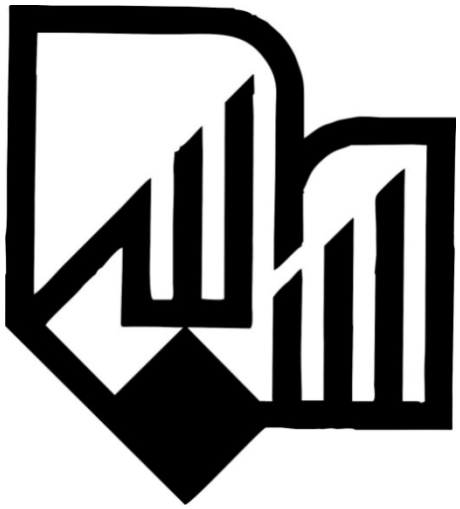

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه تفرش

دانشکده مهندسی صنایع

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع

بهینه‌سازی فواصل بازرسی در استراتژی نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت

استاد راهنما:

آقای دکتر حمیدرضا گل‌مکانی

استاد مشاور:

آقای دکتر بهزاد اشجری

دانشجو:

فهیمه فتاحی‌پور

شهریور ۱۳۸۹

تاریخ : ۱۳۸۹/۶/۳۱
شماره : ۴۵۲۹/۱۰۰۷۶
پیوست : .....

دانشگاه تفرش

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی : فهیمه فتاحی پور شماره دانشجویی : ۸۶۴۱۲۲۰۰۴ دانشکده : مهندسی صنایع

رشته تحصیلی/گرایش : مهندسی صنایع/ مدیریت سیستم و بهره وری

عنوان پروژه : بهینه سازی فواصل بازرسی در استراتژی نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت

تعداد واحد : ۶ تاریخ تصویب : ۸۸/۳/۱۹ تاریخ دفاع : ۸۹/۶/۳۱

نمره نهایی : به عدد : ۲۰ به حروف : بیست تمام

هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	محل اشتغال	امضاء
استاد راهنما	دکتر حمید رضا گل مکانی	استادیار	دانشگاه تفرش	
استاد مشاور	دکتر بهزاد اشجری	استادیار	دانشگاه تفرش	
داور خارجی	دکتر محمد علی کرامتی	استادیار	دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک	
داور داخلی	دکتر ابراهیم شریفی	استادیار	دانشگاه تفرش	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ابراهیم شریفی	استادیار	دانشگاه تفرش	

رئیس دانشکده : دکتر حمید رضا گل مکانی

امضاء :

تاریخ :

مهر :

مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه : دکتر حمید رضا دهقانپور

امضاء :

تاریخ : ۸۹/۶/۳۱

مهر :

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

اکنون که اجرای این پایان‌نامه، به اتمام رسیده است، خداوند متعال را به خاطر تمامی فرصت‌ها و لطف‌های بی‌کرانش، شاکرم و لازم می‌دانم از تمام کسانی که به نحوی در اجرای آن، سهیم می‌باشند قدردانی نمایم.

صمیمانه‌ترین قدردانی و سپاسگزاری خود را تقدیم استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر حمیدرضا گل‌مکانی، می‌نمایم که بدون شکّ، همراهی، حمایت و مساعدت بی‌شائبهٔ ایشان، دلیل اصلی موفّقیّت این پایان‌نامه و تهیّهٔ چهار مقالهٔ علمی-پژوهشی (سه مقالهٔ چاپ‌شده و یک مقالهٔ تحت بررسی)، می‌باشد.

از استاد مشاور محترم، جناب آقای دکتر بهزاد اشجری که همواره پشتیبان من، و همچنین، جناب آقای دکتر محمّدرضا عالم، پزشک محترم بیمارستان جرجانی اصفهان که مشوّق من، در طی اجرای این تحقیق بودند، صمیمانه تشکّر می‌نمایم.

از هم‌دانشگاهی‌های عزیزم، خانم فاطمه جودکی و خانم یاسمن کربلایی‌خانی، که با دوستی خود محیط مناسبی برای اجرای تحقیقات من در محیط خوابگاه فراهم آوردند، سپاسگزارم.

برای همگی از درگاه خداوند بزرگ، توفیق روزافزون، سلامتی و شادکامی، طلب می‌نمایم.

چکیده

در یک برنامهٔ نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت[1]، هنگامی که اجرای بازرسی[2] و تحلیل مشاهدات هزینه‌بر است، کاهش فاصلهٔ زمانی بین اجرای بازرسی‌های متوالی، منجر به افزایش هزینهٔ مربوط به بازرسی‌ها می‌شود و در مقابل، افزایش فاصلهٔ مذکور، افزایش چشمگیری در هزینهٔ احتمالی تعویض‌ها خواهد داشت. بنابراین، علاوه بر استراتژی تعویض، زمان‌بندی بازرسی‌ها با لحاظ هزینهٔ اجرای آن‌ها نیز، در کارایی برنامهٔ مذکور تأثیر دارد. معیار کارایی، متوسّط هزینهٔ کلّ هر واحد زمان، در نتیجهٔ بازرسی‌ها و تعویض به علّت خرابی و یا تعویض پیشگیرانه، در بلندمدّت می‌باشد.

در تحقیق حاضر، به منظور ایجاد و توسعهٔ روش‌هایی برای زمان‌بندی بازرسی‌ها در یک سیستم تحت نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، مدل‌سازی قابلیّت اطمینان[3] و همچنین، مدل‌سازی هزینهٔ چرخهٔ عمر[4] سیستم، با لحاظ هزینهٔ بازرسی، انجام گرفته است. مدل‌سازی‌های مذکور، بر مبنای اصول احتمالات و تحلیل بقا[5]، با استفاده از تجزیه و تحلیل ریاضی، انجام، و منجر به ارائهٔ دو روش جدید در تعیین زمان‌بندی اجرای بازرسی‌ها با لحاظ کمینه‌سازی هزینه‌ها شده است.

در روش اوّل پیشنهادی در این پایان‌نامه، با فرض تساوی فاصلهٔ زمانی بین اجرای بازرسی‌های متوالی و با لحاظ هزینهٔ بازرسی در استراتژی حدّ کنترل[6]، علاوه بر حدّ کنترل بهینه برای تعویض، فاصلهٔ زمانی بهینه بین بازرسی‌های متوالی تعیین می‌گردد. مدل ارائه شده در این دیدگاه، با محاسبهٔ احتمال تعویض سیستم به علّت خرابی و متوسّط فاصلهٔ زمانی بین تعویض‌های متوالی برای فواصل بازرسی دلخواه، نرخ هزینهٔ تعویض برای مجموعه فواصل ممکن بین بازرسی‌های متوالی را محاسبه، و سپس، با ترکیب هزینه‌های تعویض و هزینه‌های بازرسی، متوسّط کلّ هزینه‌ها را برای هر یک از فواصل مذکور، تعیین می‌کند تا با مقایسهٔ مقادیر متوسّط کلّ هزینه‌ها، بتوان بهترین فاصلهٔ بین بازرسی‌ها و حدّ کنترل بهینهٔ متناظر با آن را انتخاب نمود.

در روش دوّم پیشنهادی در این پایان‌نامه، زمان اجرای بازرسی‌ها به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌گردد تا متوسّط هزینهٔ کلّ بازرسی‌ها و تعویض در درازمدّت، در مقایسه با طرح[7] بازرسی با فاصلهٔ ثابت که در آن فاصلهٔ زمانی بین اجرای بازرسی‌های متوالی، مقداری ثابت می‌باشد، کاهش یابد. در این روش، با در نظر گرفتن هزینهٔ بازرسی‌ها و با لحاظ فرض اجرای بازرسی‌ها با فاصلهٔ نابرابر از یکدیگر، یک فرایند تکرار پیشرو[8]، جهت ارزیابی طرح‌های بازرسی ممکن، ارائه می‌گردد. با مقایسهٔ مقادیر متوسّط هزینهٔ کلّ بازرسی‌ها و تعویض، طرح بازرسی مناسب، تعیین می‌گردد. در این روش، زمان بازرسی بعدی بر اساس عمر سپری شدهٔ سیستم تا بازرسی جاری، تخمین زده می‌شود.

برای پیاده‌سازی مدل‌های مذکور و ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم اجرای آن‌ها برنامه‌نویسی شده و برای دستگاه‌های مختلف و با مشخّصات گوناگون، مورد اجرا قرار گرفته است.کد برنامه‌های مذکور، در انتهای این پایان‌نامه آورده شده است.

واژگان کلیدی: نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، استراتژی حدّ کنترل، زمان اجرای بازرسی‌ها، طرح بازرسی بر اساس عمر.

---

[1] Condition-based Maintenance (CBM)
[2] Inspection
[3] Reliability
[4] Life Cycle Costing
[5] Survival Analysis
[6] Control Limit Policy
[7] Scheme
[8] Forward

پیش‌گفتار

نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، به منظور جلوگیری از اجرای فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات غیرضروری در تجهیزات سرمایه‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرد و هدف آن، کاهش هزینهٔ چرخهٔ عمر، افزایش دسترس‌پذیری، بهبود قابلیّت اطمینان و افزایش میزان استفاده از عمر مفید تجهیزات می‌باشد.

برای اجرای نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، از تکنیک‌های پایش وضعیّت سیستم (بازرسی) مانند آنالیز روغن، که وضعیّت فرسایشی سیستم در حال بهره‌برداری و یا محیط پیرامون آن را مورد سنجش قرار می‌دهند، استفاده می‌شود. بالاتر بودن هزینهٔ تعویض به علّت خرابی نسبت به هزینهٔ تعویض پیشگیرانه، و همچنین، هزینه‌بر بودن پیاده‌سازی تکنیک‌های پایش وضعیّت، موجب شده است که زمان‌بندی اجرای بازرسی‌ها، یکی از چالش‌های اساسی در نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت باشد.

با توجّه به این که یکی از اهداف فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، کاهش هزینهٔ چرخهٔ عمر می‌باشد، بازرسی‌ها را می‌توان به عنوان ابزاری برای دسترسی به اطّلاعاتی در مورد وضعیّت فرسایشی سیستم در نظر گرفت تا بر اساس آن اطّلاعات، بهترین زمان اجرای تعویض پیشگیرانه به منظور کاهش هزینهٔ مربوط به خرابی‌های ممکن به دست آید. با توجّه به هزینه‌بر بودن اجرای بازرسی‌ها و همچنین، پایین بودن احتمال خرابی یا تنزّل وضعیّت دادن سیستم با عمر کوتاه، اجرای بازرسی‌ها با فواصل کوتاه نمی‌تواند اطّلاعات مفیدی در مقایسه با هزینهٔ بازرسی‌ها در اختیار ما قرار دهد. هر چند، کاهش تعداد بازرسی‌ها می‌تواند منجر به افزایش احتمال عدم اجرای تعویض پیشگیرانه و در نتیجه افزایش هزینه‌های خرابی شود.

در فصل اوّل این تحقیق، با مروری بر برنامهٔ نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت و مراحل اجرای آن، اهمّیت زمان‌بندی بازرسی‌ها بررسی می‌شود. همچنین، با مرور ادبیّات نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، شامل برخی مفاهیم پایه و یافته‌های دیگر محقّقان، نتایج علمی موجود، بررسی و طبقه‌بندی می‌گردد تا کاستی‌های تحقیقاتی در این حوزه تعیین گردد. در فصل دوّم، استراتژی حدّ کنترل که چارچوب تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهد، مرور می‌شود. در این فصل، بسیاری از فرمول‌ها و قواعد استراتژی مذکور، که به صورت سربسته و کلّی در مراجع مرتبط به آن، ارائه شده است، با جزئیّات کامل مطرح می‌گردد. در فصول سوّم و چهارم، دو مدل پیشنهادی در تعیین زمان اجرای بازرسی‌ها به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت، به طور جامع ارائه خواهد شد. در فصل سوّم، با این فرض که فاصلهٔ بازرسی‌ها ثابت است، بهترین حدّ کنترل و بهترین فاصلهٔ زمانی بین بازرسی‌ها، به گونه‌ای تعیین می‌شود تا متوسّط هزینه‌های تعویض و بازرسی حدّاقل گردد. در فصل چهارم، ابتدا برنامهٔ اجرای بازرسی‌ها بر اساس عمر، معرّفی و سپس، مدل‌سازی جهت تعیین برنامهٔ بازرسی به گونه‌ای که متوسّط هزینه‌ها کاهش یابد، ارائه خواهد شد. در فصل پنجم، ضمن جمع‌بندی نتایج تحقیق، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی، ارائه و در انتها، کلّیهٔ برنامه‌های نوشته‌شده جهت ارزیابی نتایج روش‌های پیشنهادی، در پیوست آورده شده است.

لیست مقالات

از پایان‌نامهٔ حاضر، چهار مقاله به شرح زیر، استخراج شده است:

۱- بهینه‌سازی توأم فواصل بازرسی و حدّ کنترل در نگهداری و تعمیر مبتنی بر شرایط. حمیدرضا گل‌مکانی و فهیمه فتاحی‌پور. پذیرفته‌شده برای چاپ به عنوان مقالهٔ پژوهشی در *مجلهٔ علمی و پژوهشی شریف*. ۱۳۸۹.

2- Optimal Replacement Policy and Inspection Interval for Condition-Based Maintenance. Hamid Reza Golmakani and Fahimeh Fattahipour. Accepted for Publication in *International Journal of Production Research*. 2010.

3- Optimal Replacement Policy with Age-Based Inspection Scheme for Condition-Based Maintenance. Hamid Reza Golmakani and Fahimeh Fattahipour. Accepted to the *11th IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)*. 2010.

4- Age-Based Inspection Scheme for Condition-Based Maintenance. Hamid Reza Golmakani and Fahimeh Fattahipour. Submitted to *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010.

فهرست مطالب

چکیده ..... ب

پیش‌گفتار ..... ج

لیست مقالات ..... د

فهرست مطالب ..... ه

فهرست جداول ..... ح

فهرست شکل‌ها ..... ط

معرّفی نمادها ..... ی

فصل اوّل: مقدّمه ۱

۱-۱ نگهداری و تعمیرات ۱

۱-۲ نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت (CBM) ۲

۱-۳ مراحل اجرای نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت ۲

۱-۳-۱ جمع‌آوری اطّلاعات ۳

۱-۳-۲ پردازش اطّلاعات ۳

۱-۳-۳ تصمیم‌گیری ٤

۱-۳-۳-۱ تصمیم‌گیری در حوزهٔ تشخیص خرابی ٥

۱-۳-۳-۲ تصمیم‌گیری در حوزهٔ پیش‌بینی خرابی ٥

۱-۳-۳-۲-۱ پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده ٥

۱-۳-۳-۲-۲ تخمین زمان اجرای بازرسی‌ها ٥

۱-۴ بررسی دیدگاه‌های موجود در زمینهٔ زمان‌بندی بازرسی‌ها ۸

۱-۵ اهمّیت زمان‌بندی مناسب جهت اجرای بازرسی‌ها در CBM ۸

۱-۶ موضوع تحقیق، هدف اجرا، مفروضات و سؤالات مطرح در آن ۸

۱-۷ تعاریف و مفاهیم ۹

۱-۸ روش و مراحل اجرای پایان‌نامه ۱۰

۱-۹ نتایج اصلی ۱۱

۱-۱۰ ساختار پایان‌نامه ۱۱

فصل دوّم: استراتژی حدّ کنترل ۱۳

۲-۱ مقدمه ۱۳

۲-۲ مقایسهٔ استراتژی حدّ کنترل و استراتژی کلاسیک تعویض بر اساس عمر ۱۳
۲-۳ مفروضات و بخش‌های اصلی استراتژی حدّ کنترل ۱٤
۲-۴ مدل‌سازی آماری برای استراتژی حدّ کنترل ۱٤
۲-۴-۱ تخمین تابع نرخ خرابی ۱٦
۲-۴-۲ مدل احتمال انتقال (TPM) ۱۹
۲-۴-۲-۱ مفهوم احتمال انتقال ۱۹
۲-۴-۲-۲ تخمین احتمال انتقال ۱۹
۲-۴-۲-۳ مثال عددی ۲٦
۲-۵ استراتژی بهینه برای تعویض ۲۸
۲-۵-۱ مدل تصمیم‌گیری ۲۹
۲-۵-۲ مثال عددی ۳۲
۲-۶ نتیجه‌گیری ۳٤
فصل سوّم: بهینه‌سازی توأم فواصل بازرسی و حدّ کنترل در CBM ۳۵
۳-۱ مقدمه ۳٥
۳-۲ مدل‌سازی ۳٦
۳-۲-۱ تخمین تابع قابلیّت اطمینان ۳۷
۳-۲-۱-۱ تخمین $R(j,i,\Delta)$ ۳۷
۳-۲-۱-۲ تخمین $R(k_i-1,i,t_i-(k_i-1)\Delta)$ ۳۸
۳-۲-۲ تخمین توزیع تجمّعی تابع قابلیّت اطمینان ۳۹
۳-۲-۲-۱ تخمین $\int_0^{\Delta} R(j,i,s)ds$ ۳۹
۳-۲-۲-۲ تخمین $\int_0^{t_i-(k_i-1)\Delta} R(k_i-1,i,s)ds$ ۳۹
۳-۳ مثال عددی ٤۲
۳-۴ نتیجه‌گیری ٤٥
فصل چهارم: تعیین طرح بازرسی بر اساس عمر ۴۶
۴-۱ مقدمه ٤٦
۴-۲ مدل‌سازی طرح بازرسی بر اساس عمر ٤۷
۴-۲-۱ بازرسی با فاصلهٔ ثابت در مقایسه با بازرسی بر اساس عمر ٤۷
۴-۲-۲ تعیین طرح بازرسی بر اساس عمر ٤۸
۴-۳ تخمین نرخ هزینه در طرح بازرسی بر اساس عمر ٥٤

۴-۴ مثال عددی ۵۵
۴-۴-۱ تعیین طرح بازرسی بر اساس عمر برای سیستم انتقال حرکت خودرو نوع X2 ..... ۵۶
۴-۴-۲ تحلیل حساسیت طرح بازرسی بر اساس عمر نسبت به هزینهٔ بازرسی ۵۸
۴-۵ نتیجه‌گیری ۵۹
فصل پنجم: جمع‌بندی تحقیق و پیشنهادات ۶۱
فهرست پانوشت‌ها ۶۳
فهرست مراجع ۶۵
پیوست‌ها ۷۰
پیوست I: تخمین نرخ تغییر احتمال انتقال وضعیّت ۷۰
پیوست II: محاسبهٔ تابع قابلیّت اطمینان ۷۱
پیوست III: محاسبهٔ توزیع تجمّعی تابع قابلیّت اطمینان ۷۲
پیوست IV: تخمین متوسّط عمر تعویض ۷۴
پیوست V: کد برنامهٔ Mathematica برای محاسبهٔ حدّ کنترل بهینه ۷۷
پیوست VI: کد برنامهٔ Mathematica برای محاسبهٔ نرخ هزینه به ازاء هر گزینهٔ زمانی دلخواه برای بازرسی بعدی ۷۹
پیوست VII: کد برنامهٔ Mathematica برای تخمین نرخ هزینهٔ یک طرح معیّن بازرسی ۸۲

فهرست جداول

فصل دوّم

جدول 2-1- ماتریس انتقال وضعیّت ارتعاش یک نمونه سیستم ۱۹

جدول 2-2- معادل‌سازی مقادیر آهن با وضعیّت‌های فرضی ۲۶

جدول 2-3- نتایج بازرسی‌ها در سوابق اطّلاعاتی سیستم ۲۶

جدول 2-4- محاسبه حدّ کنترل بهینه به ازاء $\Delta = \mathbf{1}$ و $\boldsymbol{d_0 = 5}$ ۳۳

فصل سوّم

جدول 3-1- محاسبهٔ حدّ کنترل بهینه به ازاء $\Delta = 1$ ۴۳

جدول 3-2- محاسبهٔ حدّ کنترل بهینه به ازاء $\Delta = 2$ ۴۳

جدول 3-3- محاسبهٔ حدّ کنترل بهینه به ازاء $\Delta = 3$ ۴۳

جدول 3-4- مقایسهٔ متوسّط مجموع هزینه‌ها به ازاء فواصل مختلف بین اجرای بازرسی‌های متوالی ۴۴

فصل چهارم

جدول 4-1- محاسبات تعیین حدّ کنترل بهینه ۵۶

جدول 4-2- محاسبات تعیین زمان اوّلین بازرسی ۵۶

جدول 4-3- محاسبات تعیین زمان دوّمین بازرسی ۵۷

جدول 4-4- محاسبات تعیین زمان سوّمین بازرسی ۵۷

جدول 4-5- محاسبات تعیین زمان چهارمین بازرسی ۵۸

فهرست شکل‌ها

فصل دوّم

شکل 2-1- رابطهٔ بین ریسک خرابی و تعویض پیشگیرانه ۲۹
شکل 2-2- استراتژی بهینهٔ تعویض (با فرض $\beta > 1$) ۳۰

فصل سوّم

شکل 3-1- تقسیم‌بندی فاصلهٔ زمانی بین دو بازرسی به زیرفواصلی با طول فاصلهٔ پایه بین بازرسی‌ها ۳۶
شکل 3-2- فاصلهٔ بهینه بین بازرسی‌های متوالی به ازاء هزینه‌های مختلف بازرسی ۴۴

فصل چهارم

شکل 4-1- (a) طرح بازرسی با فاصلهٔ ثابت و (b) طرح بازرسی بر اساس عمر برای یک نمونه سیستم ۴۷
شکل 4-2- گزینه‌های زمانی ممکن برای اجرای بازرسی اوّل ۴۹
شکل 4-3- گزینه‌های زمانی ممکن برای اجرای دوّمین بازرسی، I_2، با فرض اجرای اوّلین بازرسی در I_1 ۵۰
شکل 4-4- طرح بازرسی بر اساس عمر برای سیستم انتقال حرکت خودرو با فرض مقادیر متفاوت برای هزینهٔ بازرسی ۵۹

معرّفی نمادها

بردار تشخیص خرابی که در بازرسی سیستم در زمان t، مشاهده می‌شود	$Z(t)$
فضای وضعیّت فرایند $\{Z(t)\}$	S
متغیّر تصادفی که زمان خرابی سیستم را نشان می‌دهد	T
احتمال سلامت سیستم تا زمان t، و انتقال از وضعیّت i به j در فاصلهٔ زمانی بین s و t	$P_{ij}(s,t)$
احتمال تغییر وضعیّت سیستم از i به j، در فاصلهٔ زمانی بین $k\Delta$ و $(k+1)\Delta$ با شرط عدم خرابی سیستم تا زمان $(k+1)\Delta$	$P_{ij}(k), \left(P^{(\Delta)}(k)\right)_{ij}$
ماتریس انتقال وضعیّت مربوط به kامین بازرسی	$P(k), \quad P^{(\Delta)}(k)$
احتمال بقا در زمان t	$S(t, Z(s), s \le t)$
نرخ خرابی سیستمی که در زمان t در وضعیّت $Z(t)$ قرار دارد	$h\big(t, Z(t)\big)$
تابع نرخ خرابی پایه که تأثیر عمر سیستم در نرخ خرابی را نشان می‌دهد	h_0
تابع مثبتی که تأثیر اطّلاعات پایش وضعیّت را در نرخ خرابی نشان می‌دهد	ψ
پارامتر شکل در توزیع وایبل	β
پارامتر مقیاس در توزیع وایبل	η
وزن (ضریب اهمّیّت) متغیّر تشخیص خرابی در تابع نرخ خرابی	γ
تعداد تغییر وضعیّت، از وضعیّت i به j در بازرسی kام در تمام سوابق اطّلاعاتی سیستم	$n_{ij}(k)$
احتمال این که سیستم در زمان صفر در وضعیّت i_0 باشد	$P_{i_0}(0)$
ماتریس نرخ تغییر احتمال انتقال وضعیّت در زمان s	$\alpha(s)$
یکی از درایه‌های $\alpha(s)$، و معرّف نرخ تغییر انتقال وضعیّت از i به j در زمان s	$\alpha_{ij}(s)$
نرخ تغییر احتمال انتقال در زمان s از وضعیّت i به هر وضعیّت دیگر ممکن (شامل وضعیّت خرابی)	$\alpha_i(s)$
نرخ تغییر احتمال انتقال وضعیّت در زمان s، از وضعیّت i به وضعیّت خرابی	$\alpha_{iF}(s)$
نرخ تغییر وضعیّت از i به j	$\lambda_{ij}(s)$
نرخ تغییر وضعیّت از i به j، وقتی در محدودهٔ زمانی lام در افراز زمان، مقداری ثابت باشد	$\lambda_{ij}^{(l)}$
ماتریس قطری که درایهٔ $(i,i), i \in S$ام آن، معادل نرخ خرابی سیستمی است که $Z(s) = i$	$D(s)$
ماتریسی که $\lambda_{ij}^{(l)}$ها درایه‌هایش را تشکیل می‌دهند	$\Lambda^{(l)}$
نرخ حفظ وضعیّت i	$\lambda_i^{(l)}$
تعداد تمام تغییر وضعیّت‌های مشاهده شده از i به j، در محدودهٔ زمانی lام در افراز زمان	$n_{ij}^{(l)}$
طول مدّت زمانی که سیستم در محدودهٔ زمانی lام در افراز زمان، در وضعیّت i بوده است	$a_i^{(l)}$

ادامهٔ معرّفی نمادها

هزینهٔ اجرای هر تعویض پیشگیرانه	C
هزینهٔ اجرای هر تعویض به علّت خرابی	$C+K$
هزینهٔ اجرای هر بازرسی	C_{ins}
حدّ کنترل برای اجرای تعویض پیشگیرانه	$d,$ d_Δ
حدّ کنترل بهینه برای اجرای تعویض پیشگیرانه	$d^*,$ d_Δ^*
کوچکترین زمانی که در آن، ریسک خرابی سیستم، به حدّ کنترل می‌رسد	$T_d,$ T_{d_Δ}
مقدار بردار تشخیص خرابی نرمالیزه	$Z^c(t)$
تابع حدّ کنترل	$g(t)$
متوسّط هزینه‌های تعویض در واحد زمان	$\varphi(d)$
متوسّط هزینهٔ بازرسی در واحد زمان	φ_{ins}
متوسّط هزینهٔ کلّ مورد انتظار هر واحد زمان، حاصل هزینهٔ بازرسی‌ها و هزینهٔ تعویض	Φ
احتمال تعویض سیستم به علّت خرابی با فرض اجرای استراتژی حدّ کنترل d	$Q(d)$
متوسّط زمان بین دو تعویض با فرض اجرای استراتژی حدّ کنترل d	$W(d)$
کوچکترین زمانی که در آن، ریسک خرابی سیستم با وضعیّت i، به حدّ کنترل می‌رسد	t_i
کوچک‌ترین زمان بازرسی که بزرگ‌تر از زمان t_i می‌باشد	$k_i\Delta$
احتمال تعویض به علّت خرابی سیستمی که عمر آن از $j\Delta$ بیشتر است و $Z(j\Delta)=i$	$Q(j,i)$
متوسّط زمان باقی‌مانده تا تعویض سیستمی که عمر آن از $j\Delta$ بیشتر است و $Z(j\Delta)=i$	$W(j,i)$
احتمال سلامت سیستم تا زمان $j\Delta+t$ به شرطی که عمر آن از $j\Delta$ بیشتر است و $Z(j\Delta)=i$	$R(j,i,t)$
زمان اجرای lامین بازرسی	I_l
وضعیّت سیستم در lامین بازرسی	Z_l
متوسّط هزینهٔ کلّ در طرح بازرسی $I_1,\dots,I_n,I_n+r\Delta,I_n+(r+1)\Delta,\dots$	$TC(r)$
متوسّط عمر تعویض در طرح بازرسی $I_1,\dots,I_n,I_n+r\Delta,I_n+(r+1)\Delta,\dots$	$EC(r)$
نرخ هزینه در طرح بازرسی $I_1,\dots,I_n,I_n+r\Delta,I_n+(r+1)\Delta,\dots$	$CP(r)$
متوسّط هزینهٔ کلّ مربوط به سیستمی که تا lامین بازرسی سالم است و $Z(I_l)=Z_l$	$G(I_l,Z_l)$
زمان مورد انتظار تا تعویض سیستمی که تا lامین بازرسی سالم است و $Z(I_l)=Z_l$	$Y(I_l,Z_l)$
متوسّط هزینهٔ کلّ مورد انتظار هر واحد زمان	ETC

فصل اوّل

مقدّمه

در این فصل، با مروری بر برنامهٔ نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت و مراحل اجرای آن، اهمّیت زمان‌بندی اجرای بازرسی‌ها بررسی می‌شود. در این میان، پیشینهٔ برنامهٔ مذکور، شامل بیان برخی مفاهیم پایه و یافته‌های دیگر محقّقان، ارائه می‌گردد تا با بررسی و طبقه‌بندی نتایج علمی موجود، کاستی‌های تحقیقاتی آن در حوزهٔ موضوع تحقیق پایان‌نامه، تعیین گردد. همچنین، با تأکید بر اهمّیت زمان‌بندی مناسب جهت اجرای بازرسی‌ها و عدم وجود منابع کاربردی مناسب برای مدل‌سازی این زمان‌بندی، به سهم این تحقیق در رفع نقص مذکور، اشاره شده است. در پایان این فصل، ساختار و نحوهٔ تنظیم فصل‌های پایان‌نامه، آمده است.

۱-۱ نگهداری و تعمیرات[9]

نگهداری و تعمیرات، به طور معمول، مترادف با دو دسته از فعّالیّت‌ها در نظر گرفته شده است. ۱) فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[10] که فرایند فرسایش منجر به خرابی یک سیستم را کنترل می‌کنند، زمان‌بندی شده‌اند و اجرای آن‌ها منجر به کاهش احتمال وقوع خرابی و افزایش عمر سیستم می‌شود. ۲) فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات اصلاحی[11] که شامل تعمیر و یا تعویض قسمت‌های خراب می‌باشند و سیستم را بعد از یک خرابی ، به شرایط عملیّاتی بازمی‌گردانند.

در حالت کلّی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را به دو شاخه تقسیم می‌کنند. ۱) نگهداری و تعمیرات بر اساس زمان[12] که شامل اجرای فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در فواصل زمانی ثابت[13] و یا اجرای این فعّالیّت‌ها بر اساس عمر[14] می‌باشد. ۲) نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت که در آن، زمان اجرای فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، با توجّه به وضعیّت سیستم مشخّص می‌شود.

ایراد اساسی استراتژی نگهداری و تعمیرات بر اساس زمان، این است که بخشی از عمر مفید سیستم مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و سیستم قبل از آن که واقعاً به مرحلهٔ بحرانی رسیده باشد تعویض می‌گردد. با این حال، با توجّه به عواقبی که خرابی سیستم به همراه دارد، تعویض پیشگیرانه، توجیه‌پذیر ارزیابی می‌شود [1]. برای رفع این ایراد، از استراتژی نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت استفاده می‌شود. دامنهٔ استفاده از این استراتژی، تا اندازه‌ای گسترده است که بسیاری از تصمیمات در مدیریّت دارایی‌های فیزیکی[15]، با دیدگاه نگهداری و تعمیرات بر اساس قابلیّت اطمینان[16] و با استفاده از خروجی‌های مکرّر نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت گرفته می‌شود. لازم به توضیح است در فرایند تصمیم‌گیری بر مبنای مدیریّت داراییهای فیزیکی، گاهی تا نیمی از بودجهٔ عملیّاتی سالیانه نیز مصرف می‌شود به طوری که مخارج این نوع مدیریّت در صنایع متمرکز بر سرمایه، از قبیل صنایع برق و پتروشیمی، مخارج اصلی به شمار می‌آید [2].

---

[9] Maintenance
[10] Preventive Maintenance(PM)
[11] Corrective Maintenance/Repair
[12] Time Based Maintenance(TBM)
[13] Constant Interval
[14] Age-Based
[15] Physical Asset Management (PAM)
[16] Reliability Centered Maintenance (RCM)

۱-۲ نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت (CBM)

CBM، یک برنامهٔ نگهداری و تعمیرات است که تصمیم‌گیری در آن، بر اساس اطّلاعات به دست آمده از پایش وضعیّت[۱۷] صورت می‌گیرد. پایش وضعیّت که هستهٔ اصلی CBM به شمار می‌رود، به مفهوم سنجش وضعیّت سیستم در حال بهره‌برداری و یا محیط پیرامون آن می‌باشد به گونه‌ای که این سنجش، بیانگر وضعیّت سیستم و یا حاوی اطّلاعات مفیدی برای عیب‌یابی آن باشد. هدف CBM، اغلب بهبود قابلیّت اطمینان سیستم، میزان دسترس‌پذیری[۱۸] و یا هزینه‌های چرخهٔ عمر سیستم می‌باشد. بدین منظور، CBM از فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات غیرضروری، جلوگیری می‌کند و تنها در صورت وجود مدارکی که رفتار غیرعادی سیستم را نشان دهد اجرای فعّالیّت‌های نگهداری و تعمیرات را پیشنهاد می‌کند. همچنین، هنگامی که سیستم مورد مطالعه گران‌قیمت است، مثلاً سیستم انتقال حرکت خودرو (گیربکس)، در مقابل اقلامی ارزان قیمت، مثلاً یک بلبرینگ، CBM سعی می‌کند تا با بازرسی‌های بیشتر و مداوم، اطّلاعات دقیق‌تری از وضعیّت سلامتی سیستم در اختیار کارشناسان نگهداری و تعمیرات قرار دهد تا بعد از رسیدن سیستم به عمر واقعی تعویض و دقیقاً قبل از خرابی آن، نسبت به اجرای عملیّات اصلاحی (تعویض و یا تعمیر) اقدام شود [1].

یک برنامهٔ CBM، اگر به صورت مناسب طرّاحی و اجرا شود، با بهتر پیش‌بینی کردن عمر باقی‌ماندهٔ سیستم و جلوگیری از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانهٔ غیرضروری، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به میزان قابل توجّهی، کاهش می‌دهد [3-4]. همچنین، با اجرای CBM، قابلیّت اطمینان سیستم در مقایسه با اجرایِ سایر روشهای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، بیشتر خواهد بود [5].

پیش‌بینی[۱۹] و تشخیص[۲۰] خرابی، دو جنبهٔ مهمّ یک برنامهٔ CBM می‌باشند. تشخیص خرابی شامل کشف، جداسازی و تعیین هویّت خرابی می‌باشد. کشف خرابی، وجود خطایی را که در سیستم تحت پایش وضعیّت، در حال رخ دادن است، نشان می‌دهد. جداسازی خرابی، محل‌یابی مؤلّفهٔ خراب است و تعیین هویّت خرابی، به تعیین نوع خرابی ایجاد شده، می‌پردازد. در مقابل، پیش‌بینی خرابی، تعیین می‌کند احتمال وقوع چه نوع خرابی نزدیک است و چگونگی رخداد آن را حدس می‌زند. یک برنامهٔ CBM می‌تواند برای پیش‌بینی یا تشخیص خرابی و یا هر دو مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۳ مراحل اجرای نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیّت

CBM شامل ۳ گام اساسی است: ۱) جمع‌آوری اطّلاعات[۲۱] به منظور دست‌یابی به اطّلاعات مربوط به وضعیّت سلامت سیستم، ۲) پردازش اطّلاعات[۲۲] به منظور تحلیل و استفاده از اطّلاعات جمع‌آوری شده در گام ۱، و ۳) تصمیم‌گیری[۲۳] به منظور اتّخاذ استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات کارا.

---

[17] Condition Monitoring
[18] Availability
[19] Prognostic
[20] Diagnostic
[21] Data Acquisition
[22] Data Processing
[23] Maintenance Decision Making

۱-۳-۱ جمع‌آوری اطّلاعات

جمع‌آوری اطّلاعات، فرایندی است به منظور جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌های مفید مربوط به وضعیّت سلامت سیستم در راستای اهداف CBM. این فرایند، گام اساسی در پیاده‌سازی یک برنامهٔ CBM برای تشخیص و پیش‌بینی خرابی می‌باشد و اطّلاعات حاصل از آن، به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱) اطّلاعات پیشامد[۲۴] و ۲) اطّلاعات پایش وضعیّت. اطّلاعات پیشامد، شامل اطّلاعات مربوط به رخدادهایی مانند نصب، مدّت از کار افتادگی (توقّف)[۲۵]، اوراق کامل سیستم برای تعمیر[۲۶]، تعمیرجزئی[۲۷]، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، تعویض روغن و ... به همراه دلایل وقوع آن‌ها می‌باشد. همچنین، اطّلاعات پایش وضعیّت، سنجش‌های مربوط به وضعیّت سلامتی سیستم را نشان می‌دهد.

اطّلاعات پایش وضعیّت، می‌تواند شامل اطّلاعات ارتعاش، اطّلاعات صوتی، اطّلاعات آنالیز روغن، دما، فشار، رطوبت، اوضاع جوی یا اطّلاعات محیطی باشد. حسّگرهای گوناگون، از قبیل حسّگرهای مافوق صوت، به منظور جمع‌آوری انواع مختلف اطّلاعات طراحی شده‌اند [6-7]. همچنین، در سال‌های اخیر، سیستم‌های اطّلاعات نگهداری و تعمیرات، از قبیل سیستم‌های مدیریّت نگهداری و تعمیرات کامپیوتری[۲۸] برای ذخیره‌سازی و به کارگیری اطّلاعات، گسترش یافته‌اند [8-9].

۱-۳-۲ پردازش اطّلاعات

پردازش اطّلاعات، به پاک‌سازی داده‌های موجود در سوابق[۲۹] اطّلاعاتی سیستم که شامل اطّلاعات پیشامد و پایش وضعیّت می‌باشد، می‌پردازد. اطّلاعات، به خصوص اطّلاعات پیشامد، که معمولاً به صورت دستی وارد سامانهٔ اطّلاعاتی می‌شود، اغلب اوقات دارای خطا هستند. پاک‌سازی اطّلاعات، موجب افزایش احتمال استفاده از اطّلاعات بدون خطا، در تحلیل و مدل‌سازی سیستم می‌شود. عدم اجرای این گام می‌تواند منجر به تولید داده‌های بیهوده از داده‌های ورودی بیهوده شود. خطاهای اطّلاعات حاصل پایش وضعیّت، ممکن است در نتیجهٔ عیب حسّگرها باشد که در این حالت، تشخیص و رفع عیب حسّگر می‌تواند منجر به حذف خطا شود [10]. امّا، در حالت کلّی، راه ساده‌ای برای پاک‌سازی اطّلاعات وجود ندارد و حتّی گاهی اوقات بررسی دستی اطّلاعات، ضرورت پیدا می‌کند. البتّه، ابزارهای گرافیکی هم می‌تواند در تشخیص و رفع خطاهای داده‌ها بسیار مفید باشد [11].

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، اطّلاعات پایش وضعیّت حاصل از گام جمع‌آوری اطّلاعات بسیار متنوّع و مختلط هستند. در یک تقسیم‌بندی کلّی می‌توان آن‌ها را در سه دسته قرار داد. ۱) اطّلاعات عددی[۳۰]، که به داده‌های سادهٔ جمع‌آوری شده در یک دورهٔ زمانی خاص برای یک متغیّر[۳۱] تشخیص خرابی اطلاق می‌شود. اطّلاعات آنالیز روغن، دما، فشار و رطوبت همگی از نوع اطّلاعات عددی هستند. ۲) اطّلاعات موجی‌شکل[۳۲]، که به داده‌های از نوع سری‌های زمانی به دست آمده در یک دورهٔ زمانی خاص برای یک متغیّر تشخیص خرابی اطلاق می‌شود. برای مثال، اطّلاعات ارتعاش و اطّلاعات صوتی از نوع اطّلاعات موجی‌شکل هستند. ۳) اطّلاعات چندبعدی[۳۳]، که به اطّلاعات دارای ابعاد متعدّد به دست آمده در یک دورهٔ زمانی خاص برای یک متغیّر تشخیص خرابی اطلاق می‌شود. بیشترین اطّلاعات چندبعدی رایج، عبارتند از اطّلاعات تصویری از قبیل تصاویر حاصل از گرماسنج‌های مادون قرمز و اشعهٔ ایکس.

---

[24] Event
[25] Downtime
[26] Overhaul
[27] Repair
[28] Computerized Maintenance Management Systems (CMMS)
[29] Histories
[30] Value Type
[31] Covariate
[32] Waveform Type
[33] Multi-dimension Type

پردازش اطّلاعات چندبعدی و موجی‌شکل حاصل از پایش وضعیّت را پردازش علائم[۳۴] نیز می‌نامند. تکنیک‌های مختلف پردازش علائم، به منظور تشخیص و پیش‌بینی خرابی، ایجاد و توسعه یافته‌اند که به تحلیل و تفسیر اطّلاعات چندبعدی و موجی‌شکل می‌پردازند و اطّلاعات مفید را از آن‌ها استخراج می‌کنند. در ادامه، توضیحات بیشتری در این مورد، با تفکیک نوع اطّلاعات بیان می‌شود.

[11-12] به شرح مباحث، الگوریتم‌ها و ابزارهای پردازش علائم مربوط به اطّلاعات چندبعدی پرداخته‌اند. همچنین، مثال‌هایی از کاربرد تکنیک‌های پردازش علائم برای اطّلاعات چندبعدی در پایش وضعیّت، به منظور تشخیص و پیش‌بینی خرابی در [13-16] آمده است.

الگوریتم‌ها و تکنیک‌های پردازش علائم بی‌شماری به منظور تشخیص و پیش‌بینی خرابی سیستم‌های مکانیکی با اطّلاعات موجی‌شکل وجود دارد که می‌بایست با بررسی همه‌جانبه و به صورت موردی، از میان آن‌ها تکنیک مناسب را انتخاب کرد. رایج‌ترین نوع اطّلاعات موجی‌شکل در پایش وضعیّت، علائم مربوط به ارتعاشات[۳۵] و همچنین انتشارات صوتی[۳۶] می‌باشد. به طور کلّی، تحلیل اطّلاعات موجی‌شکل را می‌توان به سه دستهٔ عمده تقسیم‌بندی کرد. ۱) تحلیل دامنهٔ زمانی[۳۷] که به طور مستقیم بر اساس علائم موجی‌شکل زمان، مانند میانگین، رأس، فاصلهٔ رأس تا رأس، انحراف استاندارد و... می‌باشد. تکنیک‌های بسیاری نیز برای تحلیل دامنهٔ زمانی اطّلاعات موجی‌شکل به منظور تشخیص خرابی سیستم ارائه شده است، مانند مدل‌های تشخیص خرابی غیرخطّی [17]، که [18-20] کاربرد آن‌ها را به تفصیل مورد بررسی قرار داده‌اند. ۲) تحلیل دامنهٔ بسامد[۳۸] که بر اساس علائم تغییر یافته در دامنهٔ بسامد می‌باشد. توانایی این نوع تحلیل، نسبت به تشخیص و جداسازی قسمت‌های با بسامد معیّن در سیستم، منجر به برتری آن بر تحلیل دامنهٔ زمانی می‌شود. تحلیل طیفی[۳۹] توسّط تبدیل سریع فوریه[۴۰] را می‌توان متداولترین نوع تحلیل دامنهٔ بسامد قلمداد کرد [21-23]. ۳) تحلیل بسامد-زمان[۴۱]، به منظور رفع عیب عمدهٔ تحلیل دامنهٔ بسامد، که عدم توانایی آن نسبت به پشتیبانی علائم موجی‌شکل غیرایستای موجود در بسیاری از سیستم‌ها به هنگام وقوع خرابی می‌باشد، پایه‌ریزی شده است [24-25].

۳-۳-۱ تصمیم‌گیری

تصمیم‌گیری به منظور اتّخاذ استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات کارا، آخرین گام یک برنامهٔ نگهداری و تعمیرات می‌باشد. تکنیک‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری‌های نگهداری و تعمیرات را می‌توان در دو ردهٔ اصلی پیش‌بینی و تشخیص خرابی تقسیم‌بندی کرد. [26] به مرور و مقایسهٔ برخی از استراتژی‌های تصمیم‌گیری در CBM از قبیل آنالیز روند[۴۲] بر اساس کنترل فرایند آماری[۴۳]، سیستم‌های هوشمند[۴۴] و شبکه‌های عصبی[۴۵] می‌پردازد.

---

[34] Signal Processing
[35] Vibration
[36] Signals and Acoustic Emissions
[37] Time-Domain Analysis
[38] Frequency-Domain Analysis
[39] Spectrum Analysis
[40] Fast Fourier Transform
[41] Time-Frequency Analysis
[42] Trend Analysis
[43] Statistical Process Control (SPC)
[44] Expert Systems (ESs)
[45] Neural Networks

۱-۳-۳-۱ تصمیم‌گیری در حوزهٔ تشخیص خرابی

استراتژی‌های مختلف تصمیم‌گیری با هدف تشخیص خرابی سیستم، بر مبنای دیدگاه‌های آماری و یا دیدگاه‌های هوشمند مصنوعی[۴۶] (AI)، مورد بررسی قرار گرفته‌اند [29-27]. در [32-30] می‌توان مثال‌های کاربردی مناسبی را که با استفاده از آزمون فرض[۴۷] به تشخیص خرابی سیستم پرداخته‌اند پیدا کرد. در [33]، چارچوبی با نام آزمون فرض ساختار یافته برای تشخیص خرابیِ سیستم‌هایی با انواع مختلف عیب‌های مرکّب پیچیده، ارائه شده است. همچنین، دیدگاه سنّتی کنترل فرایند آماری، که بر اساس سنجش اختلاف بین مقدار جاری فرایند تشخیص خرابی با یک مقدار مرجع به منظور تعیین قرارداشتن مقدار فرایند در محدودهٔ حدود کنترل می‌باشد، به طور وسیعی در تشخیص خرابی سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، مرجع [34] به بیان یکی از نمونه کاربردهای عملی کنترل فرایند آماری در تشخیص خرابی می‌پردازد. در سال‌های اخیر، دیدگاه‌های AI نیز به طور افزاینده در تشخیص خرابی به کار می‌روند و مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با دیدگاه‌های آماری، بهبود عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. امّا، در عمل، استفاده از دیدگاه‌های AI به علّت فقدان فرایندهای مؤثّر در تحصیل اطّلاعات آموزشی و دانش خاصّ مورد نیاز برای آموزش مدل، آسان نیست. دیدگاه‌های AI معروف در تشخیص خرابی، عبارتند از شبکه‌های عصبی هوشمند[۴۸] [38-35] و سیستم های‌هوشمند [44-39].

۲-۳-۳-۱ تصمیم‌گیری در حوزهٔ پیش‌بینی خرابی

تحقیقات در حوزهٔ پیش‌بینی خرابی بسیار محدودتر از تحقیقات مربوط به تشخیص خرابی می‌باشد و در حالت کلّی، می‌توان این نوع تحقیقات را به دو ردهٔ اصلی که هدف هر دو، پیشگیری از وقوع خرابی‌های احتمالی می‌باشد تقسیم بندی کرد. ۱) پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده[۴۹] برای یک سیستم و ۲) تعیین زمان‌های اجرای پایش وضعیّت (بازرسی).

۱-۲-۳-۳-۱ پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده

دو مدل آماری مشهور در تحلیل بقا، یعنی مدل تلفیقی نرخ خرابی[۵۰] (PHM) و مدل تلفیقی چگالی[۵۱] (PIM) ابزارهایی مفید برای تخمین عمر مفید باقی‌مانده می‌باشند. [45] به بررسی عمر مفید باقی‌مانده یک فرایند زمان خرابی مارکوف[۵۲] که مدلی توأم از PHM و خاصّیت مارکوف می‌باشد می‌پردازد و آن را تخمین می‌زند. [46] با استفاده از PIM، متغیّری که توسّط پایش وضعیّت مورد سنجش قرار می‌گیرد را برون‌یابی می‌کند تا عمر مفید باقی‌ماندهٔ سیستم را تخمین بزند.

۲-۲-۳-۳-۱ تخمین زمان اجرای بازرسی‌ها

بازرسی و پایش وضعیّت، به حسَبِ نوع و عملکرد سیستم، می‌تواند به صورت پیوسته و یا گسسته صورت گیرد. در پایش وضعیّت پیوسته، سیستم معمولاً توسّط حسّگرهای نصب شده روی آن تحت نظارت پیوسته قرار دارد. علائم ارسالی از سیستم به علّت پارازیت[۵۳] ناشی از این نوع سنجش، ممکن است اطّلاعات تشخیصی غلط، ارائه دهند. وجود این عیب در پایش وضعیّت پیوسته،

---

[46] Artificial Intelligent (AI)
[47] Hypothesis Tests
[48] Artificial Neural Networks (ANNs)
[49] Remaining Useful Life (RUL)
[50] Proportional Hazards Model (PHM)
[51] Proportional Intensity Model (PIM)
[52] Markov Failure Time Process
[53] Noise