تأسیس ۱۳۰۷

# دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

**دانشکده مهندسی برق**

**پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل**

## عنوان:

# توسعه و شبیه سازی سیستم پایش عملکرد و تشخیص خطا در اجزای مختلف توربین گازی V94.2 با کمک روش فیلتر کالمن

**نگارش: امین سالار**

**استاد راهنما: پرفسور علی خاکی صدیق**

**بهمن ۱۳۸۹**

به نام خداوند بخشنده مهربان

تقدیم به هموطنان ایرانی، به خانواده و همسر عزیزم

به امید سودمندی

**با تقدیر و تشکر از:**

**جناب آقای پرفسور علی خاکی صدیق، استاد راهنمای گرانقدر که همواره در تمامی مراحل کار راهنما و مشوق اینجانب بوده اند.**

**جناب آقای مهندس مهرداد حسینی که راهنمایی های ایشان در پیش برد این پژوهش نقشی بسیار مفید و ارزنده داشت.**

**جناب آقای مهندس هیوا خالدی، مدیریت محترم فنی و مهندسی شرکت توربوتک که با مساعدت ها و راهنمایی های ارزشمندشان انجام این پژوهش را میسر ساختند.**

**چکیده:**

در این پژوهش بر اساس روش آنالیز مسیر گاز، تئوری‌های تخمین غیر خطی و طبقه بندی فازی، یک سیستم جامع برای تشخیص خطا در توربین‌های گازی صنعتی توسعه داده شد. روش ترکیبی پیشنهادی متشکل از دو بخش است. در بخش اول تغییر در پارامترهای سلامت توربین گازی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته از روی تغییرات نویزی خروجی‌های سنسوری به دست می‌آید. پارامترهای سلامت مانند بازده و ظرفیت جریان اجزاء توربین در واقع شاخص های نشان دهنده وضعیت سلامت آن اجزاء هستند. در بخش دوم از خروجی فیلتر کالمن به عنوان ورودی یک سیستم فازی استفاده می‌شود. این سیستم می‌تواند عیوب فیزیکی از قبیل جرم گرفتگی و خوردگی را بر اساس قوانین از پیش تعیین شده که عمدتا از داده‌های تجربی و شبیه سازی‌های آئروترمودینامیکی به دست می‌آیند جداسازی کرده و تشخیص دهد.

نسبت تغییر در پارامترهای سلامت مختلف ناشی از عیوب فیزیکی مختلف و همچنین در نواحی مختلف کمپرسور که بیشتر تحت تاثیر این عیوب هستند از عوامل کلیدی برای توسعه این قوانین هستند. سیستم استنتاج فازی بخش معیوب و محل و شدت عیب را در کمپرسور یا توربین مشخص می کند. همچنین ، پیشنهادات کاربرپسندی برای زمان شستشوی کمپرسور و یا تعمیر قطعات از طرف سیستم ارائه می شود. این فرایند در واقع یک راه حل ترکیبی برای آشکارسازی و جداسازی خطا در توربین گازی ارائه می کند و با فیلتر کردن داده‌های ورودی سیستم استنتاج فازی توسط فیلتر کالمن، دقت سیستم تشخیص عیب بهبود می‌یابد.

مدل مورد استفاده یک مدل صفر بعدی از یک توربین گازی واقعی و شبیه سازی شده در شرکت مهندسی توربوتک می‌باشد. این مدل با استفاده از تکنیک stage stacking و در شرایط طراحی و خارج طراحی و در حالت پایدار تولید شده است. نتایج شبیه سازی‌های غیر خطی، تخمین‌ها و طبقه بندی‌ها برای نشان دادن اثر این روش ارائه شده است.

روش پیشنهادی در این پژوهش با استفاده از داده‌های جمع آوری شده از شبیه سازی عیوب واقعی در یک توربین گازی واقعی اعتباربخشی شده است. نتایج به دست آمده حاکی از توانایی بالای فیلتر کالمن توسعه یافته برای تشخیص افت عملکرد و تغییرات پارامترهای سلامت اجزاء مختلف توربین گازی است. همچنین توانایی سیستم طبقه بندی و جداسازی فازی برای تفکیک نوع و شدت عیوب فیزیکی به وجود آمده اثبات شده است.

## فهرست مطالب


۱ مقدمه ..... ۱۳

۱-۱ توربین‌های گازی و اهمیت آنها در صنعت جهان و کشور ..... ۱۳

۱-۲ اهمیت عملکرد بهینه توربین از لحاظ اقتصادی و تاثیر عیوب در آن ..... ۱۴

۱-۳ روش‌های کلی پایش سلامت و تشخیص خطا و کاربرد آنها..... ۱۵

۱-۳-۱ تعریف و دسته بندی عملیات نظارتی و پایش سلامت ..... ۱۵

۱-۳-۲ تعریف خطا و انواع آن ..... ۱۶

۱-۳-۳ مفاهیم مختلف در بحث تشخیص خطا ..... ۱۷

۱-۳-۴ مروری بر روش‌های کلی تشخیص خطا..... ۱۸

۱-۳-۵ خصوصیات مطلوب یک سیستم تشخیص خطا ..... ۲۱

۱-۴ روش‌های پایش سلامت و نگهداری توربین‌های گازی ..... ۲۴

۱-۴-۱ مروری بر روش‌های کلی تعمیر و نگهداری ادوات صنعتی ..... ۲۴

۱-۴-۲ مروری بر روش‌های پایش سلامت توربین‌های گازی ..... ۲۵

۱-۵ مروری بر پژوهش‌های مرتبط با پایش سلامت مبتنی بر عملکرد در توربین گازی ..... ۲۸

۱-۵-۱ تاریخچه تشخیص خطا در توربین‌های گازی ..... ۲۸

۱-۵-۲ توربین گازی و اجزاء آن ..... ۲۸

۱-۵-۳ روند توسعه روش‌های مبتنی بر عملکرد ..... ۲۹

۱-۶ مروری بر پژوهش‌های مرتبط با روش فیلتر کالمن در پایش سلامت توربین گازی ..... ۳۴

۱-۷ اهداف این پژوهش و شرح مختصری از کار ..... ۳۹

۲ تشخیص خطا و پایش سلامت در توربین‌های گازی ..... ۴۳

۲-۱ تحلیل نظری روش پایش سلامت مبتنی بر عملکرد به وسیله آنالیز مسیر گاز..... ۴۳

۲-۱-۱ اهمیت و کاربرد روش پایش سلامت مبتنی بر عملکرد در توربین‌های گازی ..... ۴۳

۲-۱-۲ نظریه آنالیز مسیر گاز ..... ۴۵

۲-۱-۳ نحوه انتخاب پارامترها ..... ۴۶

۲-۱-۴ تصحیح پارامترها ..... ۴۷

۲-۱-۵ پیش شرط‌های مورد نیاز و محدودیت‌ها..... ۴۷

۲-۱-۶ بهبود روش آنالیز مسیر گاز ..... ۵۰
۲-۲ نظریه فیلتر کالمن ..... ۵۱
۲-۲-۱ تاریخچه فیلترهای کالمن ..... ۵۱
۲-۲-۲ فیلتر کالمن گسسته ..... ۵۱
۲-۲-۳ الگوریتم فیلتر کالمن گسسته ..... ۵۳
۲-۲-۴ پارامترهای فیلتر کالمن و تنظیمات آن ..... ۵۵
۲-۲-۵ فیلتر کالمن توسعه یافته ..... ۵۵
۲-۳ شبیه سازی یک مدل ساده دینامیکی توربین و بررسی کارایی فیلتر کالمن ..... ۵۹
۲-۳-۱ معرفی اجمالی مدل ساده توربین گازی ..... ۵۹
۲-۳-۲ شبیه سازی و تخمین حالت ..... ۶۰
۲-۳-۳ نتایج حاصل از شبیه سازی‌های ابتدایی ..... ۷۰
۳ توسعه سیستم تخمین افت عملکرد با فیلتر کالمن و مطالعه موردی یک توربین گازی صنعتی .. ۷۳
۳-۱ مدل ..... ۷۳
۳-۲ ساختار سیستم تشخیص خطا ..... ۷۶
۳-۳ نتایج شبیه سازی‌ها با روش تک نقطه کار ..... ۷۷
۳-۴ روش چند نقطه کار و نتایج شبیه سازی‌ها با استفاده از این روش ..... ۸۳
۴ طبقه بندی و تشخیص عیوب فیزیکی در توربین گازی به روش طبقه بندی فازی ..... ۸۹
۴-۱ عیوب فیزیکی در توربین‌های گازی و افت عملکرد ناشی از آنها ..... ۸۹
۴-۱-۱ طبقه بندی عیوب فیزیکی ..... ۸۹
۴-۱-۲ تعریف و تحلیل کمی عیوب فیزیکی ..... ۹۰
۴-۱-۳ تاثیر خطاهای فیزیکی در منحنی‌های مشخصه ترمودینامیکی اجزاء توربین ..... ۹۸
۴-۱-۴ خلاصه ..... ۱۰۰
۴-۲ طبقه بندی و ایزولاسیون عیوب با روش طبقه بندی فازی ..... ۱۰۱
۴-۲-۱ خصوصیات مسئله طبقه بندی و ایزولاسیون عیوب ..... ۱۰۱
۴-۲-۲ جداول اثر عیب ..... ۱۰۲
۴-۲-۳ ایزولاتور عیب فازی ..... ۱۰۳

۴-۲-۴ ورودی‌ها و خروجی‌های فازی ..... ۱۰۴
۴-۲-۵ قواعد فازی برای ایزولاسیون خطا در کمپرسور ..... ۱۰۸
۴-۲-۶ نتایج ایزولاسیون فازی عیوب در کمپرسور ..... ۱۱۰
۴-۲-۷ قواعد فازی برای ایزولاسیون خطا در توربین ..... ۱۱۲
۴-۲-۸ نتایج ایزولاسیون فازی عیوب در توربین ..... ۱۱۲
۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۱۶
پیوست: لیست کامل قوانین مورد استفاده در سیستم جداساز عیب فازی .....۱۱۹
لیست مقالات ارائه شده .....۱۲۹
مراجع .....۱۳۱

## فهرست جدول‌ها و تصاویر


شکل ۱-۱: روندتوسعه توربین گاز در گذشته، حال و آینده نسبت به دیگر روشهای تولید توان ..... ۱۳

شکل ۱-۲: نمایی از توربین گازی GT10 ..... ۱۴

شکل ۱-۳: انواع خطا از نظر زمان وقوع ..... ۱۷

شکل ۱-۴: شمای کلی یک سیستم تشخیص خطای مبتنی بر افزونگی تحلیلی (مدل)..... ۱۹

شکل ۱-۵: تقسیم بندی روش‌های مختلف تشخیص خطا ..... ۲۱

شکل ۱-۶: نمایی از یک موتور توربوجت به عنوان یک توربین گازی و مسیر عبور گاز در آن..... ۲۹

شکل ۱-۷: روند فرآیند تشخیص عیب مبتنی بر عملکرد توربین‌های گازی ..... ۴۱

شکل ۲-۱: نمایی از یک توربین دو محوره و محل و اندیس سنسورها در آن..... ۴۷

شکل ۲-۲: حلقه بازگشتی معادلات در فیلتر کالمن..... ۵۴

شکل ۲-۳: نمایی از یک فیلتر کالمن گسسته ..... ۵۵

شکل ۲-۴: نمایی از مدل ساده یک توربین گازی ..... ۵۹

شکل ۲-۵: مدل توربین گازی با کنترلرهای سرعت و دمای گازهای خروجی..... ۶۰

شکل ۲-۶: نمودار سرعت دوران محور توربین(N)..... ۶۱

شکل ۲-۷: نمودار دمای خروجی توربین ($x_6$)..... ۶۱

شکل ۲-۸: نمودار جریان سوخت توربین($W_f$)..... ۶۲

شکل ۲-۹: نمودار تخمین سرعت دوران محور توربین (N)..... ۶۳

شکل ۲-۱۰: نمودار تخمین دبی سوخت ($W_f$)..... ۶۳

شکل ۲-۱۱: نمودار تخمین دمای خروجی توربین ($x_6$)..... ۶۳

شکل ۲-۱۲:نمودار تخمین سرعت دوران محور توربین با وجود خطای عملگر ..... ۶۵

شکل ۲-۱۳: نمودار تخمین دبی سوخت با وجود خطای عملگر ..... ۶۶

شکل ۲-۱۴: نمودار تخمین دمای خروجی توربین با وجود خطای عملگر..... ۶۶

شکل ۲-۱۵: نمودار تخمین سرعت دوران محور توربین با وجود خطای سنسور سرعت..... ۶۷

شکل ۲-۱۶: نمودار تخمین دبی سوخت با وجود خطای سنسور سرعت..... ۶۷

شکل ۲-۱۷:نمودار تخمین دمای خروجی توربین با وجود خطای سنسور سرعت ..... ۶۸

شکل۲-۱۸: نمودار تخمین سرعت دوران محور توربین با وجود خطای فرآیند $f_2$ ..... ۶۹
شکل۲-۱۹: نمودار تخمین دبی سوخت با وجود خطای فرآیند $f_2$ ..... ۶۹
شکل۲-۲۰: نمودار تخمین دمای خروجی توربین با وجود خطای فرآیند $f_2$ ..... ۷۰
شکل۳-۱: مدل توربین تک محور V94.2 ..... ۷۳
شکل۳-۲: ساختار سیستم تشخیص خطا ..... ۷۶
شکل۳-۳: افت عملکرد واقعی در کمپرسور و توربین در پیکربندی چهار پارامتری ..... ۷۷
شکل۳-۴: تخمین افت عملکرد در کمپرسور و توربین در پیکربندی چهار پارامتری ..... ۷۸
شکل۳-۵: افت عملکرد واقعی در بخش ابتدایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (با روش تک نقطه کار) ..... ۷۹
شکل۳-۶: تخمین افت عملکرد در بخش ابتدایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (باروش تک نقطه کار) ..... ۷۹
شکل۳-۷:افت عملکرد واقعی در بخش انتهایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (باروش تک نقطه کار) ..... ۸۰
شکل۳-۸: تخمین افت عملکرد در بخش انتهایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (باروش تک نقطه کار) ..... ۸۰
شکل۳-۹: افت عملکرد واقعی در بخش ابتدایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (با روش تک نقطه کار) ..... ۸۱
شکل۳-۱۰: تخمین افت عملکرد در بخش ابتدایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (باروش تک نقطه کار) ..... ۸۱
شکل۳-۱۱: افت عملکرد واقعی در بخش انتهایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (با روش تک نقطه کار) ..... ۸۲
شکل۳-۱۲: تخمین افت عملکرد در بخش انتهایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (با روش تک نقطه کار) ..... ۸۲
شکل۳-۱۳: تخمین افت عملکرد در بخش ابتدایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (با روش چند نقطه کار) ..... ۸۵
شکل۳-۱۴: تخمین افت عملکرد در بخش انتهایی کمپرسور در پیکربندی شش پارامتری (باروش چند نقطه کار) ..... ۸۵

شکل۳-۱۵: تخمین افت عملکرد در بخش ابتدایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (بـاروش چنـد نقطه کار) ..... ۸۶
شکل۳-۱۶: تخمین افت عملکرد در بخش انتهایی توربین در پیکربندی شش پارامتری (بـاروش چنـد نقطه کار) ..... ۸۶
شکل۴-۱: تاثیر جرم گرفتگی بر پره‌های یک توربین گازی ..... ۹۱
شکل۴-۲: نمودار تغییرات بازده کمپرسور GT10B و تاثیر شستشو در آن ..... ۹۲
شکل۴-۳: تاثیر فرسایش فیریکی بر لبه پره‌های توربین گازی ..... ۹۴
شکل۴-۴: تاثیر فرسایش فیزیکی بر پارامترهای سلامت و منحنی‌های مشخصه کمپرسور ..... ۹۵
شکل۴-۵: تاثیر اصابت جسم خارجی بر پره‌های توربین گازی ..... ۹۷
شکل۴-۶: منحنی‌های مشخصه ترمودینامیکی جرم گرفتگی کمپرسور ..... ۹۹
شکل۴-۷: منحنی‌های مشخصه ترمودینامیکی فرسایش فیزیکی توربین ..... ۱۰۰
شکل ۴-۸: تاثیر جرم گرفتگی بر طبقات مختلف کمپرسور ..... ۱۰۲
شکل۴-۹: رسوب ذرات کربن بر روی طبقات ۱ تا ۶ کمپرسـور یـک تـوربین صـنعتی بعـد از ۱۶۵۰۰ ساعت کار ..... ۱۰۳
شکل ۴-۱۰: تاثیر خوردگی بر طبقات مختلف کمپرسور ..... ۱۰۳
شکل۴-۱۱: نمای ایزولاتور عیب فازی کمپرسور ..... ۱۰۴
شکل۴-۱۲: چیدمان پارامترهای سلامت و سنسورها در توربین گازی ..... ۱۰۵
شکل ۴-۱۳: توابع عضویت و متغیرهای زبانی ورودی سیستم FFI ..... ۱۰۶
شکل ۴-۱۴: توابع عضویت و متغیرهای زبانی خروجی بخش کمپرسور سیستم FFI ..... ۱۰۷
شکل ۴-۱۵: توابع عضویت و متغیرهای زبانی خروجی بخش توربین سیستم FFI ..... ۱۰۸
شکل ۴-۱۶: نقشه طبقه بندی عیوب کمپرسور ..... ۱۰۹
شکل ۴-۱۷: سطوح خروجی سیستم طبقه بندی فازی برای عیوب کمپرسور ..... ۱۱۱
شکل ۴-۱۸: نقشه طبقه بندی عیوب توربین ..... ۱۱۲
شکل ۴-۱۹: سطوح خروجی سیستم طبقه بندی فازی برای عیوب توربین ..... ۱۱۳
شکل ۴-۲۰: سطح خروجی فازی که برای ورودی (Large-, Small) میزان خروجی Erosion را بیشتر از میزان واقعی تشخیص میدهد ..... ۱۱۴

فصل اول

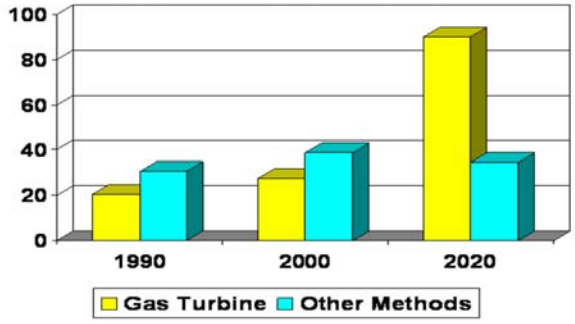
# مقدمه

# ۱ مقدمه

## ۱-۱ توربین‌های گازی و اهمیت آنها در صنعت جهان و کشور

از ساخت اولین نیروگاه‌های تولید برق بیش از یک قرن می‌گذرد. راندمان اولین نیروگاه‌ها کمتر از ۳ درصد بود. نیروگاه‌های اولیه معمولاً بر پایه سیکل رانکین و به صورت تعریف شناخته شده سیکل بخار کار می‌کردند. راندمان نسبتاً پایین این نیروگاه‌ها و همچنین هزینه بالای سرمایه گذاری اولیه و بهره برداری و تعمیرات، تمایل به سمت سیکل‌های جایگزین را بیشتر می‌کرد. تا قبل از دهه ۸۰ میلادی، توربین‌های گازی بیشتر فقط برای تامین بار پیک شبکه برق وارد مدار می‌شدند. از اوایل دهه ۷۰ میلادی، توربین گازهای از نوع بار سنگین[1] بعنوان یک وسیله برای تولید توان در بارهای پایه وارد صنعت تولید توان شدند. در حال حاضر سیکل‌های ترکیبی بر پایه سیکل توربین گاز طراحی و ساخته شده اند که راندمان خالص آنها ۶۰ درصد می‌باشد (سازنده: General Electric، مدل: GE 9001H). دلایل مختلفی همچون پیشرفت تکنولوژی، افزایش قیمت سوخت، احتیاج به منابع تولید توان با اطمینان بالا و ... سبب افزایش راندمان نیروگاه‌های حرارتی شده اند. توجه به تولید توان در ابعاد کوچک و با سرمایه گذاری کمتر و راندمان بالا، همواره هدف نهایی طراحان نیروگاه بوده است.

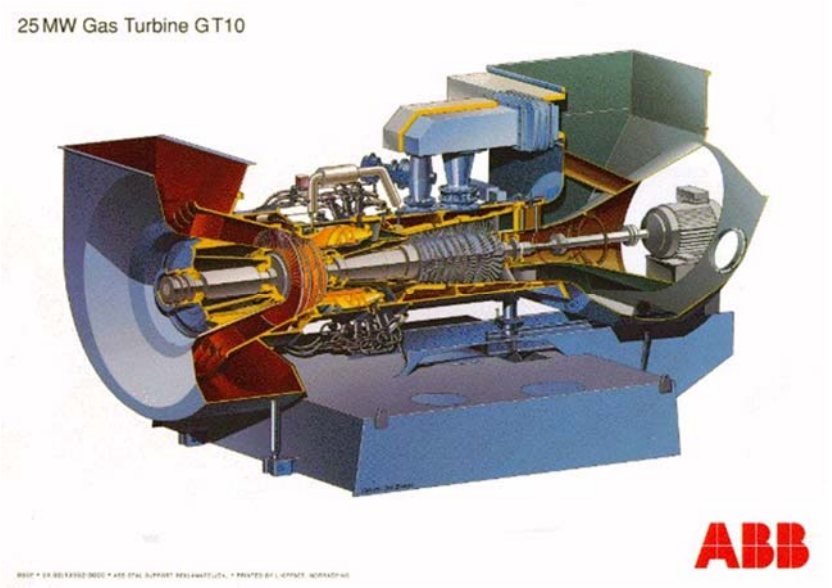
توربین‌های گازی، در حال حاضر، به عنوان بهترین منبع برای تولید توان در مقیاس‌های تولید توان بسیار کم (میکروتوربین‌ها در بازه توانی ۳۰ تا ۲۵۰ کیلووات) تا ابعاد بسیار بزرگ (توربین‌های بار سنگین تا توان ۳۳۴ مگاوات) مطرح می‌باشند. برتری این سیکل‌ها بر سیکل‌های بخار، در این است که سیال کاری مستقیماً از داخل توربین عبور می‌کند و سیال واسطه‌ای وجود ندارد. در حالی که در سیکل‌های بخار، گازهای حاصل از احتراق، حرارت خود را به آب می‌دهند و بخار به عنوان سیال واسط، سبب انجام کار می‌گردد. این مساله سبب می‌شود که توربین گاز، در ابعاد بسیار کوچک، توان تولید بالایی داشته باشد. شکل ۱-۱ چگونگی توسعه ظرفیت توربین‌های گازی را در برابر روش‌های دیگر تولید توان در سال‌های مختلف نشان می‌دهد.




**شکل۱-۱: روندتوسعه توربین گاز در گذشته، حال و آینده نسبت به دیگر روش‌های تولید توان**

[1] heavy duty

در کشور ما نیز از دیرباز توربین‌های گازی در سطح وسیعی در نیروگاه‌ها و خطوط انتقال نفت و گاز طبیعی و همچنین برای چرخاندن پمپ‌ها و کمپرسورهای مختلف در پتروشیمی‌ها و پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته اند. در حال حاضر نیز در دو مجتمع توگا و توربوکمپرسور نفت دو نوع توربین Siemens V94.2 و Siemens SGT600 (GT10B) تحت لیسانس شرکت زیمنس تولید می‌شود. البته این دو نوع توربین تفاوت‌های اساسی از بابت تعداد محور و نوع کاربری دارند. توربین اولی برای تولید برق و توربین دومی برای چرخاندن یک کمپرسور گاز کاربرد دارد. با توجه به مطالب یاد شده، اهمیت شناخت رفتار واقعی یک توربین گاز، شناخت چگونگی کار با آن و چگونگی عملکرد آن در شرایط سایت و عوامل کاهش عملکرد آن نیز از اهمیت بالایی چه برای سازنده توربین و چه برای بهره بردار برخوردار می‌باشد.




**شکل ۱-۲: نمایی از توربین گازی GT10**

## ۱-۲ اهمیت عملکرد بهینه توربین از لحاظ اقتصادی و تاثیر عیوب در آن

با توجه به گسترش روزافزون تولید توان از طریق توربین گاز، اهمیت تولید توان پیوسته و بدون ریسک، بسیار بالا است. رقابت فراوان در بازار توربین گاز سبب گشته است که سازندگان مختلف نه تنها بر روی عملکرد در شرایط طراحی توربین و مقادیر نامی آن حساسیت بالایی داشته باشند، بلکه کارکرد آن در شرایط سایت را نیز به دقت بهینه نمایند. از جمله این موارد تغییر به سمت سیستم‌های کنترلی دمای خروجی از توربین[1](TET) ثابت در بارهای مختلف، استفاده از پره‌های راهنمای ورودی[2](IGV) و همچنین دو بخش نمودن تولید توان در توربین است. لیکن همه انواع

[1] turbine exit temperature

[2] inlet guide vane

توربین‌های گاز در معرض افت عملکردهای گوناگونی در شرایط سایت هستند. این افت عملکرد باعث می‌شود که بهره بردار توان تولیدی بسیار کمتری از آنچه در کاتالوگ توربین آمده است و یا آنچه در ابتدای بهره برداری قابل استحصال بوده است، تحویل نماید. بنابراین بهبود عملکرد توربین در شرایط سایت نیز از اولویتهای اول سازندگان و بهره برداران توربین به صورت توام است.

روش‌های مختلفی برای تعمیرات و نگهداری توربین و بهبود عملکرد آن وجود دارد. باید خاطر نشان ساخت که تعمیرات و نگهداری ماشین تنها به مفهوم جلوگیری از خرابی و یا تعمیر آن جهت عملکرد مجدد نیست، بلکه نگهداری و تعمیرات مفهوم بازیابی عملکرد مناسب اولیه توربین گاز یا هر وسیله دیگری را نیز شامل می‌شود.

## ۱-۳ روش‌های کلی پایش سلامت و تشخیص خطا و کاربرد آنها

### ۱-۳-۱ تعریف و دسته بندی عملیات نظارتی و پایش سلامت

هدف از عملیات نظارتی[1] و پایش سلامت[2] در کنترل اتوماتیک فرآیندهای صنعتی، تشخیص حالت‌های نامطلوب و غیر قابل قبول و به کارگیری راه حل مناسب برای ادامه یافتن روند صحیح، سالم و ایمن فرآیند و اجتناب از خرابی یا سوانح دیگر است. برای نیل به این هدف معمولا عملیات زیر در هر فرآیندصنعتی اجرا می‌شوند[1]:

- پایش: متغیرهای قابل اندازه‌گیری در مقایسه با تلرانس‌های قابل قبول بررسی شده و در صورت نیاز سیگنال‌های اخطار برای اطلاع اپراتور تولید می‌شوند.
- حفاظت خودکار: در صورت وقوع وضعیت خطرناک برای فرآیند، بخش نظارت به صورت خودکار برای حفظ امنیت و سلامت، عکس العمل‌ها و راه حل‌های لازم را به کار می‌گیرد، به عنوان مثال دستور توقف اورژانسی در ماشین آلات[3].
- نظارت به همراه تشخیص خطا: بر پایه متغیرهای اندازه‌گیری شده، تغییرات پارامترهای مشخص کننده سلامت سیستم بر اساس تغییرات این متغیرها محاسبه می‌شوند و عملیات تشخیص خطا اجرا و تصمیمات مناسب اتخاذ می‌شوند.

عملیات اول و دوم به عنوان روش‌های کلاسیک دسته بندی می‌شوند و نقطه قوت آنها سادگی و قابل اطمینان بودن آنهاست. در مقابل آنها فقط در برابر تغییرات نسبتا زیاد حساس هستند و زمانی یک روند تدریجی ایجاد خرابی را تشخیص می‌دهند که زمان زیادی از وقوع آن گذشته باشد، یا

[1] supervisory functions

[2] health monitoring

[3] emergency shutdown

خطای ناگهانی شدیدی بروز کرده باشد، علاوه بر آن یک بررسی دقیق از علت مشکل ایجاد شده هم امکان پذیر نیست. در نتیجه عملیات سوم برای رسیدن به اهداف زیر به اجرا در می‌آید[1]:

- تشخیص زودهنگام خطاهای کوچک با رفتارهای ناگهانی یا تدریجی
- تشخیص خطا در عملگرها، قسمت‌های مختلف فرآیند یا حسگرها
- تشخیص خطای حلقه بسته
- نظارت بر فرآیند در حالت گذرا

**۱-۳-۲ تعریف خطا و انواع آن**

قبل از ورود به مبحث اصلی، یکسان سازی مفهوم و ترجمه فارسی کلمات لازم به نظر می‌رسد. در این پژوهش واژه fault به صورت «خطا» یا «عیب» ترجمه شده است، همچنین واژه failure «خرابی» معنی شده است و در مورد تفاوت این دو مفهوم در پاراگراف زیر توضیح داده شده است.

خطا به صورت یک انحراف ناخواسته حداقل یک مشخصه از یک متغیر از رفتار قابل قبول آن تعریف می‌شود. در نتیجه خطا حالتی است که ممکن است به ناکارآمدی یا خرابی یک سیستم منجر شود[1].

در صورت عدم تشخیص به موقع وقوع یک خطا یا عیب و عدم جلوگیری از پیشروی آن در سیستم، این امر باعث از کارافتادگی یا خرابی یک قسمت و یا کل فرآیند می‌شود. به عنوان مثال وقوع یک سوراخ در مسیر عبور سوخت در یک موتور ممکن است در ابتدا منجر به کاهش نیروی تولیدی توسط موتور شود و درصورتی که این عیب تشخیص داده نشود سبب می‌شود که موتور به طور کامل از کار بیفتد.

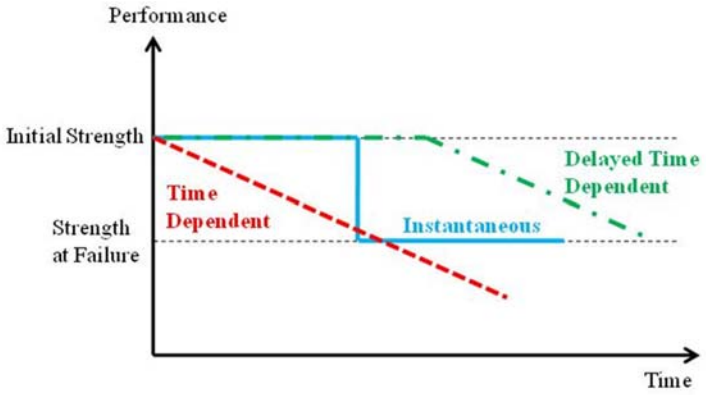
همان گونه که در شکل۱-۳ مشاهده می‌شود سه نوع ازکار افتادگی (خطا) در سیستم به وجود می‌آید. در نوع اول سیستم ابتدا به مدت زمان معینی بدون هیچ گونه اثری از خرابی کار می‌کند ولی پس از گذشت مدتی به صورت ناگهانی دچار خرابی می‌شود. این نوع خطا اصطلاحاً ازکار افتادگی ناگهانی[1] نامیده می‌شود. در نوع دوم سیستم مدتی را بدون نشان دادن هیچ گونه عیبی به خوبی کار می‌کند و به دنبال آن یک سری عیوب با گذشت زمان به وجود می‌آیند و در صورت عدم تعمیر دامنه آنها زیاد شده و در نهایت با گذشت زمان و عدم تعمیر از کارافتادگی و خرابی به وجود می‌آید. این نوع خطا را خطای وابسته به زمان تاخیردار[2] می نامند. در نوع سوم به محض شروع به کار ماشین افت عملکرد شروع می‌شود و در صورت عدم نگهداری و تعمیر منجر به ازکار افتادگی می‌گردد. به این نوع خطا از کار افتادگی وابسته به زمان[3] می‌گویند. خطاهای نوع

[1] instantaneous

[2] delayed time-dependent

[3] time-dependent

دوم و سوم در یک فرآیند به دلیل تاثیری که به تدریج از خود نشان می‌دهند با استفاده از روش‌هایی قابل جلوگیری و بازیابی می‌باشند. بنابراین روش‌های مختلف تعمیرات و نگهداری به صورتی دسته بندی و امتیاز بندی می‌شوند که این نوع خطاها را به حداقل برسانند و برای حداقل کردن آنها کمترین هزینه عملیاتی، مالی و زمانی به فرآیند وارد شود.




**شکل۱-۳: انواع خطا از نظر زمان وقوع**

**۱-۳-۳ مفاهیم مختلف در بحث تشخیص خطا**

در این پژوهش از دو مفهوم در دانش تشخیص خطا صحبت خواهد شد، «آشکارسازی خطا» و «جداسازی خطا». آشکار سازی خطا[1] فرآیندی است که نتیجه آن صرفا اعلام وقوع یا عدم وقوع خطا در سیستم است. از طرف دیگر جدا سازی خطا[2] فرآیندی پیچیده‌تر است که هدف از اجرای آن شناسایی نوع خطا با حداکثر جزئیات از قبیل اندازه، مکان و زمان وقوع است. به مجموعه دو عملیات اشاره شده در بالا آشکار سازی و جداسازی خطا[3] (FDI) یا تشخیص خطا[4] گفته می‌شود. لازم به ذکر تذکر است که این ادبیات در تمام متون مرتبط یکسان نیست و گاهی عبارات به جای یکدیگر به کار می‌روند.

واژه پر کاربرد دیگر در بحث تشخیص خطا «پیش بینی خطا[5]» است. معمولا خطاهای تدریجی موجود در سیستم از یک انحراف کوچک آغاز می‌شوند و کم‌کم بزرگ شده و موجب بروز اختلال در کارایی سیستم و نهایتا خرابی و از کار افتادگی می‌شوند. با داشتن اطلاعات کافی و به کارگیری روش

[1] fault detection

[2] fault isolation

[3] fault detection & isolation

[4] fault diagnosis

[5] fault prognosis

مناسب می‌توان روند تکامل خطا و زمان بندی افزایش انحراف را محاسبه کرد و در نتیجه بازه زمانی‌ای را که در آن می‌توان به کارکرد مفید سیستم مطمئن بود، پیش بینی کرد و زمان تعمیرات و تعویض‌های ضروری را هم از قبل تعیین نمود. پیش بینی خطا در فرآیندهای صنعتی قرابت زیادی با مفاهیم MTBF[1] و MTTF[2] دارد. در واقع با اجرای عملیات پیش بینی خطا می‌توان مقدار این پارامترها را که نشان دهنده زمان کارکرد مفید سیستم بین دو خرابی و به طبع آن تعمیرات است را مشخص کرد. تفاوت MTBF و MTTF این است که در مفهوم اول فرض بر آن است که سیستم خراب سریعا و بدون اتلاف وقت تعمیر می‌شود.

**۱-۳-۴ مروری بر روش‌های کلی تشخیص خطا**

تشخیص خطا در واقع حاصل یک مقایسه است و این مقایسه در بحث آشکارسازی قاعدتا باید بین سیستم مورد بررسی و یک سیستم سالم صورت گیرد. این فرآیند بعد از آشکارسازی در بحث تشخیص و ایزولاسیون میان سیستم مورد بررسی و سیستم‌های معیوب دیگر که عیب آنها مشخص است و هدف مطابقت سیستم با یکی از آنهاست به اجرا در می‌آید. اگر مشخصات سیستم سالم معلوم باشد، هر انحراف غیر منتظره از آن وجود خطا را آشکار می‌کند. کاربرد واژه «غیر منتظره» بدین جهت است که ممکن است این انحراف به دلیل تغییر شرایط کاری باشد که به عنوان عیب در نظر گرفته نمی‌شود و مورد انتظار است. ولی داشتن مشخصات سیستم سالم برای تشخیص کامل و ایزولاسیون خطا کافی نیست، برای به دست آوردن این نوع از اطلاعات مشخصات انواع سیستم‌های معیوب نیز مورد نیاز است تا از طریق مقایسه و مطابقت با آنها بتوان نوع عیب سیستم را تشخیص داد.

وجه تمایز روش‌های مختلف تشخیص خطا در واقع نوع عاملی است که این مشخصات را از سیستم‌های سالم و معیوب در اختیار قرار می‌دهد. این اطلاعات به سه طریق می‌توانند تولید شوند:

- یک سیستم واقعی دیگر با وضعیت معلوم
- یک مدل از سیستم با وضعیت معلوم
- داده‌های تجربی از سیستم با وضعیت معلوم

به تشخیص خطا با استفاده از روش اول، تشخیص با استفاده از افزونگی سخت افزاری[3] گفته می‌شود.در این حالت داده‌های یک سیستم با داده‌های تعداد بیشتری از همان نوع سیستم مقایسه می‌شود و در روشی که به رای گیری[4] مشهور است وجود خطا مشخص می‌شود [2]. برای مثال اگر

[1] mean time between failures

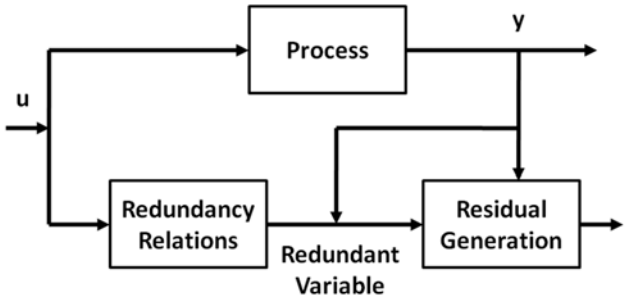
[2] mean time to failure

[3] hardware redundancy

[4] voting

سه سنسور یکسان برای اندازه‌گیری یک کمیت در نظر گرفته شده باشند، اگر یکی از خروجی‌ها از دو خروجی دیگر متفاوت باشد، سیگنال متفاوت به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود و سنسور مرتبط نیز معیوب محسوب می‌شود. روش‌های رای گیری به راحتی قابل اجرا هستند و در شناخت خطاهای مکانیکی سریع عمل می‌کنند ولی ضعف بزرگشان پرهزینه بودن و فضای زیادی است که اشغال می-کنند.

به دلیل هزینه زیاد و دیگر مشکلات روش اول، روش تشخیص با استفاده از افزونگی تحلیلی[۱] به عنوان روشی مبتنی بر مدل[۲] مطرح می‌شود. در این حالت یک مدل شبیه سازی شده یا مدل ریاضی از سیستم جای سیستم واقعی را می‌گیرد و با استفاده از تحلیل‌های نرم افزاری همان خروجی‌های سخت افزار را تولید می‌کند. بدیهی است بدون هیچ هزینه‌ای می‌توان هر تغییری در این مدل به وجود آورد و شرایط سالم و انواع عیوب را در آن شبیه سازی و خروجی‌ها را بررسی و مقایسه کرد. مسئله‌ای که برای یک سیستم واقعی در اکثر موارد قابل اجرا نیست. در برابر تمام این مزایا مشکل این روش وابستگی آن به داشتن اطلاعات کافی و جامع از سیستم است در حدی که بتوان آن را مدلسازی نموده و پاسخ‌هایی واقعی از آن دریافت کرد. در بسیاری از موارد چنین شناختی از سیستم و فرآیند در دسترس نیست. ولی در صورت موجود بودن چنین مدلی، این روش راه حلی دقیق، جامع، سریع و کم هزینه برای مسئله تشخیص خطا ارائه می‌کند [5-3]. روش‌هایی مانند رویت گرها[۳]، فیلترهای کالمن، معادلات توازنی[۴]، دایگراف‌ها[۵] و درخت خطا[۶] از جمله این روش‌ها هستند.




**شکل۱-۴: شمای کلی یک سیستم تشخیص خطای مبتنی بر افزونگی تحلیلی (مدل)**

[1] analytical redundancy

[2] model-based methods

[3] observers

[4] parity equations

[5] digraph

[6] fault tree

سومین روش برای به دست آوردن مشخصات سیستم و تشخیص خطا، استفاده از داده‌های تجربی[1] است که از کارکرد گذشته همان سیستم یا فرآیندهای مشابه به دست آمده است. داده‌های سیستمی در شرایط مشابه که سالم بودن آن به هر شیوه‌ای قبلا تضمین شده است می‌تواند معیار خوبی برای مقایسه باشد. از طرف دیگر خروجی‌های سیستم‌های مشابه دیگر که قبلا دچار عیوبی شناخته شده بودند می‌تواند مرجع مناسبی برای تشخیص نوع عیب باشند. مزیت این روش مانند روش دوم کم هزینه بودن است و علاوه بر ان نیازمند دانش خاصی از سیستم و فرآیند نیست، به همین دلیل برای تشخیص خطای فرآیندهای پیچیده که شناخت درستی از نحوه عملکردشان موجود نیست و قابل مدلسازی نیستند این روش بهترین گزینه است. در طرف دیگر مشکل این روشی زمانی بروز می‌کند که سیستم شرایط کاری مختلفی داشته باشد و عیوب متنوعی نیز امکان بروز داشته باشند. بدیهی است اصلی‌ترین نیازمندی روش مبتنی بر داده برای ارائه پاسخی جامع، یک بانک اطلاعاتی غنی از داده‌های تجربی سیستم در تمام شرایط مختلف و تمام عیوب مختلف است تا بتوان با مقایسه با انها وضعیت سیستم مورد بررسی را تعیین کرد. در نتیجه اگر چنین بانکی موجود نباشد یا سیستم نقاط کاری متنوعی داشته باشد که در هر کدام خروجی‌های متفاوتی تولید شود و یا عیوب متنوعی در آن امکان بروز داشته باشند، یا سیستم جدیدی باشد، استفاده از روش مبتنی بر داده برای تشخیص خطای آن توصیه نمی‌شود. به عنوان مثالی از این روش‌ها، می‌توان سیستم‌های خبره[2] از جمله فازی[3]، آنالیز کیفی روند[4](QTA)، آنالیز اجزاء اصلی[5](PCA)، طبقه بندی آماری[6] و شبکه‌های عصبی[7] را ذکر کرد.

در مرحله بعد این روش‌ها را می‌توان با علم به اینکه مقایسه در آنها به صورت کیفی یا کمی صورت می‌پذیرد به دو بخش تقسیم کرد. توضیحات بیشتر در مورد روش‌های تشخیص خطا و انواع آنها از افق کاری این پژوهش خارج است و علاقه مندان می‌توانند به مرجع جامع [6] مراجعه کنند. در شکل۱-۵ طبقه بندی نسبتا جامعی از روش‌های مختلف تشخیص خطا و مثال‌هایی از هر کدام به نمایش درآمده است.

---

[1] data-driven methods

[2] expert systems

[3] fuzzy systems

[4] qualitative trend analysis

[5] principal component analysis

[6] statistical classification

[7] neural networks