



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

امین طاهری گراوند<sup>1\*</sup>، محمود امید<sup>2</sup>، حجت احمدی<sup>2</sup>، سید سعید محتسبی<sup>2</sup>، جیوانی ماریا کارلومگنو<sup>3</sup>

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 خنک کاری شامل گرفتگی لوله‌های رادیاتور، گرفتگی شبکه رادیاتور، اتصالات شل بین لوله‌ها و شبکه رادیاتور، نشتی مایع خنک کاری، 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 خنک کاری 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 تقرب، 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 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.

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

Amin Taheri-Garavand<sup>1\*</sup>, Mahmoud Omid<sup>2</sup>, Hojjat Ahmadi<sup>2</sup>, Seyed Saeid Mohtasebi<sup>2</sup>, Giovanni Maria Carlomagno<sup>3</sup>

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

به کار می‌رود تا انتقال حرارت از آب به هوا به خوبی و به سرعت امکان‌پذیر

رادیاتور یک نوع مبدل حرارتی است که در سیستم خنک کاری موتورهای

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 سیلندره های موتورهای درون سوز، دما به بیش از 2000 درجه سلسیوس می رسد [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 می افتد؛ بنابراین عملیات مناسب انتقال حرارتی که در یک موتور رخ می دهد 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 خرابی های سیستم خنک کاری ماشین های سنگین و سستی در ریشه یابی نقاط معیوب مطرح می شود. تنش های حرارتی بزرگ و غیریکنواخت در رادیاتور منجر به فرسایش مواد و خرابی اجزایی مانند واشر سرسیلندر و یا آب بند پمپ آب می شود. از این گونه موارد کم نیستند که تمام مجموعه رادیاتور به دلیل جلوگیری از کاهش عملکرد سیستم خنک کاری و گرم شدن بیش از حد موتور که ممکن است منجر به آسیب های قابل توجهی در موتور شود تعویض می شود. دلایل متعددی سبب ایجاد تنش ساختاری در رادیاتورها می شود، گرادیان حرارتی غیریکنواخت جریان آب گرم که حامل یک بار حرارتی ناپایدار از موتور به هدر بالایی، لوله ها و هدر پایینی رادیاتور از دلایل اصلی است [4].

مشکلات ناشی از خوردگی، رسوب گذاری و گرفتگی لوله ها برای دراز مدت در سیستم های خنک کننده شدید و بحرانی بوده و در صورت عدم رسیدگی و برطرف نشدن این مشکلات، امکان سوراخ شدن سطوح و نفوذ آب به سایر قسمت ها و بخش ها نیز وجود خواهد داشت. رسوبات تشکیل شده سبب گرفتگی لوله ها و مجاری، کاهش انتقال حرارت بین آب و موتور می شوند که می تواند منجر به خروج سیستم از چرخه فرآیند شود [5].

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

دما از مهم ترین پارامترهای تشخیص وضعیت ماشین، متفاوت در تجهیزات و اجزا قسمت های 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 این که دما اصلی ترین پارامتر در تعیین عملکرد و سلامت رادیاتور است، از روش گرمانگاری جهت پایش وضعیت رادیاتور استفاده می شود.

گرمانگاری فروسرخ بر پایه اندازه گیری 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 می دهد [8]. از فناوری گرمانگاری فروسرخ به طور گسترده ایی در پایش وضعیت ماشین ها و تجهیزات استفاده شده است. جی و همکاران از گرمانگاری جهت پایش عملکرد واحد هواخنک مستقیم نیروگاه استفاده کرده اند. آن ها 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 می دهد از تکنیک گرمانگاری می توان برای پایش وضعیت اجزای توربین بادی برای جلوگیری از عیوب نابهنگام پره های توربین هنگام کار استفاده کرد [10]. باگازوپن و همکاران از گرمانگاری برای پایش وضعیت یاتاقان ها، شفت و موتور دمنده سیستم تخلیه استفاده شده در سیستم تهویه هوای نیروگاه هسته ای

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 به طور گسترده برای پایش بر خط نفوذ جوش، کنترل فرایند جوش کاری، کنترل ته نشینی مواد، کنترل سیستم جوش کاری، اطمینان از کیفیت جوش کاری لیزر و پایش کیفیت فرایند برش کاری در روش جت آب بهره برده شده است [7]. وانگ و همکاران از گرمانگاری برای تشخیص گرفتگی جریان روغن سیستم خنک کاری ترانسفورماتورهای قدرت استفاده کردند [13]. همچنین برای پایش وضعیت انواع مختلف تجهیزات الکتریکی از قبیل واحد کنترل الکترونیکی (ECU)، ترانسفورماتورها، ایستگاه های فرعی، سوئیچینگ ها، بانک های خازن، خطوط نیروی فشار قوی، تابلوهای قدرت و روشنایی، کابل های قدرت و متعلقات آن ها می توان از این فناوری استفاده کرد [14].

گرمانگاری روشی بر خط، زمان واقعی برای پایش وضعیت دمایی تجهیزات و فرایندها، به صورت غیرتماسی و غیرمداخله گر در کاربردهای مختلف پایش و تشخیص وضعیت ماشین است، که این روش پایش وضعیت منجر به کاهش توقفات و کاهش خاموشی های ناگهانی، کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری، کاهش حوادث و خطرات و همین طور افزایش بهره وری می شود. برای پایش وضعیت ماشین می توان از تکنیک های 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 طبقه بندی 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) به عنوان طبقه بند جهت طبقه بندی 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 می شود؛ بنابراین یک سامانه تشخیص هوشمند بر پایه شبکه های عصبی مصنوعی (ANNs) سبب کاهش زمان عملیات، نیروی کارگری، زحمات انسانی و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سامانه می شود. هدا و همکاران برای بازرسی تجهیزات الکتریکی از گرمانگاری مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی استفاده کردند [16]. جادین و همکاران از بردار ماشین پشتیبان و شبکه های عصبی مصنوعی به عنوان طبقه بند در پایش وضعیت گرمایی برای تشخیص و طبقه بندی تأسیسات الکتریکی استفاده کردند [17]. گامارا و کوینترو از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بردار ویژگی و از شبکه های عصبی برای تشخیص تصاویر دیجیتال و کنترل کیفیت استفاده کردند [18].

در این تحقیق یک سامانه مبتنی بر فناوری های گرمانگاری و پردازش تصاویر حرارتی برای تشخیص و طبقه بندی عیوب مختلف رادیاتور توسعه داده می شود. پس از پیش پردازش تصاویر گرمایی تهیه شده جهت تجزیه و پردازش چند دقتی از تصاویر یاد شده تبدیل موجه در یک سطح تجزیه اعمال شد، سپس با تلفیق تکنیک های هوشمند نظیر الگوریتم ژنتیک و شبکه های عصبی - فازی تطبیقی (انفیس)، جهت انتخاب ویژگی و ورودی های مؤثر به طبقه بند استفاده شد. در نهایت از شبکه عصبی - فازی تطبیقی (انفیس) به عنوان طبقه بند برای طبقه بندی تصاویر گرمایی با استفاده از بردار ویژگی های منتخب استفاده شد.

## 2- مواد و روش‌ها

## 2-1- ساخت و پیاده‌سازی بستر آزمایشگاهی پایش وضعیت رادیاتور

یک بستر آزمایشگاهی جهت اجرا و توسعه یک سامانه هوشمند تشخیص عیوب مختلف رادیاتور که بتواند شرایط و نیازمندی‌های لازم برای پایش وضعیت و تشخیص عیوب رادیاتور را فراهم آورد ساخته شد. شکل 1 طرحواره بستر آزمایشگاهی مورد نظر را نشان می‌دهد. مهم‌ترین اجزاء سخت‌افزاری این سامانه گرمانگاری شامل رادیاتور، شاسی، سامانه گرمایش آب، پمپ آب، دی‌سنج، 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 بررسی‌های انجام‌شده مشخص شد موارد زیر از عیوب متداول رادیاتور است.

- گرفتگی لوله‌های آب در نقاط مختلف رادیاتور، امکان دارد بر اثر جرم گرفتن داخل لوله‌های رادیاتور مسدود شده و یا جریان عبور آب آن‌ها کمتر شود؛ بنابراین قسمتی که لوله‌های آن گرفته عملاً در عملیات انتقال حرارت نقشی نداشته و آن بخش رادیاتور از مدار خنک‌کاری خارج شده است.

- گرفتگی شبکه‌های هوا در نواحی مختلف، ماشین‌های راسازی، کشاورزی و خارج جاده‌ای مرسوم تر و معمولاً به دلیل گرد و غبار ناشی از عملیات راه‌سازی، شخم، تسطیح، خرمن‌کوبی است، یا برگ درختان، کاه و غیره که به دلیل مکش هوا توسط پروانه به داخل شبکه‌های رادیاتور کشیده شده و سبب گرفتگی آن‌ها می‌شود. این گرفتگی‌ها از عبور جریان هوا بین پره‌ها جلوگیری کرده و بدین ترتیب عملیات انتقال حرارت از مایع خنک‌کاری به هوای محیط به خوبی انجام

نمی‌شود.

- نشئی رادیاتور به‌طور کلی خوردگی از مهم‌ترین عوامل ایجاد روزه در سیستم خنک‌کاری است و کارهای بسیاری برای مقابله با این مشکل صورت گرفته است، مانند استفاده از مایع خنک‌کننده ضدخوردگی و نیز آلیاژهای مقاوم به خوردگی و ...، اما با این حال خوردگی در سیستم خنک‌کاری از جمله در رادیاتور از مهم‌ترین عوامل به ویژه در ماشین‌های ثابت بوده است؛ بنابراین نشئی 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 خنک‌کاری نشت کرده و گردش آن به درستی انجام نشده و سیستم خنک‌کاری موتور به خوبی عمل نکند.

- اتصال شل بین پره‌ها و لوله‌های رادیاتور ممکن است به دلیل خوردگی یا ایراد در فرآیند تولید که منجر به لحیم ضعیف و اتصالات شل بین پره‌ها و لوله‌های رادیاتور می‌شود، به وجود آید و سبب می‌شود انتقال حرارت بین پره‌ها و لوله‌ها به درستی صورت نپذیرد.

- معیوب بودن درب رادیاتور سبب کاهش یا پایین‌آمدن نقطه جوش مایع خنک‌کاری می‌شود.

- وجود هر یک از عیوب یادشده در رادیاتور سبب اختلال در سیستم خنک‌کاری گشته و دمای موتور بالا می‌رود، و امکان دارد صدمات بسیاری به موتور وارد شود. در هر حال عدم تشخیص به موقع آن نیز سبب از کارافتادگی موتور می‌شود؛ بنابراین پایش وضعیت رادیاتور و تشخیص عیوب آن برای نگهداری و کارایی در شرایط مطلوب موتور بسیار مهم و ضروری است.

عیوبی مانند گرفتگی لوله‌های آب رادیاتور در نقاط مختلف، گرفتگی شبکه‌های هوا در نواحی مختلف، نشئی، اتصال شل بین پره‌ها و لوله‌های و معیوب بودن درب رادیاتور در نوع مسی- برنجی نصب‌شده در بستر آزمایشگاهی ایجاد شد.

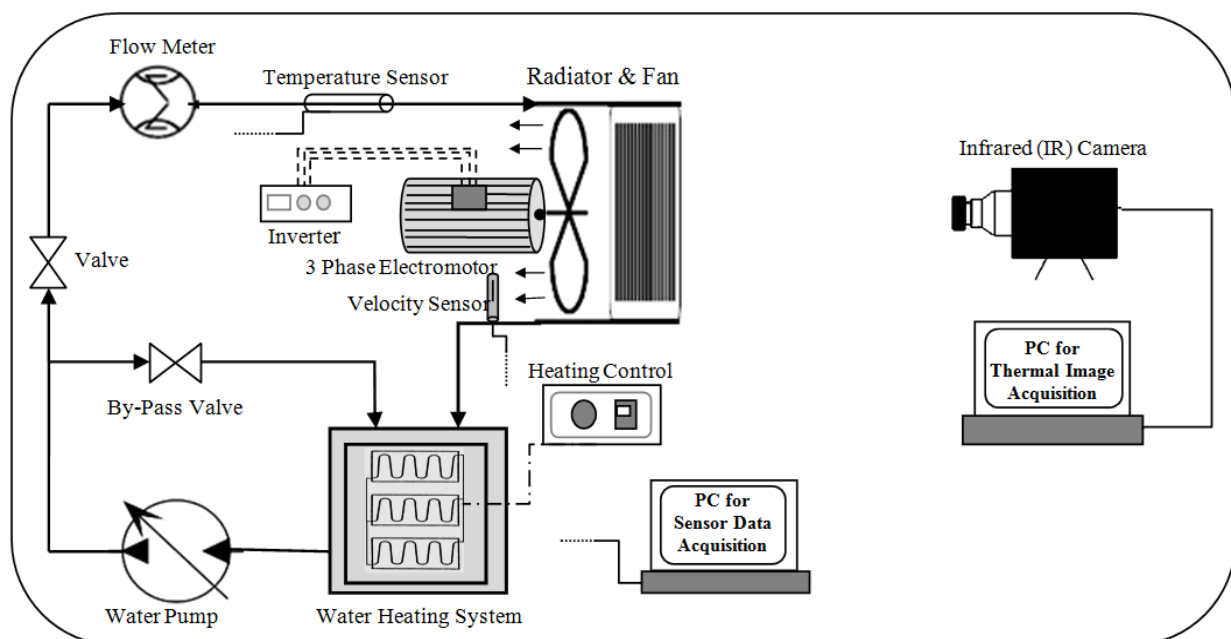


Fig. 1 A schematic diagram of experimental setup for thermographic fault diagnosis of cooling radiator

شکل 1 طرحواره بستر آزمایشگاهی و سامانه گرمانگاری پایش وضعیت رادیاتور

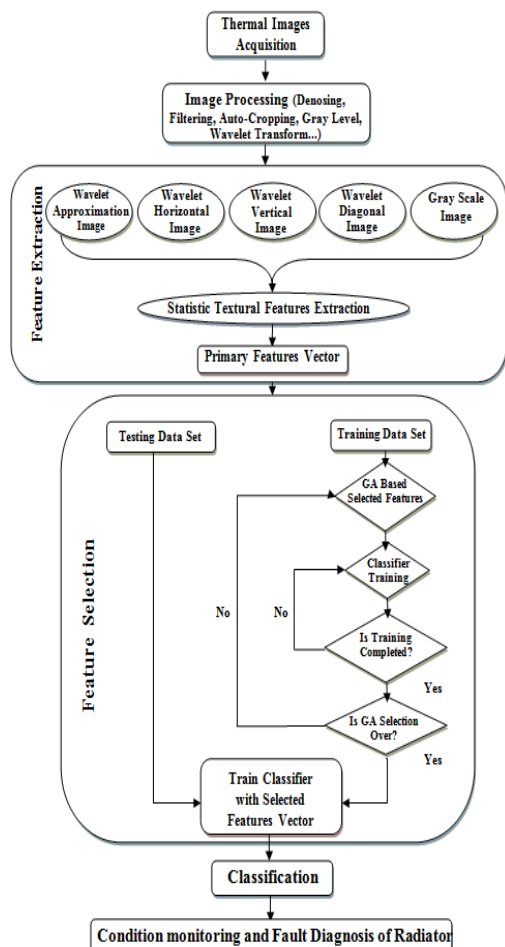


Fig. 2 Proposed framework for intelligent fault diagnosis and condition monitoring of cooling radiator [19]

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 گرمانگاری (ULIRvisionTI160) | تفکیک پذیری: 160.120 پیکسل،<br>توانایی دریافت گستره طیفی: 8-14 $\mu\text{m}$ .                                                                                                                                                 |
| رادیاتور                           | حساسیت گرمایی: 0.065 K (65 mK) در دمای 30 $^{\circ}\text{C}$<br>تفکیک پذیری طیفی (میدان دید): 3.2 mrad<br>رادیاتور شرکت U.T.B مورد استفاده در موتورهای دیزل<br>جنس رادیاتور: مسی-برنجی<br>نوع شبکه: لوله-پره‌ای<br>فن (پروانه) |
| پمپ آب                             | از نوع مکشی همراه یک الکتروموتور سه فاز به‌عنوان منبع تأمین توان چرخشی پروانه<br>پمپ سانتریفیوژ                                                                                                                                |
| سامانه گرمایش آب                   | یک مخزن تحت فشار به ابعاد 50.40.40 سانتی‌متر<br>مکعب از جنس ورق گالوانیزه<br>نه عدد المنت حرارتی 1000 وات                                                                                                                      |
| 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 تصویربرداری 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 گرمانگاری، اطلاعات مفیدی در مورد ویژگی‌های آماری مرتبه اول تصویر مانند مقدار

جدول 2 ویژگی های آماری استخراج شده از تصاویر گرمایی رادیاتور

Table 2 statistical features extracted from thermal images of radiator

| ویژگی               | توضیح                                                                                                                                                                                                                    | فرمول*                                                |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| میانگین سطح خاکستری | برای اندازه گیری میانگین شدت بافت تصویر، اطلاعاتی درباره شدت روشنایی کلی تصویر ارائه می دهد.                                                                                                                             | $m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i P(z_i)$                     |
| انحراف معیار        | اندازه گیری انحراف معیار شدت بافت و یا میانگین کنتراست تصویر است که تغییرات شدت در اطراف میانگین تصویر را بررسی می کند.                                                                                                  | $\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 P(z_i)}$ |
| همواری              | همواری نسبی نواحی را بیان می کند. مقدار همواری برای نواحی با سطوح شدت ثابت، صفر و برای ناحیه های 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 می دهد. این مقدار برای هیستوگرام های متقارن صفر، برای هیستوگرام های متمایل به راست منفی و در مورد هیستوگرام های 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 اندازه گیری میزان تصادفی بودن مقادیر شدت است. معیاری از ناهمگنی و بیانگر میزان تغییرات شدت در یک تصویر است.                                                                                                  | $E = - \sum_{i=0}^{L-1} P(z_i) \log_2 P(z_i)$         |

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 به عنوان توانمندترین رخ می نماید. نظریه چند دقتی برای نمایش و تحلیل سیگنال ها (یا تصاویر) در بیش از یک دقت به کار می رود. در چنین روشی بدیهی است ویژگی هایی 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 پذیری های مختلف است.

برای تحلیل تصاویر گرمایی مربوط به شرایط مختلف رادیاتور سیستم خنک کاری، 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 به دست می آید. از هر یک از تصاویر زیر باند به دست آمده شش ویژگی آماری شامل میانگین، انحراف معیار، همواری، چولگی، انرژی و آنتروپی استخراج شد؛ بنابراین 24 ویژگی (6 ویژگی آماری × 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 طبقه بندی دارد [23]. بسیاری از ویژگی ها معمولاً با یک الگوریتم یادگیری برای تولید خصوصیات کامل عمل طبقه بندی تهیه می شوند. بسیاری از ویژگی ها در اغلب موارد برای عمل یادگیری نامربوط و زائد است، و کارایی به کارگیری الگوریتم یادگیری را نامناسب خواهند کرد. ممکن است دقت یادگیری (طبقه بندی) و سرعت آموزش به میزان قابل توجهی با این ویژگی های زائد نامناسب تر شود [24، 25]. هدف اصلی انتخاب ویژگی، ارزیابی کیفیت ویژگی های کاندید و تعیین زیرمجموعه ویژگی با حداقل ابعاد از دامنه مسئله با حفظ دقت بالا بطور مناسب در ارائه ویژگی های اصلی است [26]. مسئله انتخاب ویژگی می تواند به عنوان مسئله بهینه سازی فرموله سازی شده باشد. پس از تکمیل فرآیند استخراج ویژگی از تصاویر گرمایی شرایط مختلف رادیاتور اندازه ماتریس داده های ورودی برابر با 1620.30 (1620 تصویر گرمایی، 30 ویژگی) است؛ بنابراین به منظور کاهش ابعاد ویژگی ها، کمتر شدن حجم محاسبات، دقت بالاتر یادگیری طبقه بندی، در این تحقیق از ترکیب تکنیک الگوریتم ژنتیک و طبقه بندی شبکه عصبی فازی تطبیقی (انفیس) جهت عملیات انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی ها استفاده شد. شکل 3 پیاده سازی شده سامانه پیشنهادی جهت انتخاب ویژگی را نشان می دهد.

وظیفه الگوریتم ژنتیک در مسئله انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی های استخراج شده از تصاویر گرمایی رادیاتور است که بردار ویژگی ها را براساس میزان قدرتشان در تعیین دقت سامانه طبقه بندی مورد بررسی قرار می دهد. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور انتخاب بهترین زیرمجموعه (بردار ویژگی) از بین مجموعه ویژگی های 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 کروموزم ها به صورت تصادفی ایجاد می شود و اعضای این

تصویر،  $N$  تعداد کل درایه های 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

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

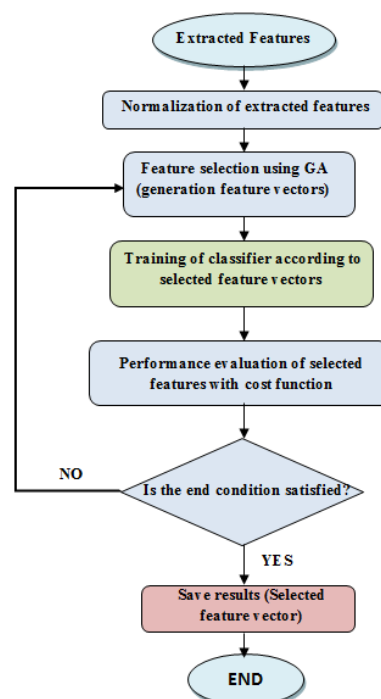


Fig. 3 Flowchart of feature selection process

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 ایده‌ال 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،  $\sigma$  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  $i$  نام طبقه‌بندی شده است. تصمیمات مثبت ناصحیح (FP) نمونه‌هایی که به اشتباه توسط طبقه‌بند  $(C_i^*)$  به کلاس  $i$  نام تعلق گرفته است. تصمیمات منفی صحیح (TN) نمونه‌هایی به درستی توسط طبقه‌بند  $(C_i^*)$  در کلاس  $i$  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 به دست آوردن 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 به دست 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.

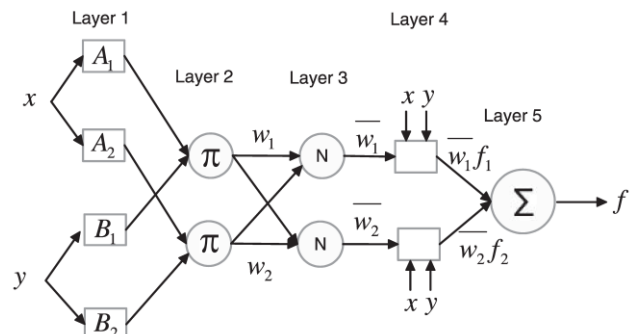
$$o_i = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (7)$$

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

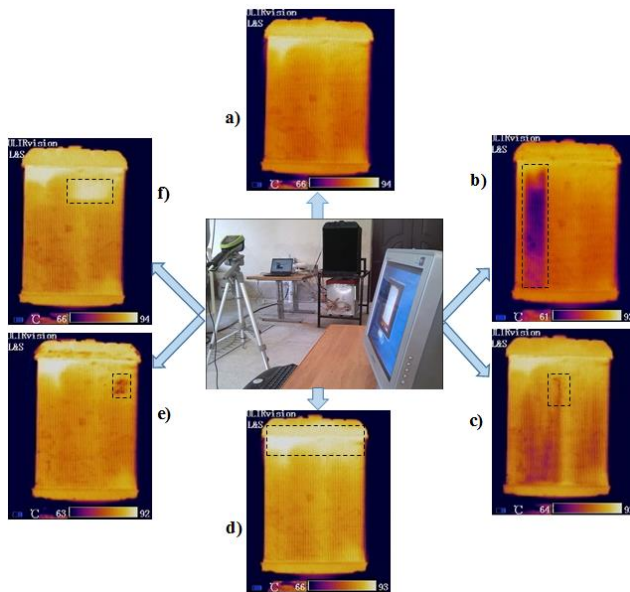


Rule 1: If  $(x \text{ is } A_1)$  and  $(y \text{ is } B_1)$ , then  $(f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1)$

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 ضریب انتقال حرارت مایع خنک‌کاری از هوا بیشتر است. 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 فروسرخ تهیه شد. شکل 6 تصاویر گرمایی تهیه‌شده توسط سامانه گرمانگاری فروسرخ 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

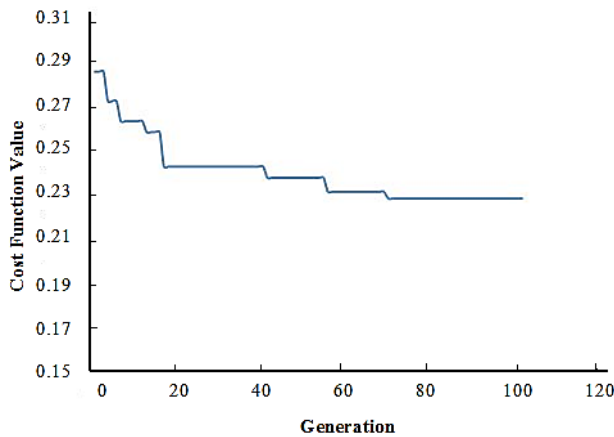


Fig. 7 Convergence performance of Genetic Algorithm for cost function values

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 طبقه‌بند، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن به ترتیب برابر 96.6، 88.2، 90.48 و 98.02 است. دقت کلی طبقه‌بند انفیس با ورودی کل ویژگی‌های مستخرج برابر با 89.81 است. در طبقه‌بند انفیس 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 انفیس 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 انفیس در مدل با ورودی بردار ویژگی‌های منتخب (ترکیب الگوریتم ژنتیک و انفیس) برابر با 94.11٪ است. این دقت در مقایسه با طبقه‌بند انفیس بدون انتخاب ویژگی عملکرد بهتر و همچنین زمان پاسخ به مراتب کمتری داشت (در این حالت زمان پاسخ نصف زمان پاسخ در حالت طبقه‌بندی انفیس 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 گرم شدن 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 آسیب دیدگی 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 انفیس عملیات انتخاب بهترین زیرمجموعه از ویژگی‌ها برای کاهش ابعاد ویژگی‌ها، کمتر شدن 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 انفیس 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.

| ویژگی‌های آماری بافت |          |                |                   |             |                | تصاویر                        |
|----------------------|----------|----------------|-------------------|-------------|----------------|-------------------------------|
| $\mu$                | $\sigma$ | $\mu_{\sigma}$ | $\sigma_{\sigma}$ | $\mu_{\mu}$ | $\sigma_{\mu}$ |                               |
| 1                    | 1        | 0              | 1                 | 0           | 1              | تصویر گرمایی اصلی (خاکستری)   |
| 0                    | 0        | 1              | 1                 | 0           | 1              | تصویر تقریب تبدیل موجک        |
| 1                    | 0        | 1              | 0                 | 0           | 1              | تصویر جزئیات افقی تبدیل موجک  |
| 1                    | 0        | 0              | 1                 | 0           | 0              | تصویر جزئیات عمودی تبدیل موجک |
| 1                    | 0        | 0              | 1                 | 1           | 1              | تصویر جزئیات قطری تبدیل موجک  |

|                |   |   |   |   |    |    |
|----------------|---|---|---|---|----|----|
| خرابی درب      | 1 | 2 | 2 | 1 | 28 | 1  |
| گرفتگی لوله ها | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 70 |
| رادیاتور سالم  | 0 | 1 | 1 | 1 | 2  | 39 |

**جدول 8** مقادیر شاخص های آماری مربوط به ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه بندی انفیس با استفاده از ویژگی های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک

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

| شاخصه های آماری (%)         | دقت طبقه بندی | حساسیت | ویژگی | انتخابی بودن |
|-----------------------------|---------------|--------|-------|--------------|
| گرفتگی شبکه ها              | 98.45         | 96.55  | 94.91 | 99.24        |
| اتصال شل بین لوله ها 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 لوله ها              | 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 طبقه بندی = 94.11

در این تحقیق یک سامانه مبتنی بر فناوری های گرمانگاری، پردازش تصویر و هوش محاسباتی برای تشخیص و طبقه بندی عیوب مختلف رادیاتور توسعه داده شد. ابتدا عیوب متداول در رادیاتورهای سیستم خنک کاری شامل گرفتگی لوله ها و شبکه رادیاتور، اتصالات شل بین لوله ها 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 پیش پردازش تصاویر گرمایی تهیه شده جهت تجزیه و پردازش چند دقتی از تصاویر یاد شده 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، ویژگی های آماری بافت استخراج شد. با تلفیق تکنیک های هوشمند الگوریتم ژنتیک و انفیس جهت انتخاب ویژگی و ورودی های مؤثر به طبقه بندی استفاده شد. در نهایت از انفیس برای طبقه بندی تصاویر گرمایی با استفاده از بردار ویژگی های مستخرج و منتخب استفاده شد. از شاخص های آماری نظیر دقت، صحت، حساسیت و اختصاصی بودن برای ارزیابی طبقه بندی استفاده شد. مقادیر میانگین شاخص های آماری به ازای هر کلاس، به دست آمده از ماتریس اغتشاش این مدل شامل دقت طبقه بندی، 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 طبقه بندی 94.11% عیوب مختلف رادیاتور سیستم خنک کاری را تشخیص و طبقه بندی 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 طبقه بندی انفیس با استفاده از تمام ویژگی های مستخرج (بدون انتخاب ویژگی)

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

| کلاس های واقعی شرایط رادیاتور        | گرفتگی شبکه ها | اتصال شل بین لوله ها و شبکه | نشستی سیال خنک کاری در رادیاتور | خرابی درب رادیاتور | گرفتگی لوله های رادیاتور | رادیاتور سالم |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| کلاس های پیش بینی شده                | 56             | 2                           | 0                               | 0                  | 0                        | 0             |
| گرفتگی شبکه های رادیاتور             | 56             | 2                           | 0                               | 0                  | 0                        | 0             |
| اتصال شل بین لوله ها و شبکه رادیاتور | 2              | 65                          | 0                               | 0                  | 0                        | 0             |
| نشستی سیال خنک کاری در رادیاتور      | 0              | 4                           | 39                              | 2                  | 0                        | 1             |
| خرابی درب رادیاتور                   | 0              | 2                           | 5                               | 28                 | 1                        | 0             |
| گرفتگی لوله های رادیاتور             | 0              | 0                           | 0                               | 0                  | 65                       | 2             |
| رادیاتور سالم                        | 1              | 0                           | 0                               | 0                  | 8                        | 38            |

دقت کلی طبقه بندی = 89.81

**جدول 6** مقادیر شاخص های آماری مربوط به ماتریس اغتشاش به دست آمده برای شش کلاس وضعیت مختلف رادیاتور با طبقه بندی انفیس با استفاده از کلیه ویژگی های مستخرج (بدون انتخاب ویژگی)

**Table 6** Performance measurements of ANIFIS classifier without feature selection

| شاخصه های آماری (%)         | دقت طبقه بندی | حساسیت | ویژگی | انتخابی بودن |
|-----------------------------|---------------|--------|-------|--------------|
| گرفتگی شبکه ها              | 97.53         | 91.8   | 94.91 | 98.11        |
| اتصال شل بین لوله ها 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 لوله ها              | 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 طبقه بندی انفیس با استفاده از ویژگی های انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک

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

| کلاس های واقعی              | گرفتگی شبکه ها | اتصال شل بین لوله ها و شبکه | نشستی سیال خنک کاری | خرابی درب | گرفتگی لوله ها | رادیاتور سالم |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------|-----------|----------------|---------------|
| کلاس های پیش بینی شده       | 56             | 2                           | 0                   | 0         | 0              | 1             |
| گرفتگی شبکه ها              | 56             | 2                           | 0                   | 0         | 0              | 1             |
| اتصال شل بین لوله ها 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