی‌های همان قاعده تقسیم می‌شود.

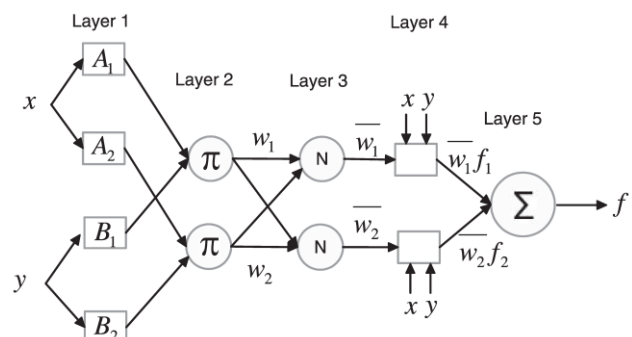
$$o_i = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (7)$$

لایه چهارم: در این لایه مشارکت هر قاعده برای محاسبه خروجی مدل محاسبه می‌شود. یعنی براساس رابطه (8) محاسبه خروجی نامین قانون فازی با استفاده از ضرب قدرت آتش نرمالیزه شده در تابع تالی.

$$o_i = \bar{w}_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (8)$$

به پارامترهای p_i, q_i و r_i به دلیل حضور در بخش تالی قوانین فازی پارامترهای تالی گفته می‌شود.

حال شبکه عصبی باید طوری آموزش داده شود که پارامترهای مقدم و تالی



Rule 1: If $(x \text{ is } A_1)$ and $(y \text{ is } B_1)$, then $(f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1)$

Rule 2: If $(x \text{ is } A_2)$ and $(y \text{ is } B_2)$, then $(f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2)$

Fig. 4 Architecture of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) [27]

شکل 4 ساختار سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس)

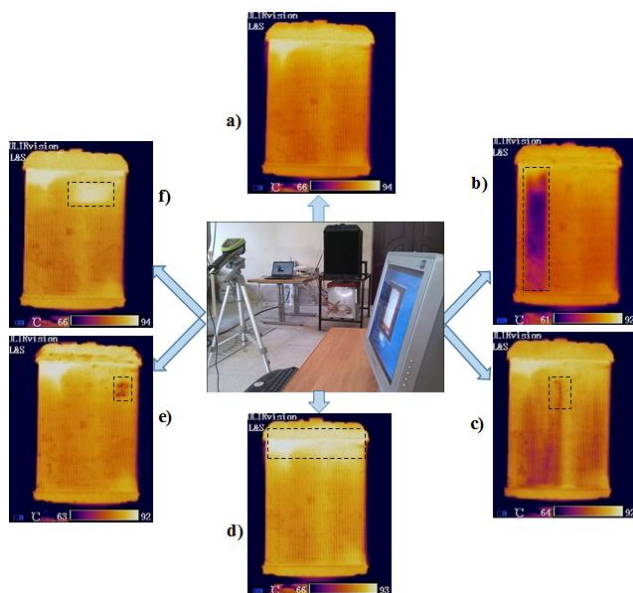


Fig. 6 Sample of the acquired infrared thermal images of the six condition of radiator, a: normal radiator, b- radiator tubes blockage, c- coolant leakage, d- radiator door failure, e- loose connections between fins and tubes and f: radiator fins blockage

شکل 6 نمونه تصاویر گرمایی از شش وضعیت مختلف رادیاتور

آن قسمت است. در نتیجه اختلاف بین تصاویر رادیاتور سالم و رادیاتور با لوله‌های گرفته در تصاویر گرمایی به آسانی مشهود است. گرفتگی لوله‌های رادیاتور سبب می‌شود قسمتی از رادیاتور در عملیات انتقال حرارت شرکت نکند و در نتیجه راندمان انتقال حرارت رادیاتور کم شود، چرا که دبی جریان کمتری از سیال خنک‌کننده از داخل رادیاتور عبور کرده است، به عبارت دیگر از تمام ظرفیت رادیاتور استفاده نمی‌شود. در نتیجه امکان دارد این نوع عیب عملکرد سیستم خنک‌کاری موتور را ضعیف کند و دمای موتور بالا رود، که امکان دارد منجر به آسیب دیدگی و یا از کار افتادگی موتور شود [32,31].

زمانی که در اثر ضربه، خوردگی، فرسودگی و یا هر عاملی دیگر در رادیاتور روزنه‌ای ایجاد می‌شود و مایع خنک‌کاری از این روزنه در رادیاتور نشت می‌کند که سبب از دست رفتن مایع خنک‌کاری و افت فشار شده، گردش سیال خنک‌کاری در سیستم خنک‌کاری مختل شود. وقتی رادیاتور در یک نقطه خاص نشتی داشته باشد به دلیل نشت مایع خنک‌کاری در آن محل با توجه به این‌که ضربه انتقال حرارت مایع خنک‌کاری از هوا بیشتراست. در آن بخش تصاویر گرمایی تیره‌تر (شکل 6-c) است.

همچنان که در تصاویر گرمایی مزبور مشاهده می‌شود در شکل 6-d که در آن از درب رادیاتور معیوب استفاده شده، نسبت به رادیاتور سالم (شکل 6-a) قسمت فوقانی آن روشن‌تر (گرم‌تر) است. درب رادیاتور تا حدی افزایش فشار ایجاد کرده که می‌تواند از تشکیل بخار آب جلوگیری کند، اما در حالت درب معیوب این اتفاق نمی‌افتد و سبب بالا رفتن دمای رادیاتور می‌شود.

اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور ممکن است بر اثر خوردگی، فرسودگی و یا نقص در عملیات لحیم‌کاری به وجود آید [31]. وقتی اتصال بین لوله‌ها و پره‌ها شل باشد در آن نواحی پره‌ها نقشی در انتقال حرارت خنک‌کردن مایع خنک‌کاری ندارند. در واقع سطح مؤثر در انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با مشاهده تصاویر گرمایی رادیاتور در این وضعیت (شکل 6-e) نواحی معیوب با رنگ تیره‌تر نمایش داده شده، زیرا در آن نواحی پره‌ها

نمونه‌هایی که به اشتباه توسط طبقه‌بند (C^*) به کلاس iam نگرفته و $n_{TN} = n - n_{TP} - n_{FN}$ و $n_{FN} = n_{+j} - n_{i,i}$ ، $n_{FP} = n_{i,+} - n_{i,i}$ ، $n_{TP} = n_{i,i}$ است. $n_{FP} - n_{FN}$ مجموع تمام اعضای ستون‌ها مربوط به سطر iam و n_{+j} مجموع اعضای تمام سطرها مربوط به ستون iam در ماتریس اغتشاش است [28].

برای ارزیابی سامانه طبقه‌بند پیشنهادی از شاخص‌های آماری مانند دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به صورت روابط (9-12) استفاده شد [29,30].

$$Accuracy = \frac{n_{TP} + n_{TN}}{n_{TP} + n_{TN} + n_{FP} + n_{FN}} \quad (9)$$

$$Precision = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FP}} \quad (10)$$

$$Sensitivity = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FN}} \quad (11)$$

$$Specificity = \frac{n_{TN}}{n_{TN} + n_{FP}} \quad (12)$$

دقت طبقه‌بندی کلی: تعداد تصمیم‌های صحیح تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های ممکن.

صحت: تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های مثبت ممکن.

حساسیت: تعداد تصمیمات تصمیم‌های مثبت صحیح تقسیم بر جمع تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح و تصمیم‌های منفی نادرست.

اختصاصی بودن: تعداد تصمیم‌های منفی صحیح سیستم تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های منفی ممکن.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی تصاویر حرارتی شرایط مختلف رادیاتور

از شرایط مختلف مانند گرفتگی لوله‌ها و شبکه‌های رادیاتور، نشتی مایع خنک‌کاری، خرابی درب و اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور و سالم در تیمارهای مختلف دما، دبی جریان سیال و سرعت هوا در مجموع 180 تیمار (3 سطح دما $\times$ 3 سطح دبی جریان سیال خنک‌کاری $\times$ 2 سطح سرعت هوا $\times$ 10 وضعیت رادیاتور (انواع عیوب و موقعیت‌های مختلف عیوب) تصاویر گرمایی فرسوخ تهیه شد. شکل 6 تصاویر گرمایی تهیه‌شده توسط سامانه گرمانگاری فرسوخ از شرایط مختلف رادیاتور شامل: الف- رادیاتور سالم ب- ناشی از عیب گرفتگی لوله‌ها پ- حالت نشتی مایع خنک‌کاری در رادیاتور ت- خرابی درب رادیاتور ث- عیب اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور ج- تصویر گرمایی گرفتگی شبکه‌های رادیاتور را نشان می‌دهد. در ادامه عیوب مختلف و تصاویر گرمایی مربوطه آن‌ها بررسی می‌شود.

عیب گرفتگی لوله‌های رادیاتور معمولاً به دلیل جرم موجود در آب و یا کنده شدن چسب‌های آب‌بندی که در سیستم استفاده شده ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر بخشی از آن به دلیل استفاده زیاد از چسب آب‌بندی وارد سیستم خنک‌کاری رادیاتور شده و گرفتگی لوله‌ها را موجب می‌شود. همان‌طور که در شکل 6-b مشاهده می‌شود در اثر گرفتگی و انسداد لوله‌های رادیاتور جریان سیال خنک‌کننده در این لوله‌ها قطع شده و عملاً این لوله‌ها از مدار خنک‌کاری خارج شده؛ بنابراین این لوله‌های مسدود شده خنک‌تر از سایر نقاط است.

در تصاویر گرمایی میزان روشنایی تصویر نشان‌دهنده میزان حرارت است؛ بنابراین در مقایسه با تصویر گرمایی از رادیاتور سالم (شکل 6-a)، یک نوار با شدت رنگ تیره وجود دارد که این قسمت ناشی از گرفتگی لوله‌های

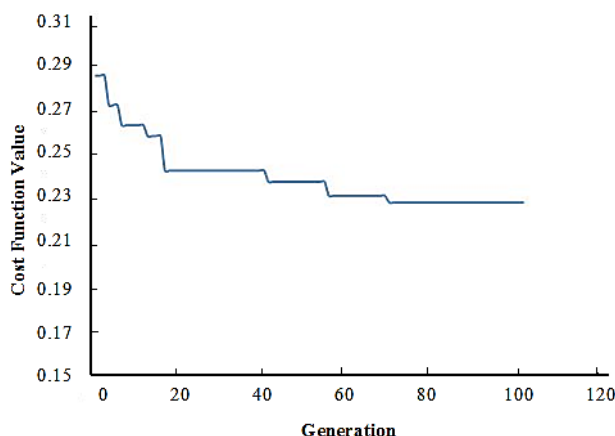


Fig. 7 Convergence performance of Genetic Algorithm for cost function values

شکل 7 منحنی عملکرد همگرایی الگوریتم ژنتیک برای مقادیر تابع هزینه

بهترین عملکرد این طبقه‌بند برای کل بردار ویژگی‌های مستخرج از تصاویر گرمایی به‌عنوان ورودی طبقه‌بند در طی 50 بار اجرای آن ذخیره شد و بر این اساس ماتریس اغتشاش نشان داده‌شده در جدول 5 تشکیل شد. مقادیر مربوط به شاخص‌های آماری برای تمام کلاس‌های عیوب مختلف رادیاتور پس از تشکیل ماتریس اغتشاش محاسبه و بر این اساس جدول 6 نیز تشکیل شد. عملکرد این طبقه‌بند براساس جدول 6 برای تمامی کلاس‌ها تقریباً یکسان و مقادیر میانگین به ازای هر کلاس دقت طبقه‌بندی، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به ترتیب برابر 96.6، 88.2، 90.48 و 98.02 است. دقت کلی طبقه‌بند انفیسی با ورودی کل ویژگی‌های مستخرج برابر با 89.81 است. در طبقه‌بند انفیسی ابعاد ماتریس ورودی بسیار حائز اهمیت است. با بعد زیاد ماتریس تعداد این قواعد به دلیل استوار این روش بر پایه قواعد اگر-آن‌گاه فازی زیاد می‌شود، سامانه پیچیده شده و زمان زیادی برای تصمیم‌گیری صرف می‌شود؛ بنابراین انتخاب ویژگی و کاهش بعد در این روش بسیار مهم است. جداول 7، 8 به ترتیب ماتریس اغتشاش به‌دست‌آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه‌بند انفیسی با استفاده از ویژگی‌های انتخاب‌شده توسط ترکیب الگوریتم ژنتیک و مقادیر مربوط به شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای تمام کلاس‌های شرایط رادیاتور را نشان می‌دهند. با توجه به جدول 8 مقادیر میانگین به ازای هر کلاس دقت طبقه‌بندی، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به ترتیب برابر 98.03، 92.88، 93.93 و 98.85 است. دقت کلی طبقه‌بندی انفیسی در مدل با ورودی بردار ویژگی‌های منتخب (ترکیب الگوریتم ژنتیک و انفیسی) برابر با 94.11٪ است. این دقت در مقایسه با طبقه‌بند انفیسی بدون انتخاب ویژگی عملکرد بهتر و همچنین زمان پاسخ به مراتب کمتری داشت (در این حالت زمان پاسخ نصف زمان پاسخ در حالت طبقه‌بندی انفیسی بدون انتخاب ویژگی است). دقت کلی طبقه‌بندی در این تحقیق نسبت به پژوهش پیشین که از شبکه‌های عصبی مصنوعی (با دقت کلی طبقه‌بندی 93.83) استفاده شده افزایش یافته است.

4- نتیجه‌گیری

رادیاتور یکی از اجزای کلیدی سیستم خنک‌کاری موتور است که نقش به سزایی در تأمین دمای مطلوب موتور در شرایط کاری مختلف را دارد. با توجه به اهمیت سیستم خنک‌کاری در بهبود عملکرد و بازدهی بهتر، عمر قطعات و

اتصال خوبی با لوله‌های حامل جریان سیال گرم ندارند و خنک‌تر است. از دیگر عیوب متداول رادیاتور گرفتگی شبکه‌های رادیاتور است. زمانی گرفتگی بخشی از شبکه‌های رادیاتور سبب می‌شود جریان هوا در این قسمت قطع یا کاهش یابد که این امر موجب کندی عملیات انتقال حرارت از سیال و فلز به هوا می‌شود. در جریان انتقال حرارت از سطح تماس کمتری استفاده می‌شود و دما در نواحی مسدودی شبکه‌های هوا بیش از سایر قسمت‌های هم‌موقعیت است. براساس شکل (6-f) تصویر گرمایی در قسمت شبکه‌های مسدودشده روشن‌تر از همان ناحیه در تصویر رادیاتور سالم است. شدت نور بیشتر در تصاویر فرو سرخ نشان‌دهنده دمای بیشتر است. گرفتگی شبکه‌های رادیاتور سبب گرم‌شدن جریان عبور هوا در آن نواحی شده، در نتیجه انتقال حرارت در قسمتی از رادیاتور اجباری صورت نمی‌گیرد و امکان دارد این نوع عیب عملکرد سیستم خنک‌کاری موتور را ضعیف کرده و دمای موتور افزایش یابد، منجر به آسیب‌دیدگی و یا از کارافتادگی موتور شود.

3-2- انتخاب ویژگی

پس از مرحله استخراج ویژگی از تصاویر گرمایی شرایط مختلف رادیاتور اندازه ماتریس داده‌ها برای مرحله طبقه‌بندی برابر 1620.30 (1620 تصویر گرمایی، 30 ویژگی) است؛ بنابراین از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به کمک الگوریتم طبقه‌بند انفیسی عملیات انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی‌ها برای کاهش ابعاد ویژگی‌ها، کمترشدن حجم محاسبات، دقت بالاتر یادگیری طبقه‌بند استفاده شد. جدول 4 پانزده ویژگی را نشان می‌دهد. ویژگی‌های همواری و آنتروپی از میان ویژگی‌های آماری مستخرج از تصاویر گرمایی و تصاویر زیرباند تبدیل موجک بیشترین فراوانی، همچنین ویژگی انحراف معیار و یکنواختی کمترین فراوانی بین ویژگی‌های منتخب را داشتند. شکل 7 منحنی عملکرد همگرایی الگوریتم ژنتیک برای مقادیر تابع هزینه (برازندگی) رابطه (2) با طبقه‌بند انفیسی را نشان می‌دهد.

3-3- طبقه‌بندی تصاویر و عیوب

شرایط مختلف رادیاتور که شامل شش کلاس گرفتگی لوله‌ها و شبکه‌ها، نشی مایع خنک‌کاری، خرابی درب، اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه و کلاس سالم است، پس از استخراج و انتخاب ویژگی‌های بهینه از تصاویر گرمایی برای طبقه‌بندی تصاویر گرمایی شرایط مختلف جهت تشخیص عیوب رادیاتور نیز استفاده شد.

جدول 4 ویژگی‌های منتخب توسط الگوریتم ژنتیک

Table 4 Selected features, based on Genetic Algorithm.

تصاویر	ویژگی‌های آماری بافت					
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6
تصویر گرمایی اصلی (خاکستری)	1	1	0	1	0	1
تصویر تقریب تبدیل موجک	0	0	1	1	0	1
تصویر جزئیات افقی تبدیل موجک	1	0	1	0	0	1
تصویر جزئیات عمودی تبدیل موجک	1	0	0	1	0	0
تصویر جزئیات قطری تبدیل موجک	1	0	0	1	1	1

1	1	28	2	2	1
0	70	1	0	0	0
39	2	1	1	1	0

جدول 8 مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه‌بند انفیس با استفاده از ویژگی‌های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک

Table 8 Performance measurements of ANFIS classifier with Genetic Algorithm feature selection

شاخصه‌های آماری (%)	دقت طبقه‌بندی	حساسیت	ویژگی	انتخابی بودن
کلاس‌های رادیاتور				
گرفتگی شبکه‌ها	98.45	96.55	94.91	99.24
اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه	97.52	95.94	93.42	98.78
نشستی سیال خنک کاری	98.45	97.56	90.9	99.64
خرابی درب	97.21	80	93.33	97.61
گرفتگی لوله‌ها	98.76	98.59	95.89	99.6
رادیاتور سالم	97.83	88.63	95.12	98.23
میانگین به ازای هر کلاس	98.03	92.88	93.93	98.85

دقت کلی طبقه‌بندی = 94.11

در این تحقیق یک سامانه مبتنی بر فناوری‌های گرمانگاری، پردازش تصویر و هوش محاسباتی برای تشخیص و طبقه‌بندی عیوب مختلف رادیاتور توسعه داده شد. ابتدا عیوب متداول در رادیاتورهای سیستم خنک کاری شامل گرفتگی لوله‌ها و شبکه رادیاتور، اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه، نشستی مایع خنک کاری، خرابی درب رادیاتور ایجاد شد، سپس تصاویر گرمایی از شرایط مختلف رادیاتور معیوب و سالم توسط دوربین فرورسرخ برای تشخیص عیوب مختلف رادیاتور تهیه شد. اختلاف بین تصاویر گرمایی از شرایط رادیاتور معیوب در مقایسه با تصویر گرمایی رادیاتور سالم مشهود است. پس از پیش‌پردازش تصاویر گرمایی تهیه‌شده جهت تجزیه و پردازش چند دقتی از تصاویر یادشده تبدیل مویک در یک سطح تجزیه استفاده شد. از هر کدام از تصاویر گرمایی مقیاس خاکستری، تصاویر تقریب، جزئیات افقی، عمودی و قطری تبدیل مویک آن تصویر، ویژگی‌های آماری بافت استخراج شد. با تلفیق تکنیک‌های هوشمند الگوریتم ژنتیک و انفیس جهت انتخاب ویژگی و ورودی‌های مؤثر به طبقه‌بند استفاده شد. در نهایت از انفیس برای طبقه‌بندی تصاویر گرمایی با استفاده از بردار ویژگی‌های مستخرج و منتخب استفاده شد. از شاخص‌های آماری نظیر دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن برای ارزیابی طبقه‌بند استفاده شد. مقادیر میانگین شاخص‌های آماری به ازای هر کلاس، به دست آمده از ماتریس اغتشاش این مدل شامل دقت طبقه‌بندی، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به ترتیب برابر 98.03%، 92.88%، 93.93% و 98.85% است. سامانه پیشنهادی پس از ارزیابی توانست با دقت کلی طبقه‌بندی 94.11% عیوب مختلف رادیاتور سیستم خنک کاری را تشخیص و طبقه‌بندی کند؛ بنابراین استفاده از تکنیک پردازش تصاویر گرمایی مبتنی بر هوش مصنوعی برای پایش وضعیت و تشخیص هوشمند عیوب رادیاتور امیدوارکننده است.

5- مراجع

[1] P. J. Yadav, B. R. Singh, Study on Performance Evaluation of

از کارافتادگی ناگهانی موتور، پایش وضعیت رادیاتور جهت استفاده از سطح بهینه انتقال حرارت از جمله مباحث مهم در زمینه پایش وضعیت موتور است.

جدول 5 ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه‌بند انفیس با استفاده از تمام ویژگی‌های مستخرج (بدون انتخاب ویژگی)

Table 5 Confusion matrix obtained from the evaluation of ANFIS classifier without feature selection.

کلاس‌های واقعی شرایط رادیاتور	گرفتگی شبکه‌ها	اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه	نشستی سیال خنک کاری	خرابی درب	گرفتگی لوله‌ها	رادیاتور سالم
کلاس‌های پیش‌بینی شده						
گرفتگی شبکه‌های رادیاتور	56	2	0	0	0	0
اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور	65	0	0	0	0	0
نشستی سیال خنک کاری در رادیاتور	4	0	39	2	0	1
خرابی درب رادیاتور	2	0	5	28	1	0
گرفتگی لوله‌های رادیاتور	0	0	0	0	65	2
رادیاتور سالم	1	0	0	0	0	38

دقت کلی طبقه‌بندی = 89.81

جدول 6 مقادیر شاخص‌های آماری مربوط به ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه‌بند انفیس با استفاده از کلیه ویژگی‌های مستخرج (بدون انتخاب ویژگی)

Table 6 Performance measurements of ANIFIS classifier without feature selection

شاخصه‌های آماری (%)	دقت طبقه‌بندی	حساسیت	ویژگی	انتخابی بودن
کلاس‌های رادیاتور				
گرفتگی شبکه‌ها	97.53	91.8	94.91	98.11
اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه	95.98	97.01	85.52	99.19
نشستی سیال خنک کاری	96.29	84.78	88.63	97.5
خرابی درب	96.91	77.77	93.33	97.27
گرفتگی لوله‌ها	96.6	97.01	87.83	99.2
رادیاتور سالم	96.29	80.85	92.68	96.81
میانگین به ازای هر کلاس	96.6	88.2	90.48	98.02

جدول 7 ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه‌بند انفیس با استفاده از ویژگی‌های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک

Table 7 Confusion matrix obtained from the evaluation of ANFIS classifier with Genetic Algorithm feature selection

کلاس‌های واقعی	گرفتگی شبکه‌ها	اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه	نشستی سیال خنک کاری	خرابی درب	گرفتگی لوله‌ها	رادیاتور سالم
کلاس‌های پیش‌بینی شده						
گرفتگی شبکه‌ها	56	1	0	0	0	1
اتصال شل بین لوله‌ها و شبکه	2	71	1	0	0	0
نشستی سیال خنک کاری	0	1	40	0	0	0

- selection in neural classification systems for image pattern recognition, *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, Vol. 33 No. 1, pp. 52-58, 2013.
- [19] A. Taheri-Garavand, *Implementation and development fault diagnosis of cooling system radiator using combined thermography and artificial intelligence techniques*, PhD. Thesis, University of Tehran, Iran, 2015. (in Persian فارسی)
- [20] Z. Shi, L. He, Application of neural networks in medical image processing, *Proceedings of the Second International Symposium on Networking and Network Security*, Jinggangshan, China, April 2-4, 2010.
- [21] B. Wiecek, Review on thermal image processing for passive and active thermography, *Proceedings of the IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, Shanghai, China, September 1-4, 2005.
- [22] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Thierd Edition, pp. 822-827, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [23] H. Liu, L. Liu, H. Zhang, Boosting feature selection using information metric for classification, *Neurocomputing*, Vol. 73, No. 1, pp. 295-303, 2009.
- [24] I. Guyon, A. Elisseeff, An introduction to variable and feature selection *Machine Learning Research*, Vol. 3, No.1, pp. 1157-1182, 2003.
- [25] Q. H. Hu, D. Yu, J. F. Liu, C. Wu, Neighborhood rough set based heterogeneous feature subset selection, *Information Sciences*, Vol. 178, No. 4, pp. 3577-3594, 2008.
- [26] M. Moradi, A. Chaibakhsh, A. Ramezani, Early fault detection in transient conditions for a steam power plant subsystem using support vector machine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 405-411, 2016. (in Persian فارسی)
- [27] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-Network Based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
- [28] V. Labatut, H. Cheri, Accuracy Measures for the Comparison of Classifiers. *Al-Dahoud Ali. The 5th International Conference on Information Technology*, Amman, Jordan, 2011.
- [29] M. Sokolova, G. Lapalme, A systematic analysis of performance measures for classification tasks, *Information Processing & Management*, Vol. 45, No. 4, pp. 427-437, 2009.
- [30] M. Nouri Khajavi, M. R. Bavir, E. Farrokhi, new method in determining rotor crack depth by using multi-scale permutation Entropy and ANFIS network, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 31-39, 2015. (in Persian فارسی)
- [31] K. Nelson, Engine Overheating, *Shade tree A's*, Vol. 36, No. 7, pp. 1-3, 2009.
- [32] G. S. Missan, I. P. Keswani, Analysis of causes of engine overheating due to cooling system failure using pareto principle, *Engineering Trends and Technology*, Vol. 36, No. 5, pp. 242-248, 2016.
- [33] A. Taheri-Garavand, H. Ahmadi, M. Omid, S. S. Mohtasebi, K. Mollazade, A. J. Russell Smith, G. M. Carlomagno, An intelligent approach for cooling radiator fault diagnosis based on infrared thermal image processing technique, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 87, pp. 434-443, 2015.
- Automotive Radiator, *SAMRIDDHI-A Physical Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 2229-7111, 2011.
- [2] S. U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, USA, 1995.
- [3] S. D. Oduro, J. Ampofo, Effect of radiator fins blockage by clay soil on the engine cooling temperature, *f Engineering and Technology*, Vol. 2 No. 6, pp. 1002-1009, 2012.
- [4] S. Mao, C. Cheng, X. Li, E. E. Michaelides, Thermal/structural analysis of radiators for heavy-duty trucks, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 11, pp. 1438-1446, 2010.
- [5] A. Yazdani, K. Nazari, Preparation of technical specifications of Descaler for locomotive radiators, *Proceedings of The 7th Railroad Transportation Conference*, Tehran, Iran, April, 28-29, 2004. (in Persian فارسی)
- [6] C. Lin. J. sounders, S. Watkins, The Effect of changes in ambient and coolant radiator inlet temperatures and coolant flow rate on specific dissipation. *SAE Technical Paper*, 2000-01-0579, 2000.
- [7] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, Infrared thermography for condition monitoring- A review, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 35-55, 2013.
- [8] N. Arora, D. Martins, D. Ruggerio, E. Tousimis, A. J. Swistel, M. P. Osborne, Effectiveness of a noninvasive digital infrared thermal imaging system in the detection of breast cancer, *Surgery*, Vol. 196, No. 4, pp. 523-526, 2008.
- [9] Z. Ge, X. Du, L. Yang, Y. Yang, Y. Li, Y. Jin, Performance monitoring of direct aircooled power generating unit with infrared thermography, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 4. pp. 418-424, 2011.
- [10] F. P. G. Marquez, A. M. Tobias, J. M. P. Perez, M. Papaalias, Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods, *Renewable Energy*, Vol. 46, pp. 169-178, 2012.
- [11] S. Bagavathiappan, T. Saravanan, N. P. George, J. Philip, T. Jayakumar, B. Raj, Condition monitoring of exhaust system blowers using infrared thermography, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 50, No. 9, pp. 512-515, 2008.
- [12] W. T. Kim, S. Ranjit, D. H. Park, M. Y. Choi, 2014. Infrared Thermographic NDT for the Fault Diagnosis of Bearing with Foreign Substances inside under Loading Condition. *11th European Conference on Non-Destructive Testing*, Prague, Czech Republic, 2014.
- [13] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava, Review of condition assessment of power transformers in service, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, No. 6, pp. 12-25, 2002.
- [14] M. S. Jadin, S. Taib, Review, Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, No. 4, pp. 236-245, 2012.
- [15] A. M. Younus, B. S. Yang, Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image, *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 2, pp. 2082-2091, 2012.
- [16] M. S. Jadin, S. Taib, K. H. Ghazali, Feature extraction and classification for detecting the thermal faults in electrical installations, *Measurement*, Vol. 57, pp. 15-24, 2014.
- [17] A. S. N. Huda, S. Taib, K. H. Ghazali, M. Jadin, S. A new thermographic NDT for condition monitoring of electrical components using ANN with confidence level analysis. *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 3, pp. 717-724, 2014.
- [18] M. R. A. Gamarra, M. Quintero, Using genetic algorithm feature