

## پیاده‌سازی KPI محور سیستم تعمیرات و نگهداری

پرهام حسینی یزدی

پژوهشگر حوزه مدیریت نگهداری و تعمیرات

کرمان، ایران

Email: [parhamhosseini@gmail.com](mailto:parhamhosseini@gmail.com)

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، بسیاری از واحدهای صنعتی به منظور افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و کاهش توقفات تولید، به سمت استقرار سیستم‌های نگهداری و تعمیرات (نت) ساختاریافته حرکت کرده‌اند. با این حال، تجربه‌های اجرایی در برخی صنایع نشان می‌دهد که در مراحل اولیه پیاده‌سازی، مدیران و کارشناسان با حجم گسترده‌ای از مفاهیم، شاخص‌ها، دستورالعمل‌ها و فرم‌های اجرایی مواجه می‌شوند که در صورت نبود راهبرد مشخص، می‌تواند منجر به پیچیدگی بیش از حد و کاهش اثربخشی سیستم گردد.

در چنین شرایطی، تمرکز بر شاخص‌های متعدد به صورت هم‌زمان، بدون تعیین یک محور راهبردی، گاه باعث پراکندگی منابع، سردرگمی مدیریتی و حتی بازگشت به روش‌های سنتی تعمیرات می‌شود. این مسئله به‌ویژه در صنایعی که فاقد پیشینه نظام‌مند در حوزه نت هستند، بیشتر مشاهده می‌شود.

بر این اساس، این مقاله با این فرض آغاز می‌شود که تمرکز راهبردی بر یک شاخص کلیدی می‌تواند فرآیند استقرار و بهبود سیستم نت را تسهیل نماید. در این میان، شاخص میانگین زمان بین دو خرابی (MTBF) به عنوان یک معیار عملیاتی و قابل اندازه‌گیری، می‌تواند نقش محوری در هدایت اقدامات بهبود ایفا کند. هدف این مقاله تبیین این رویکرد و تحلیل تأثیر تمرکز بر MTBF بر سایر شاخص‌های عملکردی سیستم نگهداری و تعمیرات است.

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که عملکرد نگهداری و تعمیرات باید در چارچوبی چندبعدی و مبتنی بر پایداری ارزیابی شود. Saihi, Ben-Daya, and As'ad (۲۰۲۲) با شناسایی و اعتبارسنجی ۶۳ شاخص عملکرد نگهداری پایدار، نشان دادند که شاخص‌های نگهداری باید در سه بعد محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی بررسی شوند. این یافته‌ها اهمیت تمرکز بر شاخص‌های کلیدی و اثرگذار را در بهبود عملکرد واحدهای نگهداری برجسته می‌سازد.

#### ۱.۱. هدف مقاله

این مقاله با هدف بررسی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مدیریت نگهداری و تعمیرات، تحلیل اولویت آن‌ها در سازمان‌هایی که فاقد سیستم نت ساختار یافته هستند، و ارائه مجموعه‌ای از اقدامات عملی برای بهبود عملکرد تجهیزات تدوین شده است.

## ۲. مبانی نظری و شاخص های کلیدی در نگهداری و تعمیرات (نت)

در نظام های مدیریت نگهداری، شاخص های کلیدی عملکرد (KPIs) به عنوان ابزارهای اصلی ارزیابی اثربخشی و کارایی فعالیت های تعمیرات شناخته می شوند. در میان شاخص های مختلف، معیارهایی نظیر میانگین زمان بین خرابی ها (MTBF)، میانگین زمان تعمیر (MTTR) و اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) به عنوان شاخص های اساسی و پر کاربرد در صنایع معرفی شده اند. این شاخص ها نه تنها مبنای پایش عملکرد سیستم های نگهداری هستند، بلکه در داشبوردهای مدیریتی نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند و نقش مهمی در تصمیم گیری های مرتبط با بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات ایفا می کنند (IJEME, 2023).

### ۲.۱ شاخص های پایه ای خرابی و تعمیر (MTBF و MTTR)

در تحلیل عملکرد سیستم های نگهداری و تعمیرات، دو شاخص پایه ای نقش محوری دارند: میانگین زمان بین دو خرابی (Mean Time Between Failures – MTBF) و میانگین زمان تعمیر (Mean Time To Repair – MTTR). این دو شاخص مبنای محاسبه بسیاری از شاخص های پیشرفته تر نظیر قابلیت اطمینان و در دسترس بودن محسوب می شوند.

#### ▪ MTBF

MTBF بیانگر میانگین مدت زمان عملکرد بدون خرابی یک تجهیز بین دو خرابی متوالی است. این شاخص معمولاً به صورت زیر محاسبه می شود:

$$MTBF = \frac{\text{Total Operating Time}}{\text{Number of Failures}}$$

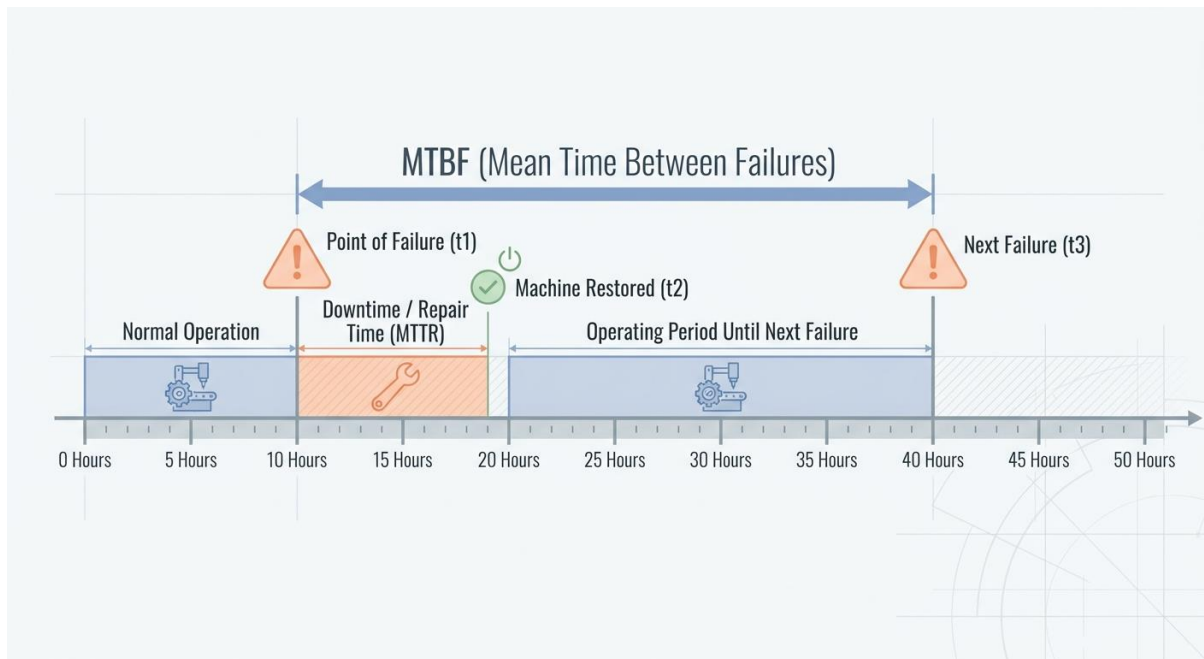
افزایش MTBF نشان دهنده کاهش نرخ وقوع خرابی و بهبود وضعیت فنی تجهیز است. از این رو، این شاخص به عنوان یکی از مهم ترین معیارهای سنجش قابلیت اطمینان تجهیزات شناخته می شود.

#### ▪ MTTR

MTTR بیانگر میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیز و بازگرداندن آن به شرایط عملیاتی پس از وقوع خرابی است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$MTTR = \frac{\text{Total Downtime}}{\text{Number of Failures}}$$

کاهش MTTR نشان دهنده بهبود قابلیت تعمیرپذیری، کارایی تیم تعمیرات و اثربخشی فرآیندهای نگهداری و تعمیرات است. برای درک بهتر ارتباط میان این دو شاخص، شکل زیر یک نمایش شماتیک از چرخه خرابی یک تجهیز را نشان می دهد که در آن فاصله زمانی بین دو خرابی متوالی به عنوان MTBF و بازه زمانی مورد نیاز برای بازگرداندن تجهیز به حالت عملیاتی به عنوان MTTR مشخص شده است. این نمودار به صورت هندسی نشان می دهد که هر چرخه شامل دو بخش اصلی «دوره عملکرد بدون خرابی» و «زمان توقف ناشی از تعمیر» است و چگونه ترکیب این دو، بنیان تحلیل های قابلیت اطمینان و در دسترس بودن را تشکیل می دهد. این دو شاخص، به ترتیب نمایانگر «فاصله بین خرابی ها» و «مدت زمان بازیابی پس از خرابی» هستند و مبنای تحلیل کمی عملکرد سیستم نت در این مقاله قرار می گیرند. در تحلیل های عملی نیز نشان داده شده که پایش منظم شاخص های MTBF و MTTR نقش مهمی در ارزیابی عملکرد واحدهای نت و جلوگیری از افت بهره وری دارد (Aji & Uchendu, 2025).



## ۲.۲ قابلیت اطمینان (Reliability)

قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد تجهیزات در سیستم‌های صنعتی است و به احتمال آن اشاره دارد که یک تجهیز یا سیستم در شرایط عملیاتی مشخص و طی یک بازه زمانی معین، بدون وقوع خرابی به عملکرد مطلوب خود ادامه دهد. به بیان ریاضی، قابلیت اطمینان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(t) = P(T > t)$$

که در آن  $T$  زمان تا خرابی تجهیز و  $t$  زمان مورد نظر بهره‌برداری است.

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، با فرض ثابت بودن نرخ خرابی (توزیع نمایی)، تابع قابلیت اطمینان به شکل زیر بیان می‌شود:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

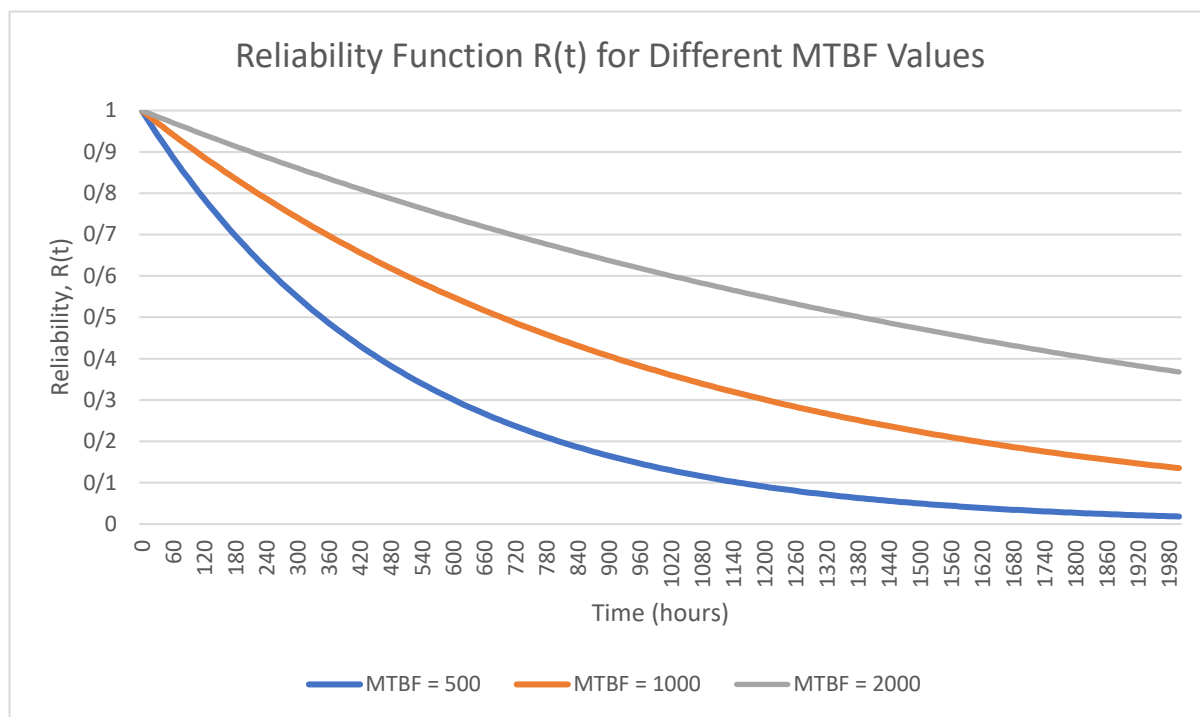
که در آن  $\lambda$  نرخ خرابی تجهیز است. با توجه به رابطه بین نرخ خرابی و میانگین زمان بین دو خرابی:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

رابطه قابلیت اطمینان را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

این رابطه نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان تجهیز مستقیماً تابعی از MTBF است و با افزایش مقدار MTBF، مقدار  $R(t)$  برای یک زمان مشخص افزایش می‌یابد.



### تحلیل نمودار - تابع قابلیت اطمینان برای مقادیر مختلف MTBF

شکل بالا رفتار تابع قابلیت اطمینان تجهیز را برای سه مقدار متفاوت MTBF (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ساعت) در بازه زمانی صفر تا ۲۰۰۰ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر سه منحنی روندی کاهشی و نمایی دارند؛ به‌طوری‌که با افزایش زمان بهره‌برداری، احتمال بدون‌خرابی ماندن تجهیز  $R(t)$  به تدریج کاهش می‌یابد. با این حال نرخ کاهش قابلیت اطمینان در سه منحنی یکسان نیست و مستقیماً به مقدار MTBF وابسته است.

در حالت  $MTBF = 500$  ساعت (منحنی آبی)، شیب منحنی تندتر است؛ یعنی احتمال وقوع خرابی در زمان‌های اولیه بیشتر بوده و تجهیز در مدت کوتاه‌تری از سطوح بالای قابلیت اطمینان فاصله می‌گیرد. در مقابل، برای  $MTBF = 2000$  ساعت (منحنی خاکستری)، کاهش قابلیت اطمینان بسیار ملایم‌تر است و تجهیز برای مدت طولانی‌تری در سطوح بالای  $R(t)$  باقی می‌ماند. منحنی مربوط به  $MTBF = 1000$  ساعت (منحنی نارنجی) نیز رفتاری بین این دو حالت دارد.

این تفاوت رفتاری، به‌صورت کمی بیانگر این واقعیت است که:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

بنابراین، افزایش MTBF باعث افزایش مستقیم قابلیت اطمینان در هر لحظه  $ttt$  می‌شود. به بیان دیگر، هر چه MTBF بزرگ‌تر باشد:

- شیب منحنی  $R(t)$  کمتر است؛
- احتمال بدون‌خرابی ماندن تجهیز در بازه‌های زمانی مشخص، بیشتر می‌شود؛
- نیاز به توقف‌های ناخواسته تولید کاهش می‌یابد.

از منظر مدیریتی، این نمودار به‌طور شفاف نشان می‌دهد که بهبود MTBF نه‌تنها یک شاخص فنی، بلکه یک اهرم راهبردی برای افزایش قابلیت اطمینان و در نتیجه بهبود در دسترس بودن تجهیز (Availability) است. بر این اساس، تمرکز نظام‌مند بر اقداماتی که منجر به افزایش MTBF می‌شوند (مانند تحلیل ریشه‌ای خرابی‌ها، نگهداری پیشگیرانه و بهبود شرایط بهره‌برداری)، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد کلی سیستم نت و استمرار تولید داشته باشد. این مقاله رابطه بین MTBF، نرخ خرابی و قابلیت اطمینان را در قالب داده‌های واقعی تحلیل کرده و نشان می‌دهد که کاهش failure rate و افزایش MTBF باعث افزایش  $R(t)$  می‌شود. (Aji & Uchendu, 2025)

### ۲.۳ در دسترس بودن (Availability)

در دسترس بودن یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد تجهیزات در سیستم‌های نگهداری و تعمیرات محسوب می‌شود و بیانگر آن است که یک تجهیز چه نسبتی از کل زمان برنامه‌ریزی شده را واقعاً در وضعیت عملیاتی و آماده بهره‌برداری قرار دارد. به بیان ساده، این شاخص نشان می‌دهد که یک دستگاه در مقایسه با کل زمان در اختیار بودن خود، چه مقدار از آن زمان را بدون توقف و در حال انجام وظیفه عملیاتی سپری می‌کند.

در دسترس بودن تجهیزات به طور مستقیم تحت تأثیر دو عامل اصلی قرار دارد: قابلیت اطمینان (Reliability) و قابلیت تعمیرپذیری (Maintainability). قابلیت اطمینان بیانگر احتمال عملکرد بدون خرابی تجهیز در یک بازه زمانی مشخص است، در حالی که قابلیت تعمیرپذیری به سرعت و سهولت بازگرداندن تجهیز به وضعیت عملیاتی پس از وقوع خرابی اشاره دارد.

در بسیاری از مطالعات و منابع مهندسی نگهداری و تعمیرات، در دسترس بودن ذاتی تجهیزات به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

که در آن MTBF نشان‌دهنده میانگین زمان بین دو خرابی متوالی و MTTR میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر و بازگرداندن تجهیز به شرایط عملیاتی است. بر اساس این رابطه، افزایش فاصله زمانی بین خرابی‌ها (افزایش MTBF) یا کاهش زمان تعمیر (کاهش MTTR) می‌تواند به طور مستقیم موجب افزایش در دسترس بودن تجهیزات شود.

از دیدگاه مدیریتی، این رابطه نشان می‌دهد که بهبود عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات می‌تواند از دو مسیر اصلی دنبال شود: کاهش فراوانی خرابی‌ها و افزایش سرعت بازیابی تجهیز پس از خرابی. در این میان، اقداماتی که منجر به افزایش MTBF می‌شوند نقش مهمی در بهبود پایدار در دسترس بودن تجهیزات و کاهش توقف‌های ناخواسته تولید دارند.

## ۲.۴. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات

هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را به طور کلی می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد:

- هزینه‌های مستقیم

شامل اقلامی نظیر دستمزد نیروی انسانی تعمیراتی، خرید و مصرف قطعات یدکی، هزینه ابزار و تجهیزات تخصصی، خدمات پیمانکاری و هزینه‌های مرتبط با انجام فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی است.

- هزینه‌های غیرمستقیم

این دسته از هزینه‌ها معمولاً در صورت‌های مالی به صورت شفاف دیده نمی‌شوند، اما تأثیر قابل توجهی بر عملکرد اقتصادی سازمان دارند. از جمله می‌توان به هزینه‌های ناشی از توقف تولید، کاهش ظرفیت تولید، افزایش ضایعات، افت کیفیت محصول، تأخیر در تحویل سفارش‌ها و کاهش رضایت مشتریان اشاره کرد.

در رویکردهای نوین مدیریت دارایی‌های فیزیکی، هدف صرفاً کاهش هزینه‌های مستقیم تعمیرات نیست، بلکه تمرکز بر بهینه‌سازی هزینه کل چرخه عمر تجهیز (Life Cycle Cost – LCC) است. در این نگاه، تصمیمات مرتبط با استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات، انتخاب سطح موجودی قطعات یدکی و نوع مداخلات فنی باید به گونه‌ای اتخاذ شوند که مجموع هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم در طول عمر مفید تجهیز حداقل شود.

از این منظر، شاخص‌هایی مانند MTBF و MTTR تنها پارامترهای فنی نیستند، بلکه به صورت غیرمستقیم بر ساختار هزینه‌ای سازمان نیز اثر می‌گذارند؛ افزایش MTBF با کاهش فراوانی خرابی‌ها و کاهش MTTR با کوتاه کردن زمان توقف، هر دو می‌توانند به کاهش هزینه‌های غیرمستقیم ناشی از توقف تولید و بهبود بهره‌وری تجهیزات منجر شوند.

## ۲.۵. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات یکی از ارکان اصلی مدیریت مؤثر دارایی‌های فیزیکی در صنایع محسوب می‌شود. هدف از این فرایند، سازماندهی فعالیت‌های نگهداری به گونه‌ای است که ضمن حفظ قابلیت اطمینان تجهیزات، کمترین اختلال در فرایند تولید ایجاد شود. در این چارچوب، برنامه‌های نگهداری معمولاً شامل فعالیت‌هایی نظیر نگهداری پیشگیرانه (Preventive Maintenance – PM)، نگهداری پیش‌بینانه (Predictive Maintenance – PdM) و تعمیرات اساسی (Overhaul) هستند که هر یک با هدف کاهش احتمال خرابی و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات اجرا می‌شوند.

اجرای مؤثر این برنامه‌ها نیازمند هماهنگی میان واحدهای مختلف سازمان از جمله واحد نگهداری و تعمیرات، تولید، برنامه‌ریزی تولید و انبار قطعات یدکی است. نبود هماهنگی میان این واحدها می‌تواند منجر به تأخیر در اجرای فعالیت‌های تعمیراتی، کمبود قطعات یدکی و در نهایت افزایش توقفات ناخواسته تجهیزات شود.

از دیدگاه مدیریتی، برنامه‌ریزی مناسب فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات می‌تواند با کاهش وقوع خرابی‌های ناگهانی و بهبود شرایط بهره‌برداری از تجهیزات، نقش مهمی در افزایش شاخص‌هایی نظیر MTBF و بهبود عملکرد کلی سیستم ایفا کند.

## ۲.۶. نیروی انسانی، آموزش و فرهنگ نگهداری و تعمیرات

موفقیت سیستم نگهداری و تعمیرات تا حد زیادی به عوامل انسانی وابسته است. مهارت، تجربه و سطح آموزش کارکنان نقش تعیین‌کننده‌ای در تشخیص به‌موقع علائم خرابی، انجام صحیح عملیات تعمیراتی و جلوگیری از بروز خرابی‌های تکراری دارد. نیروی انسانی آموزش‌دیده می‌تواند با تشخیص سریع‌تر مشکلات و اجرای مؤثر فرایندهای تعمیراتی، زمان تعمیرات را کاهش داده و در نتیجه موجب بهبود شاخص MTTR شود.

به طور معمول فرض می‌شود که پیش از استقرار و پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات، آموزش‌های پایه و اساسی به کارکنان ارائه شده است. با این حال، تجربه نشان می‌دهد که آموزش یک فرآیند مقطعی نیست، بلکه باید به صورت مستمر و حین خدمت ادامه یابد. در این چارچوب، به‌اشتراک‌گذاری بازخوردهای (فیدبک‌های) حاصل از اجرای سیستم، تحلیل نتایج عملکردی، و بررسی خرابی‌های رخ داده و اقدامات اصلاحی باید به عنوان بخشی از برنامه آموزش مداوم در نظر گرفته شود. این چرخه بازخورد و یادگیری مستمر، باعث ارتقای تدریجی دانش و مهارت کارکنان و بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در حوزه نگهداری و تعمیرات می‌شود.

علاوه بر جنبه‌های فنی آموزش، تقویت فرهنگ نگهداری و تعمیرات در سازمان اهمیت ویژه‌ای دارد. در سازمان‌هایی که فرهنگ نگهداری پیشگیرانه به‌درستی نهادینه شده است، کارکنان تولید و نت، خود را در قبال شرایط کاری تجهیزات مسئول می‌دانند، به علائم اولیه خرابی حساس‌تر هستند و در ثبت، گزارش و تحلیل خرابی‌ها مشارکت فعال دارند. این رویکرد، با کاهش بروز خرابی‌های ناگهانی، به بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات و در نهایت افزایش شاخص‌هایی نظیر MTBF کمک می‌کند.

## ۲.۷. قطعات یدکی و مدیریت انبار

مدیریت مناسب قطعات یدکی یکی از عوامل پشتیبان در عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات محسوب می‌شود. در بسیاری از صنایع، نبود یک قطعه ساده می‌تواند منجر به توقف طولانی تجهیزات و افزایش زمان از کارافتادگی شود. از این رو شناسایی قطعات حیاتی، بررسی سوابق مصرف و توجه به زمان تأمین قطعات می‌تواند در کاهش زمان توقف و بهبود عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات مؤثر باشد.

## ۲.۸. سیستم‌های اطلاعاتی نگهداری و تعمیرات (CMMS)

سیستم‌های مدیریت نگهداری و تعمیرات رایانه‌ای (Computerized Maintenance Management Systems – CMMS) به عنوان یکی از ابزارهای مهم در مدیریت داده‌های مرتبط با فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات شناخته می‌شوند. این سیستم‌ها معمولاً قابلیت‌هایی نظیر ثبت دستور کارها، ثبت خرابی‌ها، ثبت زمان توقف تجهیزات، مدیریت قطعات یدکی و استخراج شاخص‌های عملکردی را فراهم می‌کنند و می‌توانند در سازمان‌های دارای سیستم نت بالغ، نقش مؤثری در تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری مدیریتی ایفا کنند.

با این حال، تجربه بسیاری از سازمان‌های صنعتی نشان می‌دهد که در مراحل ابتدایی استقرار سیستم نگهداری و تعمیرات، زمانی که نیازهای اطلاعاتی هنوز به‌طور کامل مشخص نشده و ساختار فرایندها به ثبات نرسیده است، استفاده از سیستم‌های پیچیده و پرهزینه CMMS لزوماً به بهبود عملکرد سیستم منجر نمی‌شود. در چنین شرایطی، تمرکز بیش از حد بر ابزارهای نرم‌افزاری ممکن است حتی باعث افزایش پیچیدگی، سردرگمی کاربران و کاهش کیفیت داده‌های ثبت‌شده شود.

در بسیاری از موارد، استفاده از ابزارهای ساده‌تری مانند پایگاه‌های داده ابتدایی یا فایل‌های اکسل برای ثبت خرابی‌ها، زمان توقف تجهیزات و تحلیل اولیه داده‌ها می‌تواند در مراحل اولیه کارآمدتر باشد. این رویکرد امکان شناسایی مسائل اصلی تجهیزات و ایجاد درک بهتر از الگوهای خرابی را فراهم می‌کند.

پس از شکل‌گیری ساختار منسجم در فرایندهای نگهداری و تعمیرات و مشخص شدن نیازهای اطلاعاتی سازمان، استقرار سیستم‌های جامع‌تر مانند CMMS می‌تواند به عنوان گام بعدی در توسعه سیستم نت مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، ارزش واقعی هر سیستم اطلاعاتی در حوزه نت زمانی آشکار می‌شود که داده‌های ثبت‌شده بتوانند در تحلیل خرابی‌ها و بهبود شاخص‌هایی نظیر MTBF مورد استفاده قرار گیرند.

### ۳. انتخاب شاخص محوری در سازمان‌های فاقد سیستم نت

در بسیاری از سازمان‌های صنعتی که هنوز سیستم نگهداری و تعمیرات ساختاریافته در آن‌ها استقرار نیافته است، شرایطی نظیر تعمیرات پس از خرابی (Run to Failure)، نبود برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه، ثبت نشدن داده‌های عملکردی تجهیزات و غلبه تعمیرات اضطراری مشاهده می‌شود. در چنین محیطی، تلاش برای بهبود هم‌زمان تمامی شاخص‌های عملکردی سیستم نت معمولاً با محدودیت منابع، نبود داده‌های کافی و پیچیدگی اجرایی مواجه می‌شود.

در این شرایط، انتخاب یک شاخص محوری که بتواند جهت اقدامات اصلاحی را مشخص کند، می‌تواند فرآیند بهبود را ساده‌تر و قابل مدیریت‌تر سازد.

#### ۳.۱ پارامتر پیشنهادی: میانگین زمان بین دو خرابی (MTBF)

در میان شاخص‌های مختلف نگهداری و تعمیرات، MTBF می‌تواند گزینه مناسبی برای شروع بهبود عملکرد سیستم باشد. این شاخص مستقیماً به فراوانی وقوع خرابی‌ها مرتبط است و در بسیاری از صنایع حتی با داده‌های ساده عملیاتی نیز قابل اندازه‌گیری است.

تمرکز بر افزایش MTBF در عمل به معنای کاهش تعداد خرابی‌ها، بهبود شرایط بهره‌برداری از تجهیزات، اجرای اقدامات پیشگیرانه و تحلیل ریشه‌ای خرابی‌ها است. بسیاری از اقداماتی که با هدف افزایش MTBF انجام می‌شوند، به طور غیرمستقیم باعث بهبود سایر شاخص‌های سیستم نت نیز می‌شوند.

به عنوان مثال:

کاهش خرابی‌ها می‌تواند موجب کاهش توقفات تولید و افزایش Availability شود؛

تحلیل و مستندسازی خرابی‌ها می‌تواند فرآیند تعمیر را بهبود داده و در نتیجه MTTR را کاهش دهد؛

کاهش تعداد خرابی‌ها به طور مستقیم باعث کاهش هزینه‌های تعمیراتی و توقف تولید می‌شود.

بنابراین، تمرکز راهبردی بر افزایش MTBF می‌تواند به عنوان یک نقطه شروع عملی و قابل اجرا برای بهبود عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات در سازمان‌های فاقد ساختار منسجم نت در نظر گرفته شود.



## ۴. اقدامات عملی برای افزایش MTBF و اثرات جانبی آن بر عملکرد کل سیستم نگهداری و

### تعمیرات

در محیط‌های صنعتی که با محدودیت منابع، نبود داده‌های تاریخی و غلبه تعمیرات اضطراری مواجه هستند، تمرکز مستقیم بر افزایش MTBF می‌تواند ساده‌ترین و در عین حال مؤثرترین نقطه شروع باشد.

نکته مهم این است که افزایش MTBF نه تنها فراوانی خرابی‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه به صورت خودکار باعث بهبود MTTR، افزایش Availability و کاهش هزینه‌های تعمیرات می‌شود.

زیرا هر اقدامی که به کاهش خرابی منجر شود، سازمان را ناگزیر به اصلاحات گسترده در سایر بخش‌های نت می‌کند.

در ادامه مهم‌ترین این اقدامات صنعتی ارائه شده است.

### ۴.۱ کشف الگوهای خرابی و ثبت داده‌های حداقلی

اولین گام در بهبود MTBF، ثبت منظم و بسیار ساده اطلاعات خرابی است؛ حتی با یک فایل اکسل.

هنگامی که تیم نت شروع به ثبت «چه خرابی‌هایی، روی چه تجهیزاتی، چه زمانی و چرا» می‌کند:

- الگوهای خرابی کشف می‌شود
- تکرار شونده‌ترین مشکلات مشخص می‌شوند
- ریشه خرابی‌ها قابل تحلیل می‌شود
- زمان‌های خرابی و تعمیر قابل اندازه‌گیری می‌شوند

نتیجه:

حتی با ثبت ساده داده‌ها، MTBF و MTTR برای اولین بار قابل محاسبه می‌شوند و بهبود آنها آغاز می‌شود.

### ۴.۲ تحلیل ریشه‌ای خرابی‌ها و حذف مهم‌ترین عوامل تکرار شونده

وقتی هدف اصلی افزایش MTBF باشد، سازمان ناگزیر وارد تحلیل خرابی‌ها می‌شود.

این تحلیل می‌تواند ساده و پنج دقیقه‌ای باشد:

- خرابی چرا رخ داد؟
- چه چیزی باعث آن شد؟
- چگونه می‌توان از تکرار آن جلوگیری کرد؟

نتیجه:

با حذف چند علت اصلی خرابی‌ها (Pareto)، MTBF جهش قابل توجهی پیدا می‌کند.

### ۴.۳ استانداردسازی تعمیرات (بدون اینکه قصد اولیه استانداردسازی باشد)

تجربه صنعتی می گوید:

هنگامی که سازمان دغدغه «کم کردن خرابی» دارد، تیم تعمیرات به سرعت متوجه می شود که تعمیرات غیر استاندارد خود عامل خرابی هستند.

برای افزایش MTBF، ناچار خواهیم بود:

- روش تعمیرات را مشخص و مکتوب کنیم
- ترتیب مراحل را ثابت کنیم
- گشتاور، فیگورها، تلرانس ها و تنظیمات را یکسان کنیم
- چک لیست پس از تعمیر تعریف کنیم

این استانداردسازی، بدون اینکه هدف اولیه باشد، یکی از موثرترین عوامل کاهش خرابی های تکرار شونده است.

نتیجه جانبی:

چون تعمیرات یکدست می شود، MTTR نیز کاهش پیدا می کند.

### ۴.۴ بهبود کیفیت قطعات یدکی و Vendor List (اثر کاملاً خودکار)

وقتی تمرکز روی افزایش MTBF باشد، بلافاصله مشخص می شود:

- چه قطعاتی بیشتر خراب می شوند
- کدام قطعات کیفیت پایینی دارند
- کدام تأمین کنندگان مشکلات ایجاد می کنند

بنابراین سازمان به طور طبیعی:

- Vendor List را اصلاح می کند
- قطعات پر ریسک را از تأمین کنندگان باکیفیت تر تهیه می کند
- انبار را از قطعات بی کیفیت پاکسازی می کند

نتیجه:

افزایش MTBF، افزایش Reliability و کاهش توقفات تولید.

#### ۴.۵ بهبود شرایط بهره‌برداری (Operation Conditions)

بخش مهمی از خرابی‌ها ناشی از موارد زیر است:

- بارگذاری بیش از حد
- آلودگی
- دمای بالا
- لرزش
- کارکرد اپراتور خارج از استاندارد

تمرکز روی افزایش MTBF سازمان را مجبور می‌کند:

- قوانین بهره‌برداری را بازبینی کند
- آموزش اپراتور را بهبود دهد
- شرایط محیطی دستگاه را اصلاح کند

نتیجه:

افزایش MTBF، کاهش خرابی‌های ناگهانی و افزایش ایمنی.

#### ۴.۶ PM و PdM ساده شده (Minimalistic Preventive Maintenance)

برای افزایش MTBF نیازی نیست PM پیچیده یا CMMS گران‌قیمت داشته باشیم.

حتی یک PM بسیار ساده هم می‌تواند اثر قابل توجه داشته باشد:

- چک‌لیست روزانه ۵ دقیقه‌ای
- بازدید هفتگی
- روانکاری صحیح
- اندازه‌گیری دما، لرزش یا صدا با ابزارهای ساده

نتیجه:

با این اقدامات ساده، MTBF در بسیاری تجهیزات ۳۰ تا ۷۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

## ۴.۷ آموزش، مهارت و هماهنگی تیم (اثر غیرمستقیم بر MTTR)

هرچند هدف اصلی MTBF است، اما:

- آموزش تعمیرکار
- آموزش اپراتور
- مستندسازی تجربیات
- هماهنگی بین تولید و نت

سبب می‌شود که در هنگام خرابی:

- تشخیص سریع‌تر
- تعمیر با خطای کمتر
- اجرا با سرعت بالاتر

اتفاق بیفتد.

نتیجه ناخواسته اما مهم:

MTTR کاهش می‌یابد و Availability افزایش پیدا می‌کند.

### جمع‌بندی

تمرکز بر افزایش شاخص MTBF، علاوه بر کاهش فراوانی خرابی‌ها، موجب راه‌اندازی مجموعه‌ای از اصلاحات خودکار در سیستم نگهداری و تعمیرات می‌شود؛ اصلاحاتی که بدون نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین و تنها با تمرکز بر «حذف خرابی‌های تکرارشونده» به وجود می‌آیند. این اصلاحات شامل استانداردسازی تعمیرات، بهبود مدیریت قطعات یدکی، ارتقای مهارت کارکنان، اصلاح شرایط بهره‌برداری و به‌کارگیری روش‌های ساده نگهداری پیشگیرانه است. در نتیجه، MTBF افزایش یافته و به‌طور هم‌زمان MTTR کاهش و Availability افزایش پیدا می‌کند. این رویکرد ساده و عملی می‌تواند نقطه شروع مؤثری برای سازمان‌هایی باشد که قصد دارند بدون پیچیدگی‌های اداری و نرم‌افزاری، عملکرد سیستم نگهداری و تعمیرات خود را ارتقا دهند.

## نتیجه گیری تحلیلی :

در بسیاری از سازمان‌های صنعتی که در مراحل ابتدایی استقرار سیستم نگهداری و تعمیرات قرار دارند، پراکندگی شاخص‌ها و تعدد الزامات اجرایی می‌تواند مانع شکل‌گیری یک مسیر بهبود پایدار شود. نتایج تحلیلی این مقاله نشان داد که شاخص MTBF به دلیل ارتباط مستقیم با نرخ خرابی، قابلیت اطمینان و در دسترس بودن تجهیزات، می‌تواند به عنوان یک اهرم راهبردی برای هدایت اقدامات اصلاحی مورد استفاده قرار گیرد. از منظر ریاضی، افزایش MTBF مستقیماً موجب افزایش تابع قابلیت اطمینان

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

و بهبود Availability طبق رابطه

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

می‌شود. از منظر اجرایی نیز تمرکز بر افزایش MTBF سازمان را ناگزیر به اجرای مجموعه‌ای از اصلاحات ساختاری در حوزه استانداردسازی تعمیرات، مدیریت قطعات یدکی، آموزش نیروی انسانی و بهبود شرایط بهره‌برداری می‌کند. بنابراین، MTBF نه تنها یک شاخص فنی، بلکه یک نقطه تمرکز مدیریتی برای ساده‌سازی فرآیند استقرار سیستم نت محسوب می‌شود.

## ۶. محدودیت‌ها و پیشنهاد برای تحقیقات آینده

### محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای ارائه چارچوبی مفهومی در خصوص تأثیر تمرکز بر یک عامل کلیدی در بهبود عملکرد واحدهای نگهداری و تعمیرات، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها مواجه بوده است. مهم‌ترین محدودیت این مطالعه، عدم اجرای میدانی و آزمون عملی چارچوب پیشنهادی در یک محیط صنعتی واقعی است. به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های عملیاتی و همچنین ضرورت همکاری سازمان‌ها و شرکت‌های صنعتی، امکان پیاده‌سازی و ارزیابی تجربی مدل در مقیاس واقعی در این مرحله از پژوهش فراهم نشده است. از آنجا که عملکرد واحدهای نگهداری و تعمیرات به شدت تحت تأثیر شرایط عملیاتی، ساختار سازمانی، سطح بلوغ سیستم‌های نگهداری و فرهنگ سازمانی هر مجموعه قرار دارد، اعتبارسنجی عملی چارچوب پیشنهادی در محیط‌های صنعتی مختلف می‌تواند به درک دقیق‌تر میزان اثربخشی آن کمک کند. از این‌رو، اجرای مطالعات میدانی و پایلوت در شرکت‌ها و سازمان‌هایی که آمادگی همکاری پژوهشی دارند می‌تواند گام مهمی در جهت ارزیابی عملی، اصلاح و تکمیل این چارچوب باشد.

بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، این مدل در صنایع مختلف و در قالب پروژه‌های پایلوت با مشارکت سازمان‌های صنعتی مورد آزمون قرار گیرد تا علاوه بر سنجش کارایی آن در شرایط واقعی، امکان توسعه و بهینه‌سازی چارچوب ارائه‌شده نیز فراهم شود.

رفرنسها :

Aji, J. O., & Uchendu, I. (2025). *Improving facility operations: A quantitative evaluation of MTBF, MTTR, and SLA targets*. European Journal of Innovative Studies and Sustainability, 1(3), 247–261. [https://doi.org/10.59324/ejiss.2025.1\(3\).20](https://doi.org/10.59324/ejiss.2025.1(3).20)

Aji, J. O., & Uchendu, I. (2025). Essential and new maintenance KPIs explained. International Journal of Engineering and Management Engineering, 12(6), 1–15.

Saihi, A., Ben-Daya, M., & As'ad, R. (2022). An investigation of sustainable maintenance performance indicators: Identification, expert validation and portfolio of future research. IEEE Access, 10, 124259. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3224450>