

جداسازی و تشخیص خطا در توربین گازی از دیدگاه کیفی مبتنی بر روش تحلیل وقایع با برازش فازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

کد مقاله: ۳۴۳۵۷

احسان خاکی^۱

چکیده

از آنجا که هرگونه خطا و عیب در توربین گاز و در عملیات و سامانه های کنترل و حفاظت آن هزینه های سنگینی را در پی دارد. تشخیص و شناسایی عیب یک مسئله بسیار مهم اقتصادی و ایمنی در توربین های گازی است و با شناسایی و تشخیص به موقع عیب و رفع آن قبل از رخداد خرابی می توان از خسارات و هزینه های بالای آن جلوگیری نمود. هدف از انجام این تحقیق جداسازی و تشخیص خطا در توربین گازی از دیدگاه کیفی مبتنی بر روش تحلیل وقایع با برازش فازی می باشد. روش تجزیه و تحلیل کیفی وقایع یک روش مهم برای عیب‌یابی و تشخیص خطاست. مهمترین بخش‌های مورد استفاده در آنالیز وقایع، بکارگیری تکنیک‌هایی است که بتوان برای شناسایی رویدادها به شرط داشتن نگاهت مناسب در شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار بگیرد که می توان به روش دو نیمه سازی فاصله اشاره نمود. در این تحقیق از روش مدلسازی فازی نیز استفاده می کنیم که گستره منطبق فازی برنامه های کاربردی بسیاری را در حوزه وقایع به دست آورده است. خطاهای مربوط به پیاده سازی و شبیه سازی شامل خطای مربوط به Actuator، خطاهای مربوط به Plant، خطاهای مربوط به Sensor می باشد. احتمال وقوع خطاهای مختلف در توربین‌گازی به دلیل پیچیدگی بالا بسیار زیاد است. از معروفترین خطاها در توربین‌گازی می‌توان به خطای آلودگی، خوردگی و آسیب دیدگی شیر سوخت اشاره نمود و همچنین در این تحقیق از شبیه ساز توربین گاز نیز استفاده می شود. خطاهای مورد بررسی که مهم‌ترین خطا های توربین‌گاز می باشند شامل آلودگی پره های کمپروسور، خطای سنسور ترموکوپل خروجی و آسیب دیدگی نشت بندهای روغن در بخش توربین می باشند. نتایج تحقیق نشان می دهد که با تکه تکه و تعریف نمودن روش های بهینه کننده اجزاء الگوریتم را در بالا بردن قدرت تحلیلی، قطعیت در تشخیص و افزایش سرعت بهبود نمود.

واژگان کلیدی: توربین گازی، برازش فازی، تشخیص خطا در توربین گازی

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، رشته برق، گرایش کنترل

شناسایی و تشخیص عیب مهم ترین اصل در پایش وضعیت توربین گاز است که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. توربین های گازی نقشی بسیار مهم و حیاتی در صنایع نفت، گاز و نیرو ايفا می کنند. مدیریت رفتارهای دینامیکی و پیچیده توربین های گازی نیازمند سامانه های کنترل، حفاظت و پایش وضعیت توربین گاز با قابلیت اطمینان انعطاف در برنامه ریزی و دسترسی پذیری بالاست. (Xie, 2023) از آنجا که هرگونه خطا و عیب در توربین گاز و در عملیات و سامانه های کنترل و حفاظت آن هزینه های سنگینی را در پی دارد. تشخیص و شناسایی عیب یک مسئله بسیار مهم اقتصادی و ایمنی در توربین های گازی است و با شناسایی و تشخیص به موقع عیب و رفع آن قبل از رخداد خرابی می توان از خسارات و هزینه های بالای آن جلوگیری نمود. در سامانه های پایش توربین های گازی حجم عظیمی از داده های ارزشمند توسط حس گرهای نصب شده بر روی توربین تولید و ثبت می شوند و بدون آنکه پردازش شوند بلا استفاده رها می شوند. در حالی که با توسعه ابزارها و تکنیک های داده کاوی می توان الگوها و روابط پنهان در لا به لای داده ها را استخراج و در جهت شناسایی به موقع عیب و پیشگیری از خرابی و خاموشی توربین همچنین اصلاح و ارتقا طراحی توربین های جدید اقدام نمود. قنادیان پور (۱۳۹۷) در تحقیقی به بیان اینکه توربین های گازی ماشین های پیشرفته ای هستند که در صنعت امروزی بسیار پر کاربرد می باشند. توربین گازی مدل-SGT 600 از محصولات شرکت زیمنس آلمان بوده که در نیروگاه ها و صنایع نفت و گاز کشور به وفور در حال بهره برداری است و ما در این تحقیق آن را مورد بررسی قرار خواهیم داد. در دسترس بودن و حفظ عملکرد صحیح این گونه سیستم ها بسیار حائز اهمیت است. برای دستیابی به این مهم نیاز به سیستم دقیقی جهت تشخیص و عیب یابی خطاهای توربین بوده که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. برای رسیدن به این هدف شبکه های عصبی دینامیک (DNN) ارائه شده تا مدل دینامیک توربین آموخته شود. رویکرد تشخیص و جداسازی خطا در برگزیده DNN های چندگانه است که هر کدام بیان کننده ی حالت های کاری متفاوت شامل شرایط مطلوب و مشکل دار می باشد. با استفاده از مقادیر باقیمانده ی ایجاد شده توسط مقایسه هر خروجی شبکه و خروجی حاصل از سیستم، یک الگو برای تشخیص خطا در اجزای سیستم ارائه شده است. کارایی و موفقیت نتیجه های تشخیص و جداسازی در شناسایی اجزای خطا، اساساً به کیفیت و صحت اندازه گیری داده ها وابسته می باشد. ما در بحث اعتبارسنجی داده ها از شبکه های عصبی خودکار (ANN) بهره برده ایم چرا که این شبکه های عصبی در اعتبارسنجی داده ها بسیار سودمند بوده و جهت فیلترینگ سیگنال و همچنین برای تصحیح خطای سنسور بسیار پر کاربرد هستند. (Yu, 2022) توربین های گازی نقش بسیار مهم و حیاتی در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و نیرو ايفا می کنند. مدیریت رفتارهای دینامیکی و پیچیده توربین های گازی نیازمند سامانه های کنترل حفاظت و پایش وضعیت توربین گاز با قابلیت اطمینان انعطاف برنامه ریزی و دسترسی پذیری بالاست از آنجا که هرگونه عیب در توربین گاز و در عملیات و سامانه های کنترل و حفاظت آن عواقب سنگینی را در پی دارد. (De Giorgi, 2022) وقتی پایش یک توربین گاز به اجرا می رسد حجم زیادی از داده های اندازه گیری شده وجود دارند که با سرعت فرکانس زیادی تولید و در بانک اطلاعاتی سیستم کنترل ذخیره می شوند. انجام عملیات هم زمان تشخیص و شناسایی عیب با تکیه بر کار فقط اپراتور امری کاملاً غیر ممکن است. روش های گذشته مبتنی بر مدل سازی توربین و کشف عیب به دلیل حجم بالای داده هایی که از ثبت سیگنال حس گرهای متعدد نصب شده بر روی توربین گاز تولید می شوند عملاً غیر ممکن می باشد. (Hadroug, 2022) با توسعه فناوری های جدید نظیر داده کاوی، ضرورت کاربرد چنین فناوری هایی در صنعت پایش توربین گازی بیش از پیش احساس می شود. تاکنون آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت بهترین آلیاژها برای ساخت قطعات توربین بوده اند، اما حتی با بهینه کردن ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژها امکان دستیابی به کلیه خواص مطلوب مورد نظر وجود ندارد لذا برای مقاوم سازی این آلیاژها در برابر خوردگی داغ، اکسیداسیون، سایش و تنش های حرارتی پوشش هایی در سطح آن ها صورت می گیرد. (Sadowski, 2016) یک نوع از پوشش های کارآمد برای این منظور پوشش سد حرارتی است. این پوشش ها در واقع نوعی از مواد مقاوم در برابر حرارت هستند که بواسطه مزایایی مانند مقاومت سایشی بسیار بالا مقاومت به خوردگی عایق سازی حرارتی و هدایت حرارتی پایین کاربرد گسترده ای در اجزای به کار رفته در موتورهای احتراقی درون سوز موتورهای جت و توربین های گازی دارند. توربین های گازی نقش مهمی در تولید انرژی دارند یک توربین گازی مشتمل بر سه بخش اصلی کمپرسور، محفظه احتراق و توربین است در این سیستم کمپرسور نقش تأمین دبی هوای مورد نیاز جهت احتراق محفظه احتراق نیز وظیفه ترکیب سوخت با هوا و عمل احتراق و توربین نیز تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی را بر عهده دارد. (Yari, 2013) پره های توربین در یک نیروگاه گازی توسط گاز داغ حاصل از احتراق سوخت در محفظه احتراق به چرخش در می آید پره های توربین گازی (خصوصاً پره های ردیف اول (توربین از آلیاژ مخصوصی ساخته می شوند تا تحمل دماهای بالا حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد) را داشته باشند باید توجه داشت که تنظیم دمای گاز داغ ورودی به پره های ردیف اول توربین از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورت تنظیم این پارامتر در نقطه کاری کمتر از نقطه کار بهینه سبب کاهش توان تولیدی توربین گاز کاهش بهره وری و در صورت تنظیم در نقطه کاری بیشتر از نقطه کار بهینه سبب تخریب پره های توربین می گردد. (Kumar, 2013) لذا مدل سازی

دمای گاز داغ ورودی توربین گازی می تواند در افزایش بهره وری و تعمیرات پیشگیرانه توربین گازی نقش مهمی داشته باشد. بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال جداسازی و تشخیص خطا در توربین گازی از دیدگاه کیفی مبتنی بر روش تحلیل وقایع با برازش فازی بود.

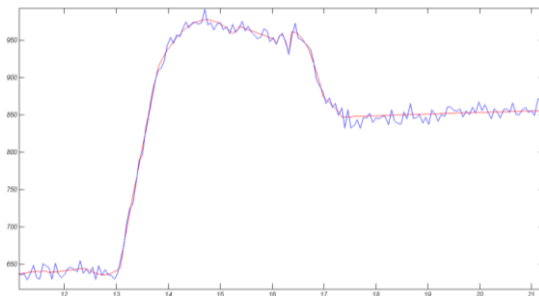
۲- روش تحقیق

روش تجزیه و تحلیل کیفی وقایع یک روش مهم برای عیب‌یابی و تشخیص خطاست. مهمترین بخش‌های مورد استفاده در آنالیز وقایع، بکارگیری تکنیک‌هایی است که بتوان برای شناسایی رویدادها به شرط داشتن نگاهت مناسب در شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار بگیرد که می توان به روش دو نیمه سازی فاصله اشاره نمود. اطلاعات ثبت شده از سنسورهای سیمولاتور توربین‌گازی به عنوان *Data base* در کتابخانه ای ذخیره سازی شده است. پردازش اطلاعات بر روی آن‌ها به صورت "offline" انجام می‌پذیرد. برای نویز اندازه‌گیری از نویز گوسین در خروجی سنسورهای سیمولاتور استفاده می شود. برای تخمین پارامترهای مجهول چند جمله‌ای از معادله رگرسیون خطی استفاده می‌شود. برای سنجش میزان خطا با یک معیار مناسب از روش F_{test} استفاده می‌گردد. در این تحقیق از روش مدلسازی فازی نیز استفاده می‌کنیم که گستره منطق فازی برنامه‌های کاربردی بسیاری را در حوزه وقایع به دست آورده است. در این رویکرد سه نوع از سنجش مورد بررسی قرار می‌گیرد که شامل تطبیق شباهت بین دو الگو، سنجش شباهت بین دو ترند یا واقعه، سنجش شباهت کلی بین دو سناریوی خطا می باشد. برای فرآیند‌های چند متغیره سنجش تشابه کلی، بین دو سناریو می‌بایست. در همه سنسورها در نظر گرفته شود. *AND* فازی با استفاده از اپراتور *min* اجرا شده و این به دلیل این است که در دسته بندی خطاها، نیازمند حداقل تفاوت‌ها هستیم. خطاهای مربوط به پیاده سازی و شبیه سازی شامل خطای مربوط به *Actuator*، خطاهای مربوط به *Plant*، خطاهای مربوط به *Sensor* می باشد. احتمال وقوع خطاهای مختلف در توربین‌گازی به دلیل پیچیدگی بالا بسیار زیاد است. از معروفترین خطاها در توربین‌گازی می‌توان به خطای آلودگی، خوردگی و آسیب دیدگی شیر سوخت اشاره نمود و همچنین در این تحقیق از شبیه ساز توربین گاز نیز استفاده می شود. خطاهای مورد بررسی که مهم‌ترین خطاهای توربین‌گازی می باشند شامل آلودگی پره‌های کمپرسور، خطای سنسور ترموکوپل خروجی و آسیب دیدگی نشت بندهای روغن در بخش توربین می باشند.

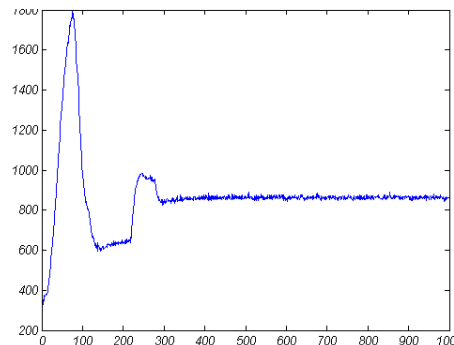
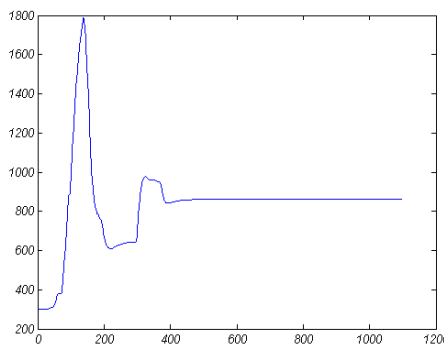
۳- یافته‌ها

۳-۱- شبیه سازی نویز اندازه‌گیری

طبق نتایج نمودار ۱ سیستم توربین‌گازی با پارامترهای دقیق (بدون نویز) مدل‌سازی شده و چون داده‌های صنعتی به دلایل مختلف در دسترس نمی باشند داده های مهم توربین‌گازی با یک منبع نویز گوسی، جمع بسته می‌شوند و سیگنال خروجی نویزدار متغیر با زمان تولید شده و امکان خطاهای مهم یک نیروگاه گازی به صورت شبیه سازی با دسترسی به نویز را فراهم می‌آورند.



نمودار ۱. منحنی آغشته به نویز گوسی به همراه بردار برآزش شده بر روی آن



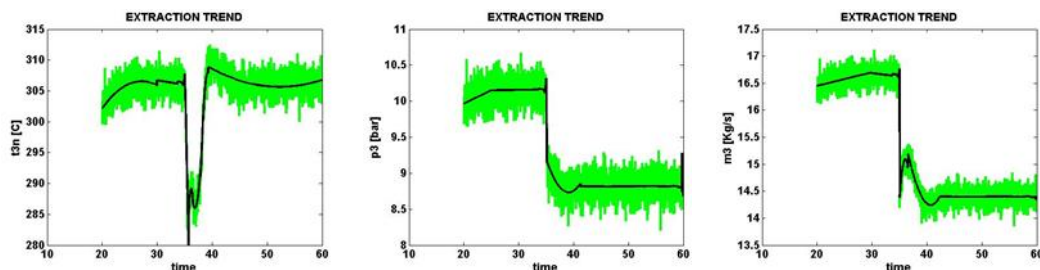
نمودار ۲. دمای خروجی توپین گاز در دو حالت ایده آل (بدون نویز) و آغشته به نویز با واریانس ۵۰

۲-۳- شناسایی و تشخیص خطا

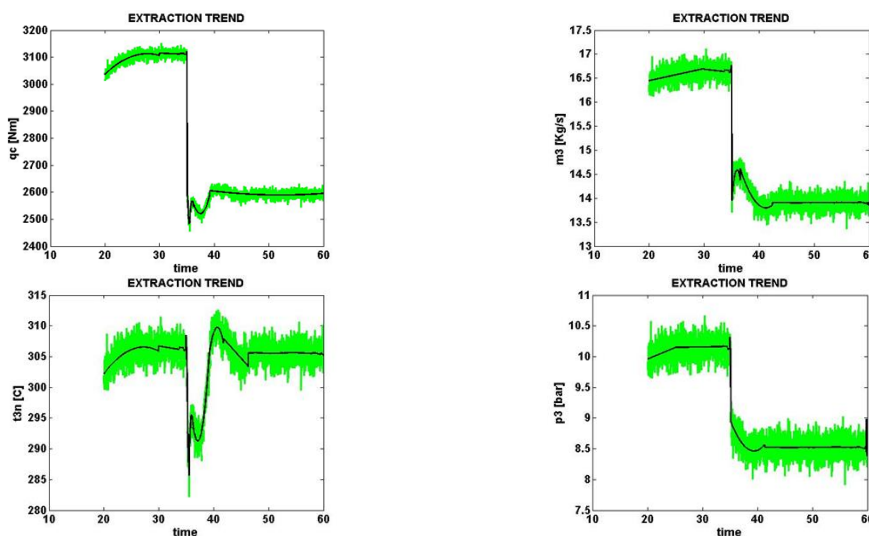
نتایج جدول ۱ نشان می دهد که به تعداد پنج سیگنال به ازای هر سنسور در سطوح مختلف خطایی الگوریتم استخراج ترند شروع به استخراج الگوهای اولیه از سیگنالها را نموده و به ترتیب با اجرای شبیه ساز یکی از خطاهای تعریف شده برای توربین دنباله‌ای از الگوهای اولیه شامل شماره و طول سگمت، علامت های مشتق اول و دوم برای هر سگمت و ستون الگوهای اولیه در کتابخانه‌ای ذخیره شده که با در نظر گرفتن اجرای هر سه خطای e_1, e_2 و e_3 ضبط کلیه سیگنال ها، پایگاه داده‌ای آماده و در دسترس خواهد بود. با اجرای الگوریتم فازی و سنجش تشابه بین الگوهای سیگنال ناشناخته و الگوهای پایگاه داده‌ای میزان شباهت نزدیکی با داده‌های پایگاه نشان از وقوع خطای مربوطه را خواهد داد.

جدول ۱. نمونه‌ای از داده های ذخیره شده در کتابخانه

شماره سگمت	طول سگمت	مشتق اول	مشتق دوم	نام الگوی اولیه
1	833	0.083626	-4105.83	'D'
2	312	-0.01182	0	'F'
3	68	-0.01255	0	'F'
4	33	0.034637	0	'C'
5	4	0.295438	0	'C'
6	2	-428.917	0	'F'
7	16	-0.6471	0	'F'
8	16	-2.4092	0	'F'
9	32	-1.9283	4409387	'E'
10	63	0.149232	0	'C'
11	122	0.246181	94192.44	'B'
12	114	0.710967	-237422	'D'



نمودار ۳. خطای کثیفی پره های کمپرسور به میزان صفر درصد خطا (نرمال)



نمودار ۴. خطای کثیفی پره‌های کمپرسور به میزان $\pm 2\%$ خطا

طبق نتایج نمودار ۳ و ۴ برای داشتن سیگنال خروجی غالب از ستون similarity1&2max نیز ماکزیمم گرفته تا تعداد سیگنال‌های غالب و موثر در انتخاب نوع خطا تعیین شود که در این مورد تعداد سیگنال غالب بیشترین حد یعنی مقدار ۴ عدد ثبت شده است.

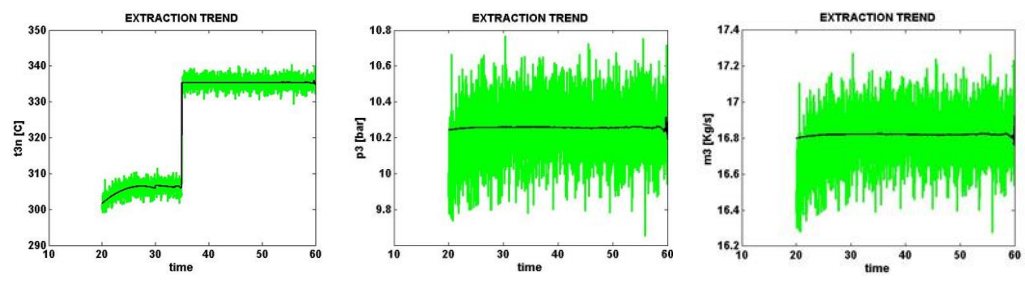
جدول ۲. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای کثیفی پره‌های کمپروسور نرمال

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity1&2 max	Similarity max	Trend no
e1 (کمپروسور، کثیفی کلاهک)	qe	-20.00%	0.6041667	0.943873	0.9438729	0.9438729	1
	m3	-20.00%	0.75	0.852345	0.8523449		...
	t3n	-20.00%	0.6136364	0.914157	0.9141566		...
	p3	-20.00%	0.8333333	0.845138	0.8451381		...
	qe	-10.00%	0.6153846	0.939334	0.9393343	0.9393343	1
	m3	-10.00%	0.75	0.852345	0.8523449		...
	t3n	-10.00%	0.6666667	0.88401	0.8840103		...
	p3	-10.00%	0.8333333	0.845138	0.8451381		...
	qe	0.00%	1	1	1	1	1
	m3	0.00%	1	1	1		2
	t3n	0.00%	1	1	1		3
	p3	0.00%	1	1	1		4
	qe	10.00%	0.6153846	0.615385	0.6153846	1	...
	m3	10.00%	1	1	1		2
	t3n	10.00%	0.7777778	0.7777778	0.7777778		...
	p3	10.00%	1	1	1		4
qe	20.00%	0.75	0.9315	0.9315	1	...	
m3	20.00%	1	1	1		2	
t3n	20.00%	0.6923077	0.915152	0.9151515		...	
p3	20.00%	1	1	1		4	

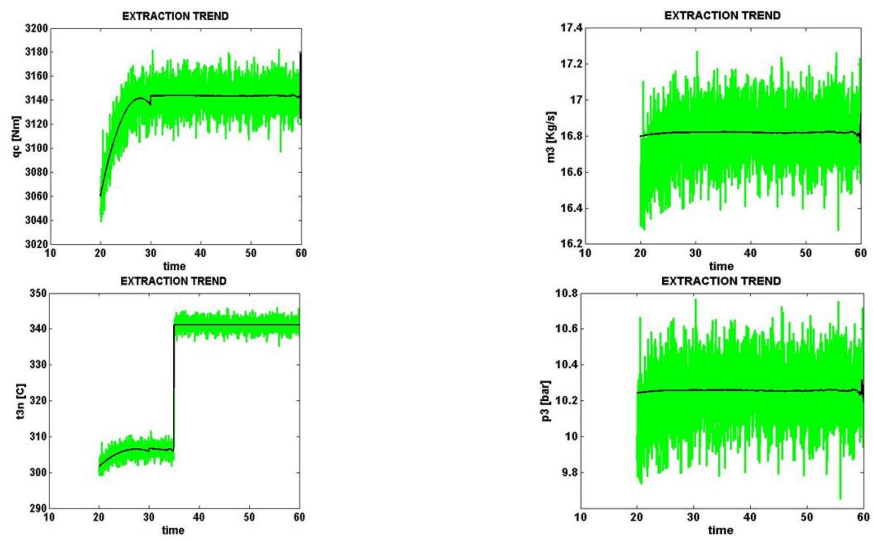
جدول ۳. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای کثیفی پره‌های کمپروسور، به میزان ۲۰٪+ خطا

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity1&2 max	Similarity max	Trend no
e1 (کمپروسور، کثیفی کلاهک)	qe	-20.00%	0.5625	0.90073284	0.900732845	0.90073	1
	m3	-20.00%	0.75	0.85234493	0.852344932		...
	t3n	-20.00%	0.5	0.85	0.85		...
	p3	-20.00%	0.83333333	0.84513806	0.845138055		...
	qe	-10.00%	0.625	0.88797092	0.887970919	0.88797	1
	m3	-10.00%	0.75	0.85234493	0.852344932		...
	t3n	-10.00%	0.625	0.85009004	0.850090036		...
	p3	-10.00%	0.83333333	0.84513806	0.845138055		...
	qe	0.00%	0.75	0.75	0.75	1	...
	m3	0.00%	1	1	1		2
	t3n	0.00%	0.69230769	0.69230769	0.692307692		...
	p3	0.00%	1	1	1		4
	qe	10.00%	0.85714286	0.92802809	0.928028087	1	...
	m3	10.00%	1	1	1		2
	t3n	10.00%	0.67105263	0.80559724	0.805597239		...
	p3	10.00%	1	1	1		4
qe	20.00%	1	1	1	1	1	
m3	20.00%	1	1	1		2	
t3n	20.00%	1	1	1		3	
p3	20.00%	1	1	1		4	

نتایج حاصل از جداول ۳ و ۲ نشان می‌دهد به هنگام وقوع خطای e1 به میزان صفر و ۲۰ درصد مطابق با آنچه که گفته شد و نیز داده‌های جداول در هر دو حالت مقدار به دست آمده نسبت به سایر مولفه‌های همین ستون بیشترین حد یعنی عدد ۱،۰ را شامل شده است و این یعنی بیشترین و نزدیکترین میزان شباهت به الگوی خطای e1.



نمودار ۵. خطای ایجاد شده حاصل از عیب در سنسور ترموکوپل به میزان صفر درصد خطا (نرمال)



نمودار ۶. خطای ایجاد شده حاصل از عیب در سنسور ترموکوپل به میزان +۲۰ درصد خطا

طبق نتایج نمودارهای ۵ و ۶ سیگنال‌های نمونه برداری شده از چهار قسمت مختلف توربین گازی با وقوع خطای e2 (خطای سنسور ترموکوپل) با سطح نرمال صفر درصد مشابه همین شرط با سطح خطای زیاد (+۲۰٪) را نشان می‌دهد.

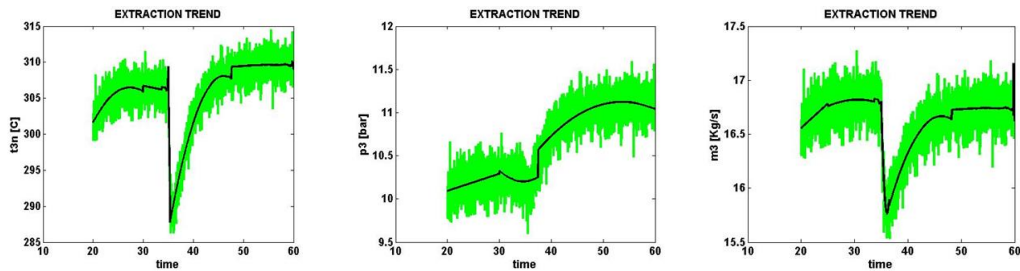
جدول ۴. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای سنسور ترموکوپل به میزان صفر درصد خطا

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity 1&2 max	Similarity max	Trend no
خطای سنسور ترموکوپل خروجی e2	qe	-20.00%	1	1	1	1	1
	m3	-20.00%	1	1	1		2
	t3n	-20.00%	1	1	1		3
	p3	-20.00%	1	1	1		4
	qe	-10.00%	1	1	1	1	1
	m3	-10.00%	1	1	1		2
	t3n	-10.00%	1	1	1		3
	p3	-10.00%	1	1	1		4
	qe	0.00%	1	1	1	1	1
	m3	0.00%	1	1	1		2
	t3n	0.00%	1	1	1		3
	p3	0.00%	1	1	1		4
	qe	10.00%	1	1	1	1	1
	m3	10.00%	1	1	1		2
	t3n	10.00%	1	1	1		3
	p3	10.00%	1	1	1		4
qe	20.00%	1	1	1	1	1	
m3	20.00%	1	1	1		2	
t3n	20.00%	1	1	1		3	
p3	20.00%	1	1	1		4	

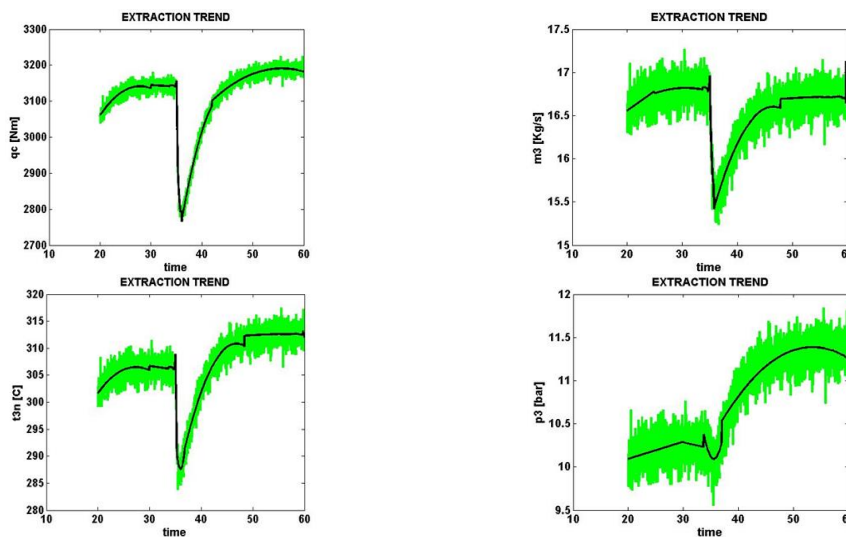
جدول ۵. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای سنسور ترموکوپل به میزان ۲۰٪ درصد خطا

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity 1&2 max	Similarity max	Trend no
خطای سنسور ترموکوپل خروجی e2	q _e	-20.00%	1	1	1	1	1
	m ₃	-20.00%	1	1	1		2
	t _{3n}	-20.00%	1	1	1		3
	p ₃	-20.00%	1	1	1		4
	q _e	-10.00%	1	1	1	1	1
	m ₃	-10.00%	1	1	1		2
	t _{3n}	-10.00%	1	1	1		3
	p ₃	-10.00%	1	1	1		4
	q _e	0.00%	1	1	1	1	1
	m ₃	0.00%	1	1	1		2
	t _{3n}	0.00%	1	1	1		3
	p ₃	0.00%	1	1	1		4
	q _e	10.00%	1	1	1	1	1
	m ₃	10.00%	1	1	1		2
	t _{3n}	10.00%	1	1	1		3
	p ₃	10.00%	1	1	1		4
	q _e	20.00%	1	1	1	1	1
	m ₃	20.00%	1	1	1		2
	t _{3n}	20.00%	1	1	1		3
	p ₃	20.00%	1	1	1		4

نتایج جداول ۴ و ۵ نشان می دهد که در این مورد به دلیل تشابه کلی سیگنال ها در همه حالات که بیشینه مقادیر میزان تشابه و بیشینه حد سیگنال های غالب عدد ۱,۰ می باشد. نیازمند انتخاب سایر خروجی دمایی خواهیم بود به نحوی که بتواند در خطاهای مختلف پاسخ منطقی بدهد.



نمودار ۷. خطای ایجاد شده حاصل از آسیب دیدگی نشت بندهای روغن به میزان صفر درصد خطا (نرمال)



نمودار ۸. خطای ایجاد شده آسیب دیدگی نشت بندهای روغن به میزان ۲۰٪

با توجه به نتایج نمودارهای ۷ و ۸ سیگنال‌های نمونه برداری شده از چهار قسمت مختلف توربین گازی با وقوع خطای e3 (آسیب دیدگی نشت بندهای روغن) با سطح نرمال صفر درصد مشابه همین شرط با سطح خطای زیاد (+۲۰٪) را نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای آسیب دیدگی نشت بندهای روغن توربین حالت نرمال

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity 1&2 max	Similarity max	Trend no	
آسیب دیدگی نشت بندهای روغن در بخش توربین e3	q _e	-20.00%	0.75	0.906581741	0.906581741	1	...	
	m ₃	-20.00%	0.681818182	0.941626651	0.941626651		...	
	t _{3n}	-20.00%	0.71875	0.982472046	0.982472046		...	
	p ₃	-20.00%	1	1	1	1	4	
	q _e	-10.00%	0.75	0.906581741	0.906581741		...	
	m ₃	-10.00%	1	1	1		2	
	t _{3n}	-10.00%	0.71875	0.982472046	0.982472046	1	...	
	p ₃	-10.00%	1	1	1		4	
	q _e	0.00%	1	1	1		1	1
	m ₃	0.00%	1	1	1	2		
	t _{3n}	0.00%	1	1	1	3		
	p ₃	0.00%	1	1	1	1	4	
	q _e	10.00%	1	1	1		1	1
	m ₃	10.00%	0.818181818	0.970888355	0.970888355			...
	t _{3n}	10.00%	1	1	1	3		
	p ₃	10.00%	0.5	0.727272727	0.727272727	1	...	
q _e	20.00%	1	1	1	1		1	
m ₃	20.00%	0.818181818	0.970888355	0.970888355			...	
t _{3n}	20.00%	0.722222222	0.960864309	0.960864309		...		
p ₃	20.00%	0.5	0.727272727	0.727272727	1	...		

جدول ۷. نتایج مقایسه میزان شباهت با خطای آسیب دیدگی نشت بندهای روغن توربین به میزان ۲۰٪ درصد

Fault name	Out put (sensor data)	Fault ratio (%)	Similarity #1	Similarity #2	Similarity 1&2 max	Similarity max	Trend no	
آسیب دیدگی نشت بندهای روغن در بخش توربین e3	q _e	-20.00%	0.75	0.906581741	0.906581741	0.970738295	...	
	m ₃	-20.00%	0.681818182	0.970738295	0.970738295		2	
	t _{3n}	-20.00%	0.694444444	0.959202176	0.959202176		...	
	p ₃	-20.00%	0.5	0.727272727	0.727272727	0.970888355	...	
	q _e	-10.00%	0.75	0.906581741	0.906581741		...	
	m ₃	-10.00%	0.818181818	0.970888355	0.970888355		2	
	t _{3n}	-10.00%	0.694444444	0.959202176	0.959202176	1	...	
	p ₃	-10.00%	0.5	0.727272727	0.727272727		...	
	q _e	0.00%	1	1	1		1	1
	m ₃	0.00%	0.818181818	0.970888355	0.970888355	...		
	t _{3n}	0.00%	0.722222222	0.960864309	0.960864309	...		
	p ₃	0.00%	0.5	0.727272727	0.727272727	1	...	
	q _e	10.00%	1	1	1		1	1
	m ₃	10.00%	1	1	1			2
	t _{3n}	10.00%	0.722222222	0.960864309	0.960864309	...		
	p ₃	10.00%	1	1	1	1	4	
q _e	20.00%	1	1	1	1		1	
m ₃	20.00%	1	1	1			2	
t _{3n}	20.00%	1	1	1		1	3	
p ₃	20.00%	1	1	1	4			

نتایج جداول ۶ و ۷ نشان می‌دهد که بیشترین حد تشابه (عدد ۱,۰) و بیشترین تعداد سیگنال غالب (مقدار ۴) مربوط به خطای e3 بوده و بیانگر وقوع خطای آسیب دیدگی نشت بندهای روغن می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

طبق نتایج نمودار ۱ سیستم توربین گازی با پارامترهای دقیق (بدون نویز) مدل‌سازی شده و چون داده‌های صنعتی به دلایل مختلف در دسترس نمی‌باشند داده‌های مهم توربین گازی با یک منبع نویز گوسی، جمع بسته می‌شوند و سیگنال خروجی نویزدار متغیر با زمان تولید شده و امکان خطاهای مهم یک نیروگاه گازی به صورت شبیه‌سازی با دسترسی به نویز را فراهم می‌آورد نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که به تعداد پنج سیگنال به ازای هر سنسور در سطوح مختلف خطایی الگوریتم استخراج ترند شروع به استخراج الگوهای اولیه از سیگنال‌ها را نموده و به ترتیب با اجرای شبیه‌سازی یکی از خطاهای تعریف شده برای توربین دنباله‌ای از الگوهای اولیه شامل شماره و طول سگمنت، علامت‌های مشتق اول و دوم برای هر سگمنت و ستون الگوهای اولیه در کتابخانه‌ای ذخیره شده که با در نظر گرفتن اجرای هر سه خطای $e1, e2, e3$ ضبط کلیه سیگنال‌ها، پایگاه داده‌ای آماده و در دسترس خواهد بود. با اجرای الگوریتم فازی و سنجش تشابه بین الگوهای سیگنال ناشناخته و الگوهای پایگاه داده‌ای میزان شباهت نزدیکی با داده‌های پایگاه نشان از وقوع خطای مربوطه را خواهد داد طبق نتایج نمودار ۳ و ۴ برای داشتن سیگنال خروجی غالب از ستون $similarity1\&2max$ نیز ماکزیمم گرفته تا تعداد سیگنال‌های غالب و موثر در انتخاب نوع خطا تعیین شود که در این مورد تعداد سیگنال غالب بیشترین حد یعنی مقدار ۴ عدد ثبت شده است نتایج حاصل از جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهد به هنگام وقوع خطای $e1$ به میزان صفر و ۲۰ درصد مطابق با آنچه که گفته شد و نیز داده‌های جداول در هر دو حالت مقدار به دست آمده نسبت به سایر مولفه‌های همین ستون بیشترین حد یعنی عدد ۱,۰ را شامل شده است و این یعنی بیشترین و نزدیکترین میزان مشابهت به الگوی خطای $e1$. طبق نتایج نمودارهای ۵ و ۶ سیگنال‌های نمونه برداری شده از چهار قسمت مختلف توربین گازی با وقوع خطای $e2$ (خطای سنسور ترموکوپل) با سطح نرمال صفر درصد مشابه همین شرط با سطح خطای زیاد (20%) را نشان می‌دهد. نتایج جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در این مورد به دلیل تشابه کلی سیگنال‌ها در همه حالات که بیشینه مقادیر میزان تشابه و بیشینه حد سیگنال‌های غالب عدد ۱,۰ می‌باشد. نیازمند انتخاب سایر خروجی دمایی خواهیم بود به نحوی که بتواند در خطاهای مختلف پاسخ منطقی بدهد. با توجه به نتایج نمودارهای ۷ و ۸ سیگنال‌های نمونه برداری شده از چهار قسمت مختلف توربین گازی با وقوع خطای $e3$ (آسیب دیدگی نشت بندهای روغن) با سطح نرمال صفر درصد مشابه همین شرط با سطح خطای زیاد (20%) را نشان می‌دهد. نتایج جداول ۶ و ۷ نشان می‌دهد که بیشترین حد تشابه (عدد ۱,۰) و بیشترین تعداد سیگنال غالب (مقدار ۴) مربوط به خطای $e3$ بوده و بیانگر وقوع خطای آسیب دیدگی نشت بندهای روغن می‌باشد. به دلیل شفاف و قابل فهم بودن الگوریتم تحلیل وقایع برای اپراتورها و مهندسان، میدان برای ورود عوامل بهینه‌کننده در این حوزه باز و گسترده است و از آنجایی که در کلیت اجزا الگوریتم تشخیص خطا، نوعی یکپارچگی وجود دارد و در عین حال فواصل بین اجزا به راحتی قابل تفکیک است. می‌توان با تکه‌تکه و تعریف نمودن روش‌های بهینه‌کننده اجزاء الگوریتم را در بالا بردن قدرت تحلیلی، قطعیت در تشخیص و افزایش سرعت بهبود نمود.

۴-۱- پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود که از روش‌های متنوع و نوینی در جهت بهینه‌سازی الگوریتم صورت پذیرد که شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در عرصه شناسایی و تشخیص خطا بود.

منابع

۱. حسین قنادیان پور، امیر اسمعیلی ابهریان (۱۳۹۷) تشخیص و عیب‌یابی قدرتمند خطا بر پایه مدل در توربین گازی صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، دانشکده فنی و مهندسی
2. Xie, J., Sage, M., & Zhao, Y. F. (2023). Feature selection and feature learning in machine learning applications for gas turbines: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105591.
3. Yu, H., Gao, H., He, Y., Lin, Z., & Xu, X. (2022). A novel motor fault diagnosis method based on principal component analysis (PCA) with a discrete belief rule base (DBRB) system. *Measurement Science and Technology*, 34(3), 035012
4. De Giorgi, M. G., Strafella, L., Menga, N., & Ficarella, A. (2022). Intelligent Combined Neural Network and Kernel Principal Component Analysis Tool for Engine Health Monitoring Purposes. *Aerospace*, 9(3), 118.
5. Hadroug, N., Hafaifa, A., Alili, B., & et al. (2022). Fuzzy Diagnostic Strategy Implementation for Gas Turbine Vibrations Faults Detection: Towards a Characterization

of Symptom–fault Correlations. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 10, 225–251.

6. Sadowski, T. and Golewski, P. (2016). Cracks path growth in turbine blades with TBC under thermo mechanical cyclic loadings, *Frattura ed Integrita Strutturale*, 35, 492-499.
7. Yari, M. ; Aliyari Shoorehdeli, M. ; Yousefi, I. (2013). “V94.2 gas turbine identification using neural network RoboOcs and Mechatronics (ICRoM), 2013
8. Kumar, A. , Banerjee, A., Srivastava, A. Goel, A. (2013). “Gas turbine engine operational data analysis for anomaly detection: Statistical vs neural network approach.” *Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on.