

# بهینه‌سازی آستانه‌ی اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در یک برنامه‌ی مبتنی بر شرایط (CPM)، با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا

کامران شهنقی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهدی جفریان (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ

مجید بیگ‌وردی (کارشناس ارشد)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

زینب نژادبیگلی (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

آخرین گام در یک برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM)، تصمیم‌گیری برای سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات است. این گام مهم‌ترین و بحرانی‌ترین گام برای مجریان برنامه است. تصمیم‌گیری یادشده با توجه به اهداف مختلف - نظیر کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و افزایش قابلیت استفاده - صورت می‌پذیرد. در این نوشتار ایجاد یک مدل برنامه‌ریزی پویا به منظور تعیین آستانه‌ی اجرای نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در برنامه‌ی CBM، مورد نظر است. مبنای مدل‌سازی، هزینه‌های انتظاری برنامه‌ی CBM (حاصل ضرب مقادیر مختلف هزینه به ازای تصمیمات مختلف و احتمال هر یک از تصمیمات) بوده است. در این نوشتار با استفاده از ضریب  $\alpha$ ، مدل مربوطه حافظه‌دار شده و تنزل درجه‌ی دستگاه در معادلات به‌شکلی واقعی‌تر در نظر گرفته شده است. در محاسبات، نقطه‌ی بهینه برای تعویض اقتصادی دستگاه نیز محاسبه شده است. به‌منظور ساده‌سازی، از ارزش زمانی پول صرف نظر شده است.

shahanaghi@iust.ac.ir  
jafarian.mehdi@gmail.com  
m.beikverdi@gmail.com  
z\_nejadbiglari@yahoo.com

واژگان کلیدی: نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM)، آستانه، تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی پویا، قابلیت اطمینان، تعویض.

## مقدمه

نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط (CBM)<sup>۱</sup>، برنامه‌ی است که با استفاده از کلیه‌ی اطلاعات جمع‌آوری شده در حین پایش وضعیت (CM)<sup>۲</sup> یک مؤلفه، تمامی تصمیمات نگهداری و تعمیرات مربوطه را پشتیبانی می‌کند CBM<sup>۱</sup>. به‌عنوان یکی از کاراترین رویکردهای نگهداری و تعمیرات، سعی در کاهش هزینه‌های هنگفت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)<sup>۳</sup> دارد.<sup>۱،۲</sup> این رویکرد از سه گام اساسی: جمع‌آوری داده‌ها<sup>۴</sup>، پردازش داده‌ها<sup>۵</sup> و ایجاد تصمیمات مربوط به نگهداری و تعمیرات<sup>۶</sup> تشکیل شده است.<sup>۳</sup> آخرین گام در برنامه‌ی CBM، تصمیم‌گیری برای سیاست‌های مختلف نگهداری و تعمیرات است، که مهم‌ترین و بحرانی‌ترین گام برای مجریان برنامه‌ی مذکور است.<sup>۱</sup>

وسعی در این حوزه صورت گرفته است. با توجه به گام‌های فوق، خلاصه‌ی از این تحقیقات ارائه شده است.<sup>۱</sup> این گام از دو منظر قابل بررسی است: شناسایی عیب<sup>۷</sup> و تشخیص عیب<sup>۸</sup>. هنگام شناسایی عیب، به شناسایی علل خرابی می‌پردازیم و برای تشخیص عیب با استفاده از شیوه‌های موجود عیوب احتمالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کنیم. هدف از تشخیص عیب در برنامه‌ی CBM، فراهم کردن سیستم پشتیبانی تصمیم<sup>۹</sup> برای فعالیتهای نگهداری و تعمیرات، و در نتیجه بهینه‌سازی تصمیمات مربوط به سیاست‌های نگهداری و تعمیرات است.<sup>۱۱</sup> مدل‌های ریاضی در این حوزه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.<sup>۱۲-۱۵</sup>

بر اساس ماهیت متنوع و پیچیده‌ی دستگاه‌ها، حالت‌ها و وضعیت‌های مختلف آن‌ها (قبل و بعد از اجرای سیاست‌ها و اقدامات نگهداری و تعمیرات)، نوع فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و شرایط اجرای هر یک، پارامترهای زمانی و توزیع‌های مربوط به هر یک و ساختار برنامه‌ی CBM، مفروضات متنوعی در این حوزه مورد بررسی قرار

تحقیقات در حوزه‌ی CBM به سرعت در حال افزایش است و تاکنون تحقیقات

گرفته است. همچنین براساس دسته‌بندی‌های مختلف از مجموعه‌ی این فرضیات و با استفاده از ابزارهای مختلف، مقالات متنوعی به وجود آمده‌اند.

در یکی از این نوشتارها، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی پویا، آستانه‌ی ۱<sup>o</sup> اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات یک دستگاه بر مبنای شرایط آن، به منظور کاهش مجموع هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات و هزینه‌ی انتظار شکست که در نتیجه‌ی کاهش احتمال شکست دستگاه است، با در نظر گرفتن مفروضات زیر محاسبه شده است:<sup>[۴]</sup>

هدف مسئله تصمیم‌گیری برای اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات، یا عدم اجرای آن است. احتمال وقوع هر شکست از توزیع پواسون، و مدت زمان بین دو شکست از توزیع نمایی پیروی می‌کند. همچنین زمان بین بازرسی‌ها ثابت فرض شده است؛ مدت این زمان را می‌توان یک روز، چند روز یا چند هفته در نظر گرفت. در این مدل فرض شده است که پس از هر مرحله اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و یا تعمیر اساسی، دستگاه به حالت اولیه‌اش بازمی‌گردد.<sup>[۴]</sup> همچنین با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی پویا، آستانه‌ی اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات دو مؤلفه‌ی سری از یک دستگاه را بر مبنای شرایط آن‌ها، برای کاهش مجموع هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات و هزینه‌ی انتظاری شکست که در نتیجه‌ی کاهش احتمال شکست مؤلفه‌های مذکور است، مورد بررسی قرار داده‌اند.<sup>[۵]</sup> در مدل اخیر، نویسندگان علاوه بر مفروضات فوق فرض کرده‌اند که در فاصله‌ی بازرسی، هر مؤلفه فقط یک بار می‌تواند خراب شود و در صورت خرابی یک مؤلفه، مؤلفه‌ی دیگر و در نتیجه کل دستگاه خراب خواهد شد.<sup>[۵]</sup> در این نوشتار مقدار شرایط دستگاه را با مقدار  $x_n$  توصیف خواهیم کرد. این مقدار در ابتدای هر دوره اندازه‌گیری خواهد شد. در این نوشتار فرض شده است که دو گزینه‌ی تصمیم وجود دارد: ۱. اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه؛ ۲. عدم اجرای آن. در صورتی که دستگاه در طول بازه‌ی زمانی ثابت  $t$  دچار شکست شود، تعمیر اساسی صورت خواهد گرفت و در صورتی که شرایط دستگاه از آستانه‌ی مفروض بیشتر باشد، اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه صورت می‌پذیرد. همچنین اگر مقدار این شرایط از آستانه‌ی مذکور پایین‌تر باشد هیچ‌گونه اقدامی صورت نخواهد گرفت.

در این نوشتار، تصمیم‌گیری اقتصادی در ارتباط با اقدامات مختلف نگهداری و تعمیرات در قالب یک مدل برنامه‌ریزی پویا مدل‌سازی شده است. مبنای مدل‌سازی، هزینه‌های انتظاری برنامه‌ی CBM (حاصل ضرب مقادیر مختلف هزینه به‌ازای تصمیمات مختلف و احتمال هر یک از تصمیمات) بوده است. لذا در بخش بعدی به تشریح مفروضات مدل CBM مورد نظر در این نوشتار می‌پردازیم و سپس با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا به مدل‌سازی مسئله خواهیم پرداخت. مسئله را با داده‌های عددی موجود<sup>[۴]</sup> حل، و در نهایت نتیجه‌گیری می‌کنیم.

## توصیف مفروضات مدل CBM

در مدل CBM، بازرسی‌ها در ابتدای هر دوره صورت می‌گیرد. مقدار شرایط اندازه‌گیری شده‌ی دستگاه را با پارامتر  $x_n$  توصیف خواهیم کرد. این متغیر عموماً با استفاده از شیوه‌های مختلف - نظیر آنالیز ارتعاشات<sup>[۱]</sup>، آنالیز صوت<sup>[۲]</sup>، آنالیز روغن<sup>[۳]</sup>، آنالیز دما<sup>[۴]</sup>، آنالیز رطوبت<sup>[۵]</sup> و آنالیز فشار<sup>[۶]</sup> - محاسبه شود.<sup>[۱]</sup> «سرعت شکست» تابع فرایند پواسون با پارامتر  $\lambda(x_n)$  است. این پارامتر با مقدار شرایط دستگاه متناسب است. برای سادگی فرض شده است که شکست‌ها در انتهای

دوره روی خواهد داد؛ این فرض چندان واقعی نیست اما چنانچه طول بازه‌های زمانی بین بازرسی‌ها را کوتاه در نظر بگیریم، فرض اخیر تأثیر چندانی بر انتخاب سیاست نگهداری و تعمیرات نخواهد داشت. همچنین زمان تعمیرات اساسی دستگاه و اقدامات نگهداری و تعمیرات ناچیز فرض شده است. مقدار زوال<sup>[۷]</sup> (فرسایش) دستگاه در دوره‌ی  $n$  را با  $y_n$  نمایش می‌دهیم. این پارامتر ناشی از فرسایش طبیعی در دستگاه‌ها است.<sup>[۴]</sup> کاهش عملکرد دستگاه در طول هر دوره روی می‌دهد و متغیری مستقل با تابع چگالی مشخص  $f(y)$  است. در مثال‌های عددی این تابع پواسون در نظر گرفته شده است.

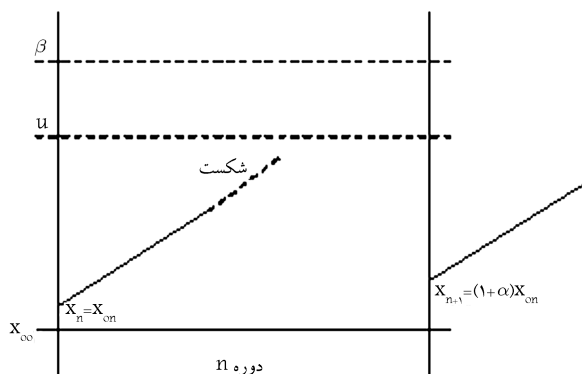
یادآور می‌شود که هر دو پارامتر  $y_n$  و  $y$  بیان‌گر یک مفهوم و مقدارند، با این تفاوت که از  $y_n$  فقط برای انتقال آسان‌تر مفاهیم استفاده شده است. اما در ادامه بنا به فراخور این دو نماد به جای یکدیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه‌ی ثابت  $c$  فرض شده است و در صورت شکست دستگاه هزینه‌ی ثابت  $c_0$  را متحمل خواهیم شد. چنان که پیش‌تر نیز تشریح شد در انتهای هر دوره، با توجه به شرایط دستگاه و مقایسه‌ی آن با آستانه‌ی مفروض، دو گزینه‌ی تصمیم وجود خواهد داشت: ۱. اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه انجام شود؛ ۲. هیچ‌گونه اقدامی صورت نگیرد. در حالتی که دستگاه دچار شکست شود، به‌ناچار باید نسبت به تعمیرات اساسی دستگاه اقدام کرد (شکل ۱). بدیهی است که این اقدام در حیطه‌ی تصمیم‌گیری تصمیم‌گیرنده نیست. در این نوشتار فرض شده است که علاوه بر فرسایش طبیعی دستگاه، هر یک از اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تعمیرات اساسی نیز بر عملکرد دستگاه تأثیر می‌گذارند و هر یک از عوامل فوق نیز یک عامل فرسایشی‌اند؛ لذا در نتیجه‌ی هر دو اقدام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و تعمیرات اساسی، شرایط دستگاه به میزان  $\alpha_i$  درصد بیشتر از شرایط اولیه‌ی خود در مرحله‌ی قبل ( $x_{o(n-1)}$ ) خواهد بود (شکل ۲ و ۳). با این تفاوت که پس از اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مقدار زوال دستگاه در دوره‌ی قبل که ناشی از فرسایش طبیعی دستگاه است، حافظه‌ی آن باقی خواهد ماند. بنابراین:

۱. اگر دستگاه دچار شکست شود، شرایط دستگاه در دوره‌ی  $n+1$  و پس از اجرای تعمیرات اساسی عبارت است از:

$$x_{n+1} = (1 + \alpha_1) \times x_{on} \quad (1)$$

در حالتی که دستگاه در دوره‌ی  $n$  دچار شکست شده باشد، برای بازگرداندن دستگاه به چرخه‌ی تولید اقدام به اجرای تعمیرات اساسی خواهیم کرد. فرض بر آن است که حتی پس از تعمیر اساسی، به دلیل فرسایش ناشی از اجرای



شکل ۱. وقوع شکست.

و هیچ اقدامی نیز صورت نپذیرد برابر است با:

$$x_{n+1} = x_n + y_n \quad (4)$$

در حالتی که شرایط دستگاه در دوره  $n$  کم تر از آستانه بوده و شکستی نیز رخ نداده است، هیچ گونه اقدامی برای بازگرداندن آن به شرایط مطلوب اولیه نیز صورت نخواهد پذیرفت و شرایط دستگاه قابل قبول است. بنابراین شرایط دستگاه به میزان  $y_n$  (ناشی از فرسایش طبیعی دستگاه) بیشتر از شرایط آن در دوره قبل خواهد بود.

یادآور می شود فرسایش طبیعی دستگاه از طریق تعمیر اساسی دستگاه قابل جبران است. اما فرسایش های ناشی از اقدامات تعمیراتی قابل جبران نیست و در نهایت مجبور به تعویض دستگاه با دستگاهی کاملاً مشابه خواهیم شد. در این حالت دستگاه به شرایط اولیه ( $x_{00}$ ) خواهد رسید.

### مدل سازی با استفاده از برنامه ریزی پویا

هدف این نوشتار یافتن آستانه یی برای اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، به منظور کمینه سازی میانگین هزینه ها در برنامه ی CBM است. بنابر مفروضات این نوشتار، هزینه های موجود در برنامه ی CBM فوق عبارتند از: هزینه ی اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، هزینه ی شکست دستگاه، هزینه ی تعویض آن. هزینه ی اقدامات نگهداری و تعمیرات دستگاه را با استفاده از متغیر صفر و یک<sup>۱۸</sup> زیر (رابطه ی ۵) که همان متغیر تصمیم مدل است، و با تعریف پارامتر  $u$  به عنوان آستانه ی اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه خواهیم کرد.

$$Z(x_n, u) = \begin{cases} 0 & x_n \leq u \\ 1 & x_n > u \end{cases} \quad (5)$$

در ارتباط با هزینه ی شکست دستگاه، به دلیل این که لزوماً شکستی اتفاق نخواهد افتاد، از هزینه ی انتظاری شکست دستگاه استفاده خواهیم کرد. این هزینه متناسب با قابلیت اطمینان<sup>۱۹</sup> دستگاه  $e^{-\lambda(x_n+y_n)t}$  خواهد بود:

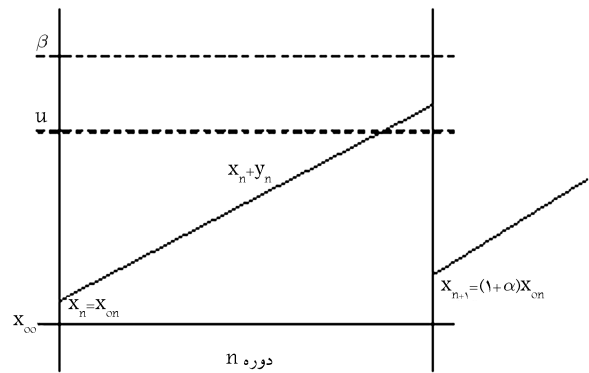
$$c_o [1 - e^{-\lambda(x_n+y_n)t}] \quad (6)$$

رابطه ی ۶ عبارت است از حاصل ضرب احتمال شکست دستگاه در هزینه ی هر بار شکست آن. در این جا فرض بر آن است که برای هر دستگاه در هر بازه زمانی فقط یک بار شکست رخ می دهد. از آنجا که دستگاه پس از تعمیر اساسی به وضعیت مطلوبی خواهد رسید، این فرض چندان دور از واقعیت نیست.

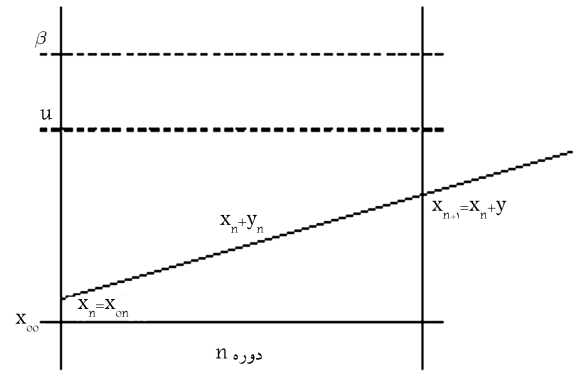
لازم به ذکر است اگرچه عملاً زوال دستگاه ( $y_n$ ) در فاصله ی بین دو بازرسی رخ می دهد، در این مدل سازی فرض بر این است که این زوال در انتهای هر دوره صورت می گیرد. این ساده سازی تأثیر معناداری بر انتخاب سیاست بهینه نخواهد داشت و در صورت معنادار بودن نشان دهنده ی آن است که بازه های زمانی بازرسی طولانی در نظر گرفته شده است.<sup>۴</sup>

هزینه ی انتظاری شکست با استفاده از رابطه ی ۶ و تابع چگالی زوال دستگاه،  $f(y)$ ، مطابق رابطه ی ۷ تعریف می شود:

$$C(x_n) = \int_0^{\infty} c_o [1 - e^{-\lambda(x_n+y)t}] f(y) dy \quad (7)$$



شکل ۲. تجاوز از حد آستانه ی PM.



شکل ۳. عدم تجاوز از حد آستانه ی PM.

تعمیرات، دستگاه به کم ترین شرایط اولیه ی خود در مرحله ی قبل نیز نخواهد رسید و به میزان  $\alpha_1$  درصد افزایش در شرایط (مثلاً افزایش در لرزش) خواهد داشت.

۲. شرایط دستگاه در دوره ی  $n + 1$  در صورتی که هیچ شکستی حادث نشود، و پس از اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه عبارت است از:

$$x_{n+1} = (1 + \alpha_2) \times x_{0n} + y \quad (2)$$

در حالتی که شرایط دستگاه در دوره ی  $n$  بیش از آستانه است و بنابراین برای بازگرداندن آن به شرایط مطلوب اولیه، اقدام به نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه خواهیم کرد. فرض بر آن است که حتی پس از اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، به دلیل فرسایش ناشی از اجرای اقدامات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، دستگاه به کم ترین شرایط اولیه ی خود در مرحله ی قبل نیز نخواهد رسید و به میزان  $\alpha_2$  درصد افزایش در شرایط (مثلاً افزایش در لرزش) خواهیم داشت. در این قسمت فرض بر آن است که پس از اجرای این اقدامات، مقدار زوال ناشی از فرسایش طبیعی دستگاه ( $y$ ) از بین نرفته و در حافظه ی آن باقی خواهد ماند و تنها مقدار پارامتر  $x_n$  تغییر می کند. مقادیر  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  لزوماً با یکدیگر برابر نیستند، اما در این نوشتار برای سادگی در محاسبات این دو مقدار را برابر در نظر گرفته ایم. رابطه ی ۳ بیانگر این موضوع است:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (3)$$

۳. شرایط دستگاه در دوره ی  $n + 1$ ، در صورتی که هیچ شکستی حادث نشود

برای محاسبه‌ی میانگین هزینه، کافی است مقادیر فوق را در احتمال شکست (برای گزینه‌ی اول) و احتمال عدم شکست (برای گزینه‌ی دوم و سوم) ضرب کنیم:

S.t :

$$T = \begin{cases} 0 & (1 + \alpha)x_{on} - \beta \leq 0 \\ 1 & (1 + \alpha)x_{on} - \beta > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$Z(x_n, u) = \begin{cases} 0 & x_n \leq u \\ 1 & x_n > u \end{cases} \quad (17)$$

### تشریح مدل با استفاده از مقادیر عددی

در این بخش پس از تعیین مقدار هر یک از پارامترهای مدل، به حل یک مثال عددی خواهیم پرداخت. مثال عددی برای ۴ دوره و به‌ازاء ۳ آستانه‌ی مشخص محاسبه شده است. این داده‌ها در جدول ۱ تعیین شده‌اند.

پس از حل مدل با استفاده از داده‌های عددی فوق برای ۴ دوره نتایج حاصل شد که در جدول ۲ ارائه شده است.

بنابراین آستانه‌ی بهینه برای مدل فوق با استفاده از داده‌های عددی ارائه شده در جدول ۱ برابر ۱/۲ تعیین شد. این بدان معناست که اگر مقدار شرایط دستگاه از ۱/۲ بیشتر باشد، سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه را اجرا می‌کنیم که در

جدول ۱. مقادیر عددی برای پارامترهای مدل.

ردیف	متغیر/پارامتر	مقدار عددی
۱	$y$	$\sim Possion(0, 15)$
۲	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$	۰٫۱
۳	$\lambda$	۰٫۰۳
۴	$\beta$	۱٫۴
۵	$c_o$	۴۰
۶	$c$	۲
۷	$t$	۱
۸	$x_{oo}$	۱
۹	$M$	۶۰
۱۰	$u_1$	۱
۱۱	$u_2$	۱٫۲
۱۲	$u_3$	۱٫۴

جدول ۲. نتایج نهایی حل مدل.

ردیف	مقدار آستانه	هزینه‌ی انتظاری
۱	$u_1 = 1$	۲۴٫۸
۲	$u_2 = 1٫۲$	۲۳٫۲
۳	$u_3 = 1٫۴$	۲۸

شرایط دستگاه در پایان دوره با پارامتر  $\hat{x}_n$  در رابطه‌ی ۸ متناسب است.

$$\hat{x}_n = (x_n - [x_n - (1 + \alpha) \times x_{on}] \times Z(x_n, u)) \times (1 - T) + x_{oo} \times T \quad (8)$$

در این مدل باید الزاماً محدودیت زیر برقرار باشد:

$$(1 + \alpha)x_{on} \leq \beta \quad (9)$$

رابطه‌ی ۹ تضمین می‌کند که اگر شرایط دستگاه بیشتر از مقدار مشخصی باشد دستگاه تعویض شود.

در رابطه‌ی ۸ مقدار  $T$  که یک متغیر ۰ و ۱ برای نمایش تعویض یا عدم تعویض دستگاه است، با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ مشخص می‌شود.

$$T = f((1 + \alpha)x_{on} - \beta) = \begin{cases} 0 & (1 + \alpha)x_{on} - \beta \leq 0 \\ 1 & (1 + \alpha)x_{on} - \beta > 0 \end{cases} \quad (10)$$

هدف این نوشتار یافتن آستانه‌ی بهینه برای تصمیم‌گیری در رابطه با سیاست نگهداری و تعمیرات بهینه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا است. بدین جهت تابع  $S_n(x_n)$  را به‌عنوان کم‌ترین هزینه‌ی دوره‌ی  $n$  به‌علاوه‌ی مقدار بهینه‌ی هزینه‌های آینده،  $S_{n+1}(x_{n+1})$ ، تعریف می‌کنیم. این تابع به متغیر تصمیم و مقدار  $y$  وابسته است.

$$cZ(x_n, u) + C(\hat{x}_n) \quad (11)$$

رابطه‌ی ۱۱ نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی دوره‌ی  $n$  است. مقدار  $S_{n+1}(x_{n+1})$  بنابر حالتی که در دوره‌ی  $n$  رخ داده دارای حالات مختلفی خواهد بود:

۱. اگر در دوره‌ی  $n$  شکست رخ داده باشد:

$$S_{n+1}(x_{n+1}) = S_{n+1}((1 + \alpha)x_{on}) \quad (12)$$

۲. اگر در دوره‌ی  $n$  شکست رخ نداده باشد و نسبت به نگهداری و تعمیرات اصلاحی اقدام شده باشد (شرایط در پایان دوره بیشتر از آستانه باشد):

$$S_{n+1}(x_{n+1}) = S_{n+1}((1 + \alpha)x_{on} + y_n) = S_{n+1}(\hat{x}_n + y_n) \quad (13)$$

۳. اگر در دوره‌ی  $n$  شکست رخ نداده باشد و نگهداری و تعمیرات اصلاحی نیز انجام نشده باشد (شرایط در پایان دوره کم‌تر از آستانه باشد):

$$S_{n+1}(x_{n+1}) = S_{n+1}(x_{n+1} = x_n + y_n) = S_{n+1}(\hat{x}_n + y_n) \quad (14)$$

به‌منظور واردکردن محاسبات مربوط به تعویض دستگاه از پارامتر  $M$  به‌عنوان هزینه‌ی تعویض و از متغیر ۰ و ۱ به‌عنوان متغیر تصمیم استفاده می‌کنیم. در این نوشتار فرض بر آن است که زمان تعویض دستگاه کم‌تر از طول یک دوره است. بنابراین خواهیم داشت:

$$S_n(x_n) = \min_{Z(x_n, u)} \left\{ cZ(x_n, u) + C(\hat{x}_n) + T \times M + \int_0^\infty S_{n+1}(\hat{x}_n + y) e^{-\lambda(\hat{x}_n + y)t} f(y) dy + S_{n+1}(\hat{x}_n) \left[ 1 - \int_0^\infty e^{-\lambda(\hat{x}_n + y)t} f(y) dy \right] \right\} \quad (15)$$

فضای رقابتی کنونی برای سازمان‌ها الزامی می‌نماید و از سوی دیگر به سبب افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات -- شامل مواردی همچون هزینه‌های بازرسی، تعویضات غیرضروری و انبارش قطعات یدکی -- به افزایش هزینه‌های سازمان منجر خواهد شد. برنامه‌ی CBM به عنوان رویکرد تصمیم‌گیری براساس شرایط، با حفظ منافع حاصل از نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه متضمن کاهش هزینه‌های هنگامت نگهداری و تعمیرات در سازمان‌هاست. لذا در این نوشتار، پس از ساده‌سازی برنامه‌ی CBM در پی یافتن نقطه‌ی مناسب برای اجرای سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، با استفاده از منطق برنامه‌ریزی پویا بوده‌ایم.

این صورت هزینه‌ی انتظاری برنامه‌ی CBM در کمینه‌ی خود از بین سه آستانه‌ی جدول ۲ قرار دارد.

## نتیجه‌گیری

پیاده‌سازی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، از یک سو به لحاظ برخورداری از قابلیت کاهش هزینه‌های ناشی از شکست دستگاه و افزایش ضریب اطمینان آن، در

## پانویس

1. condition based maintenance (CBM)
2. condition monitoring (CM)
3. preventive maintenance (PM)
4. data acquisition
5. data processing
6. maintenance decision-making
7. diagnosis
8. prognosis
9. decision support system (DSS)
10. threshold
11. vibration analysis
12. acoustic analysis
13. oil analysis
14. temperature analysis
15. moisture, humidity analysis
16. pressure analysis
17. deterioration
18. binary variable
19. reliability

## منابع

1. Jardine, A.; Lin, D. and Banjevic, D. "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **20**, pp. 1483-1510 (2006).
2. Martin, K. "A review by discussion of condition monitoring and fault-diagnosis in machine-tools", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **34**, pp. 527-551 (1994).
3. Lee, J. and Abujamra, R. "An integrated platform for diagnostics, prognostics and maintenance optimization", The IMS '2004 International Conference on Advances in Maintenance and in Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradations, Arles, France (2004).
4. Barbera, F.; Schneider, H. and Kelle, P. "A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals", *The Journal of the Operational Research Society*, **47**(8), pp. 1037-1045 (1996).
5. Barbera, F.; Schneider, H. and Watson, E. "A condition based maintenance model for a two-unit series system", *European Journal of Operational Research*, **116**, pp. 281-290 (1999).
6. Amari, S. and McLaughlin, L. "Optimal design of a condition-based maintenance model", *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles, CA, USA*, pp. 528-533 (2004).
7. Campbell, J.; Thompson, B. and Swiler, L. "Consequence analysis in predictive health monitoring systems", *Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management*, pp. 1353-1358 (2002).
8. Castanier, B.; Berenguer, C. and Grall, A. "A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear", *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, **19**, pp. 327-347 (2003).
9. Chan, G. and Asgarpoor, S. "Optimum maintenance policy with Markov processes", *Electric Power Systems Research*, **76**, pp. 452-456 (2006).
10. Chen, D. and Trivedi, K. "Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process", *Reliability Engineering and System Safety*, **90**, pp. 25-29 (2005).
11. Dieulle, L.; Berenguer, C.; Grall, A. and Roussignol, M. "Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system", *European Journal of Operational Research*, **15**, pp. 451-461 (2003).
12. Grall, A.; Berenguer, C. and Dieulle, L. "A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems", *Reliability Engineering and System Safety*, **76**, pp. 167-180 (2002).
13. Lugtigheid, D.; Banjevic, D. and Jardine, A. "Modelling repairable system reliability with explanatory variables and repair and maintenance actions", *IMA Journal Management Mathematics*, **15**, pp. 89-110 (2004).
14. Scarf, P. "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research*, **99**, pp. 493-506 (1997).
15. Wang, W. "A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance", *International Journal of Production Research*, **38**, pp. 1425-1436 (2000).

