

# بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی برای سیستم زوال‌پذیر با لحاظ نت کامل و ناکامل

مرتضی سلطانی (کارشناس ارشد)

ابراهیم تیموری\* (دانشیار)

فهمیه پورمحمدی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۹  
دوری (۳۶-۱)، شماره ۱/۲، ص. ۳۷-۵۰

حفظ پیوستگی فعالیت سیستم‌های تولیدی در گرو برنامه‌ریزی صحیح عملیات نگهداری و تعمیرات (نت) و پشتیبانی از آن است. از آنجایی که تقاضای قطعات یدکی وابسته به برنامه‌ریزی عملیات نت است، بهینه‌سازی مجزای عملیات نت و موجودی منجر به زیربهرینگی می‌شود. پژوهش حاضر، مدلی برای بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی قطعات یدکی در سیستم زوال‌پذیر ارائه می‌دهد که در آن علاوه بر عملیات نت اصلاحی و پیشگیرانه‌ی کامل، امکان انجام نت پیشگیرانه‌ی ناکامل نیز وجود دارد. سیاست تکمیل موجودی بر اساس سطح زوال سیستم در ساختاری دوطبقه‌ی شکل می‌گیرد. همچنین، زمان بازرسی بر مبنای سطح زوال سیستم، قابلیت اطمینان و کفایت موجودی برای انجام نت مورد انتظار تعیین می‌شود. کاربرد مدل در دنیای واقعی با استفاده از مطالعه‌ی موردی بررسی شده و برای حل مسئله از رویکرد شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج حاصل از حل نشان می‌دهد که لحاظ کردن نت ناکامل تأثیر چشمگیری بر کاهش هزینه‌های سیستم دارد.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات، کنترل موجودی قطعات یدکی، سیستم زوال‌پذیر، نت پیشگیرانه‌ی ناکامل، شبیه‌سازی مونت کارلو.

## ۱. مقدمه

هم‌زمان این دو فعالیت در کاهش هزینه‌های سیستم اشاره کرده‌اند. ارتباط تنگاتنگ فعالیت‌های نت و موجودی قطعات یدکی و تلاش برای کاهش هزینه‌ها سبب توجه مدیران و پژوهشگران به بهینه‌سازی هم‌زمان این دو فعالیت شده است. از طرف دیگر، اغلب سیستم‌های تولیدی زوال‌پذیر هستند؛ یعنی به مرور زمان با افزایش مصرف و سن، رو به زوال می‌روند و در نهایت با رسیدن به آستانه‌ی خرابی متوقف می‌شوند. نحوه و سرعت زوال سیستم تا رسیدن به آستانه‌ی خرابی و توقف، متأثر از رویکرد نگهداری و تعمیرات است. در این حوزه رویکردهای نگهداری و تعمیرات مختلفی به کار گرفته می‌شوند که برای نمونه می‌توان به انواع نت پیشگیرانه از قبیل نت دوره‌ی، نت عمرمحور و نت وضعیت محور اشاره کرد. علاوه بر این عملیات نت دارای درجات مختلفی است. اگرچه نت پیشگیرانه‌ی کامل می‌تواند سیستم را به حالت «به خوبی نو» بازگرداند و به عبارتی سطح زوال آن را به صفر برساند، اما زمان‌بر و هزینه‌بر است. پس بسته به شرایط، می‌توان از نت پیشگیرانه‌ی ناکامل بهره برد. این نوع از عملیات نت، سطح زوال را به صفر نمی‌رساند، اما سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر است. استفاده‌ی ترکیبی از این دو عملیات می‌تواند هزینه‌ها را به طور چشمگیری کاهش دهد.

انجام به موقع بیشتر فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات (نت) در گرو در دسترس بودن قطعات یدکی و ابزار و تجهیزات مورد نیاز است. پس برای افزایش تعمیرپذیری و کاهش زمان توقف سیستم (با اجتناب از آن)، قطعات یدکی مورد نیاز باید همواره در دسترس باشند. بیشتر مدل‌های بهینه‌سازی در حوزه‌ی برنامه‌ریزی فعالیت‌های نت فرض می‌کنند قطعات یدکی در موقع نیاز در دسترس هستند، اما در واقعیت همیشه این‌گونه نیست. کمبود قطعات یدکی منجر به تأخیر در اجرای عملیات نت یا در مواردی توقف سیستم می‌شود. از طرف دیگر تقاضای قطعات یدکی عموماً وابسته به برنامه‌ریزی عملیات نت است؛ بنابراین، بهینه‌سازی مجزای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی به زیربهرینگی و افزایش هزینه‌ها می‌انجامد. کبیر و العالیان<sup>[۲۲]</sup> نشان داده‌اند که بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی قطعات یدکی می‌تواند هزینه‌های سیستم را تا بیست درصد کاهش دهد. ون‌هورنیک و همکاران<sup>[۶]</sup> نیز در پژوهش مروری خود چندین بار به تأثیر بهینه‌سازی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۲/۱۳۹۸، اصلاحیه ۷/۹/۱۳۹۸، پذیرش ۲۷/۸/۱۳۹۸.

DOI:10.24200/J65.2019.53074.1987

جدول ۱. دسته‌بندی مقالات بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی قطعات یدکی.

شماره دسته	سیاست موجودی	سیاست نت	نمونه از مقالات هم‌زمان مربوط به هر دسته
۱	مرور دورویی	نت دورویی	[۷-۱۱]
۲	مرور دورویی	نت عمر - محور	[۱۲]
۳	موجودی	نت شرایط - محور	[۱۳-۱۵]
۴	مرور	نت دورویی	[۱۶-۲۰]
۵	پیوسته‌ی	نت عمر - محور	[۲۰-۲۲]
۶	موجودی	نت شرایط - محور	[۲۳-۲۹]

در جدول ۲، زوال‌پذیر بودن سیستم، نوع سیاست نت و موجودی، در نظر گرفتن عملیات نت پیشگیرانه‌ی ناکامل، در نظر گرفتن سطح دسترسی و قابلیت اطمینان، نوع زمان تدارک، ساختار زنجیره‌ی تأمین و روش حل مشخص شده است. پژوهش حاضر اولین پژوهشی است که بحث عملیات نت ناکامل را در بهینه‌سازی هم‌زمان نت و موجودی سیستم‌های زوال‌پذیر در نظر گرفته است. همچنین بحث چندطبقه‌ی و چندمکانی بودن زنجیره‌ی تأمین اولین بار است که در این حوزه مطرح می‌شود. علاوه بر این در پژوهش حاضر، بازپس‌سازی موجودی با توجه به سطح زوال انجام می‌شود. امکان تأمین قطعه توسط تأمین‌کنندگان نیز تصادفی است. در پژوهش حاضر، سطح دسترسی مورد انتظار از سیستم توسط تصمیم‌گیرنده تعیین و به عنوان یک محدودیت در نظر گرفته می‌شود.

### ۳. تعریف مسئله

سیستم زوال‌پذیری را در نظر بگیرید که به مرور زمان سطح زوال آن افزایش می‌یابد تا از آستانه‌ی زوال عبور کند و خرابی (توقف سیستم) رخ دهد. در این سیستم فقط از طریق عملیات بازرسی می‌توان علائم خرابی را رصد کرد و به اطلاعاتی برای تعیین میزان (سطح) زوال سیستم دست یافت. در هر بازرسی امکان انجام دو نوع عملیات نگهداری و تعمیرات (نت) وجود دارد:

۱. نت پیشگیرانه‌ی کامل<sup>۱</sup>: در این نوع از عملیات نت، سطح زوال سیستم به حالت «به خوبی سیستم نو» یا سطح زوال صفر می‌رسد. این عملیات قبل از وقوع خرابی انجام می‌شود.
۲. نت پیش‌گیرانه‌ی ناکامل<sup>۲</sup>: این نوع از عملیات نت، سطح زوال سیستم را به صفر نمی‌رساند و سیستم را در حالتی بین حالت «به خوبی سیستم نو» و «به بدی سیستم قبلی» قرار می‌دهد. علاوه بر این، سرعت زوال سیستم پس از عملیات نت ناکامل افزایش می‌یابد.

عملیات نت ناکامل نسبت به نت کامل سریع‌تر است، به دقت و تجهیزات کمتری نیاز دارد، و انجام آن توسط نیروی انسانی غیرماهر نیز امکان‌پذیر است؛ در نتیجه هزینه‌ی نت ناکامل در مقایسه با نت کامل کمتر است. اما با توجه به افزایش سرعت زوال پس از عملیات نت ناکامل، در نهایت شرایطی به وجود می‌آید که سیستم بلافاصله پس از نت ناکامل متوقف می‌شود یا انجام نت ناکامل منجر به راه‌اندازی مجدد سیستم نمی‌شود. با توجه به این‌که انجام همیشگی نت کامل نیز بسیار هزینه‌بر است، برای کاهش هزینه‌ها از رویکرد ترکیبی استفاده می‌شود.

در پژوهش حاضر، یک سیستم تک‌جزئی زوال‌پذیر در نظر گرفته شده است که تعیین سطح زوال آن صرفاً از طریق بازرسی امکان‌پذیر است. در هر بازرسی امکان انجام عملیات نت پیشگیرانه‌ی کامل یا ناکامل وجود دارد. علاوه بر این، در صورت خرابی، عملیات نت اصلاحی انجام می‌شود. هدف، تعیین بهترین زمان بازرسی‌ها و ترکیب عملیات نت کامل و ناکامل، هم‌زمان با تعیین اندازه‌ی سفارش و زمان سفارش مجدد با توجه به سطح زوال سیستم است. بدیهی است که هرچا سخن از تأمین و سفارش به میان آید، مفاهیم مرتبط با زنجیره‌ی تأمین نیز مطرح می‌شود. زنجیره‌ی تأمین قطعات یدکی می‌تواند ساختارهای متفاوتی داشته باشد: یعنی چندطبقه‌ی یا چندمکانی باشد. در پژوهش حاضر، یک ساختار ترکیبی دو طبقه‌ی/چندمکانی با دو تأمین‌کننده‌ی محلی در سطح اول و یک تأمین‌کننده‌ی اصلی در سطح دوم در نظر گرفته شده است.

در ادامه، در بخش دوم به مرور پژوهش‌های پیشین در زمینه‌ی سیستم‌های زوال‌پذیر و بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی قطعات یدکی پرداخته خواهد شد. بخش سوم به تعریف مسئله و مفروضات آن و بخش چهارم به مدل‌سازی اختصاص دارد. در بخش پنجم به حل مسئله و ارائه‌ی نتایج مربوط به مطالعه‌ی موردی می‌پردازیم. تحلیل حساسیت مدل در بخش ششم صورت می‌گیرد و در بخش هفتم به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پرداخته خواهد شد.

### ۲. مبانی و پیشینه‌ی پژوهش

پیرسکالا و ولکر<sup>[۱]</sup> جزء اولین پژوهشگرانی بودند که به مسئله‌ی نگهداری و تعمیرات سیستم‌های زوال‌پذیر پرداختند. پس از آن پژوهشگران بسیاری به این مسئله پرداخته و مفاهیم مرتبط با نت سیستم‌های زوال‌پذیر را توسعه داده‌اند<sup>[۲-۴]</sup>؛ از این رو، پیشینه‌ی این حوزه بسیار غنی است. با توجه به این‌که عموماً سطح زوال سیستم را می‌توان توسط بازرسی و ابزارهای پایشی برخط و برون‌خط مشخص کرد، بیشتر پژوهش‌های این حوزه از نت وضعیت محور استفاده کرده‌اند. تعدادی از این پژوهش‌ها در جداول ۱ و ۲ مرور شده‌اند.

اولین بار فاکنر<sup>[۴]</sup> در سال ۱۹۶۸ بحث بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی را مطرح کرد. او در پژوهش خود برای تعیین بهترین توالی نت و سطح موجودی قطعات یدکی از برنامه‌ریزی پویا استفاده کرده است. پس از فاکنر، آکارا و همکاران<sup>[۵]</sup> از طریق مقایسه‌ی هزینه‌های مدل بهینه‌سازی هم‌زمان با مدل‌های بهینه‌سازی ترتیبی، به گسترش این حوزه کمک شایانی کردند. ون‌هورنیک و همکاران<sup>[۶]</sup> مقالات بهینه‌سازی هم‌زمان را تا سال ۲۰۱۰ مرور و شکاف‌های تحقیقاتی را مشخص کرده‌اند. به طور کلی پژوهش‌های این حوزه را می‌توان بر اساس سیاست مرور موجودی و سیاست نت به ۶ دسته‌ی کلی تقسیم کرد. در جدول ۱ تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در هر دسته معرفی شده‌اند.

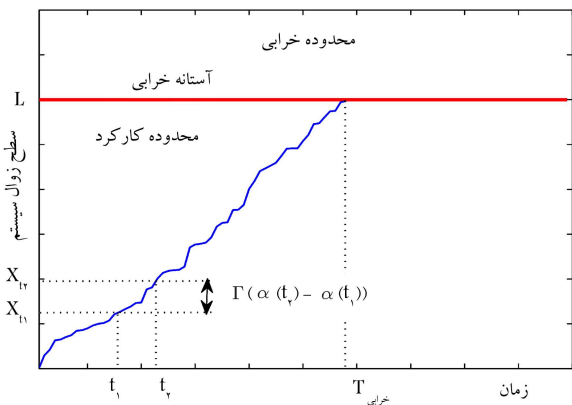
همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، هر دو سیاست مرور دوره‌ی و مرور پیوسته در پیشینه‌ی این حوزه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. با توسعه‌ی فناوری در اوایل قرن ۲۱ ام امکان پایش سیستم‌های گوناگون را به صورت برخط فراهم شد، نگهداری و تعمیرات وضعیت محور به طور گسترده در مدل‌ها استفاده شده است.<sup>[۲]</sup> علاوه بر این، چند پژوهش نیز در حوزه‌ی نت پیشگویانه انجام شده است.<sup>[۳، ۱۴]</sup> به موازات توسعه‌ی مدل‌های بهینه‌سازی هم‌زمان، این مفاهیم در سیستم‌های زوال‌پذیر نیز به کار گرفته شده‌اند. این پژوهش‌ها در جدول ۲ بررسی شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، همه‌ی این پژوهش‌ها از نت وضعیت محور استفاده کرده‌اند.

جدول ۲. مرور پژوهش‌های موجود در حوزه بهینه‌سازی هم‌زمان نت و موجودی.

شماره مرجع	نویسنده مقاله	سال	سیستم	سیاست نت		سیاست مرور	موجودی	مدل	زمان تدارک	ساختار زنجیره رویکرد حل	شبه‌سازی	چندمکانی	ثابت	تصادفی	قابلیت اطمینان	سطح دسترسی	کمینه‌سازی هزینه‌ها	سفارش بر اساس سطح زوال	
				شرایط محور	عمر محور														
[۵]	آکاریا و همکاران	۱۹۸۶		✓							✓								
[۲۱]	کبیر و العلیان	۱۹۹۴			✓						✓								
[۱۲]	آرمسترانگ و اتکینز	۱۹۹۶			✓								✓						
[۲۲]	کبیر و العلیان	۱۹۹۶			✓								✓						
[۳۱]	کبیر و العلیان	۱۹۹۶			✓								✓						
[۱۶]	سارکر و هاک	۲۰۰۰				✓							✓						
[۷]	چلبی و آکادی	۲۰۰۱				✓							✓						
[۱۷]	ایلدگین و تونالی	۲۰۰۶				✓							✓						
[۱۳]	الوانی و جبرئیل	۲۰۰۸		✓									✓						
[۲۳]	ونگ و همکاران	۲۰۰۸		✓									✓						
[۱۸]	نگویان و باگاجویج	۲۰۰۸			✓								✓						
[۲۵]	ونگ و همکاران	۲۰۰۸		✓									✓						
[۲۴]	ونگ و همکاران	۲۰۰۹			✓							✓	✓						
[۸]	ونگ	۲۰۱۱			✓								✓						
[۲۶]	کونستانینو و همکاران	۲۰۱۳			✓								✓						
[۱۹]	کاظمی زنجانی و نورالفتح	۲۰۱۴		✓									✓						
[۲۷]	ونگ و همکاران	۲۰۱۵			✓								✓						
[۹]	ژیانگ و همکاران	۲۰۱۵			✓								✓						
[۱۰]	کادرو و همکاران	۲۰۱۶			✓								✓						
[۲۰]	شی و همکاران	۲۰۱۶		✓	✓								✓						
[۲۸]	الدکیزر و همکاران	۲۰۱۷			✓								✓						
[۲۹]	وانگ و زنگ	۲۰۱۷			✓								✓						
[۱۴]	نگویان و همکاران	۲۰۱۷			✓								✓						
[۱۵]	زاهدی و همکاران	۲۰۱۷			✓								✓						
[۳۲]	اروگوز و همکاران	۲۰۱۷			✓								✓						
[۱۱]	صیدیق و همکاران	۲۰۱۸			✓								✓						
	پژوهش حاضر	۲۰۱۹		✓	✓							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

علاوه بر این با توجه به تصادفی بودن وقوع خرابی، این امکان وجود دارد که نقصان در عملکرد سیستم در بازه‌ی زمانی بین بازرسی‌های تعیین شده به وقوع بپیوندد. در صورت بازرسی و رصد شدن خرابی و توقف سیستم، نت اصلاحی انجام می‌شود. در نت اصلاحی سطح زوال به حالت «به خوبی سیستم نو» یا سطح زوال صفر می‌رسد؛ اما هزینه عملیات نت اصلاحی از نت پیشگیرانه‌ی کامل بیشتر است. در هر سه عملیات نت (کامل، ناکامل و اصلاحی) تعویض قطعه صورت می‌پذیرد. در واقع انجام عملیات نگهداری و تعمیرات در گرو در دسترس بودن قطعات یدکی است. کمبود قطعه می‌تواند منجر به توقف سیستم شود که هزینه‌های گزافی در پی خواهد داشت؛ پس تعیین سیاست مناسب و کنترل موجودی قطعات یدکی از اهمیت بالایی برخوردار است. موجودی قطعات یدکی باید به گونه‌ی تعیین شود که از یک طرف برای انجام عملیات نت با کمبود مواجه نشویم و از طرف دیگر انباشت مازاد قطعات منجر به هزینه‌های اضافی، خواب سرمایه و منسوخ شدگی نشود. ساختار لجستیکی تأمین قطعه در این مسئله، به صورت دوطبقه‌ی/چندمکانی، شامل دو تأمین‌کننده‌ی محلی (یا دو انبار محلی) و یک تأمین‌کننده‌ی اصلی است. تأمین‌کنندگان محلی در زمان تدارک متفاوت‌اند؛ در نتیجه اولویت سفارش‌دهی با کونه‌ترین زمان تدارک است. همچنین در شرایطی که هیچ‌کدام از تأمین‌کنندگان محلی موجودی نداشته باشند، امکان سفارش اضطراری از تأمین‌کننده‌ی اصلی وجود دارد. هدف این پژوهش، تعیین بهترین تناوب زمان بازرسی‌ها، بهترین ترکیب عملیات نت پیشگیرانه (کامل و ناکامل)، تعیین اندازه‌ی سفارش و زمان سفارش مجدد بر

علاوه بر این با توجه به تصادفی بودن وقوع خرابی، این امکان وجود دارد که نقصان در عملکرد سیستم در بازه‌ی زمانی بین بازرسی‌های تعیین شده به وقوع بپیوندد. در صورت بازرسی و رصد شدن خرابی و توقف سیستم، نت اصلاحی انجام می‌شود. در نت اصلاحی سطح زوال به حالت «به خوبی سیستم نو» یا سطح زوال صفر می‌رسد؛ اما هزینه عملیات نت اصلاحی از نت پیشگیرانه‌ی کامل بیشتر است. در هر سه عملیات نت (کامل، ناکامل و اصلاحی) تعویض قطعه صورت می‌پذیرد. در واقع انجام عملیات نگهداری و تعمیرات در گرو در دسترس بودن قطعات یدکی است. کمبود قطعه می‌تواند منجر به توقف سیستم شود که هزینه‌های گزافی در پی خواهد داشت؛ پس تعیین سیاست مناسب و کنترل موجودی قطعات یدکی از



شکل ۱. نحوه‌ی زوال سیستم.

به طوری که:

$$\text{if } f_{\alpha_k(t_2-t_1),\beta}(x) \geq 0, I_{(x \geq 0)} = 1 \quad (2)$$

$$\text{Otherwise } I_{(x \geq 0)} = 0 \quad (3)$$

همچنین:

$$\alpha_k = \frac{\nu_k}{\beta} \quad (4)$$

بدیهی است که در زمان صفر و در سطح زوال  $X_0$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  هر دو مقدار ۱ را می‌گیرند. شکل ۱ میزان زوال سیستم را در بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_2]$  نشان می‌دهد.

### ۳.۴. سیاست تکمیل موجودی

در مدل‌سازی این مسئله برخلاف مدل‌های رایج در حوزه‌ی مدیریت موجودی، نقطه‌ی سفارش مجدد به سطح زوال سیستم، که یکی از ویژگی‌های اصلی سیستم به‌شمار می‌رود، وابسته است. بدین منظور آستانه‌ی زوال با نماد  $T$  تعریف شده است و در صورتی که سطح زوال پس از انجام عملیات نت، در سطحی بالاتر از این آستانه قرار داشته باشد، آن‌گاه تا سقف موجودی (مقدار  $S$ ) سفارش‌گذاری انجام می‌شود.<sup>[۲۲]</sup> در این مدل سطح موجودی برابر است با جمع موجودی در راه (سفارش داده شده و تحویل داده نشده) و موجودی در دسترس یا موجود در انبار قطعات خریدار. بنابراین، مقدار سفارش بهینه در هر نقطه‌ی تصمیم از فرمول زیر به دست خواهد آمد:

$$\text{مقدار سفارش} = \text{موجودی انبار} - \text{موجودی راه} - \text{سقف موجودی} \quad (5)$$

در واقع برای مدل‌سازی سیاست موجودی از رویکرد  $(T, S)$  استفاده شده است؛ بدین معنی که اگر سطح زوال بعد از انجام بازرسی و انجام عملیات نت احتمالی، بالاتر از آستانه‌ی  $T$  بود، تا مقدار  $S$  سفارش برای قطعه‌ی یدکی انجام می‌پذیرد. سیاست سفارش و تعیین زمان بازرسی به گونه‌ی است که اجازه‌ی وقوع کمبود را در بازرسی‌هایی که قبل از وقوع خرابی سیستم انجام می‌شود، نمی‌دهد. به عبارتی دیگر، در هنگام انجام عملیات نت پیشگیرانه‌ی کامل یا ناکامل با کمبود قطعه مواجه نخواهیم شد؛ زیرا زمان بازرسی بعدی به گونه‌ی تعریف می‌شود که موجودی قطعه‌ی یدکی برای انجام عملیات پیشگیرانه‌ی مورد انتظار کفایت کند. اما چنانچه در یک بازرسی نیاز به نت اصلاحی باشد، در صورتی که با کمبود مواجه باشیم باید در همان لحظه سفارش دهیم. مقدار سفارش در این حالت نیز به گونه‌ی تعیین می‌شود که کل

اساس سطح زوال سیستم برای کمیته‌سازی هزینه‌هاست. سایر مفروضات به شرح زیر است:

-- سیستم تک جزئی است و انجام عملیات نت فقط به یک نوع قطعه‌ی یدکی نیاز دارد. سیستم مورد بررسی در واقع زیرسیستمی از یک سیستم تولیدی است که توقف آن منجر به توقف تولید خواهد شد.

-- سود از دست رفته‌ی ناشی از توقف سیستم در مدل لحاظ شده است.

-- حداقل زمان سطح دسترسی سیستم توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود.

-- میزان بهبود در سطح زوال در هر بار عملیات نت ناکامل تصادفی است. همچنین سرعت زوال پس از انجام نت ناکامل به صورت تصادفی افزایش می‌یابد.

-- در هنگام انجام نت ناکامل نیز تعویض قطعه صورت می‌گیرد؛ اما قرار دادن قطعه‌ی جدید لزوماً به منزله‌ی انجام نت کامل نیست. زیرا کیفیت انجام عملیات نت فقط به تعویض قطعه بستگی ندارد و به عوامل دیگری همچون کیفیت نصب و کیفیت کار سایر قطعات سیستم نیز وابسته است.

-- از زمان انجام عملیات‌های مختلف نت صرف نظر شده است.

-- قیمت خرید قطعات تأمین شده توسط تأمین‌کنندگان محلی یکسان است و پارامتر زمان تدارک قطعه به فاصله‌ی تأمین‌کننده با خریدار بستگی دارد و برای هر تأمین‌کننده ثابت است.

-- هزینه‌های سفارش دهی شامل هزینه‌ی خرید قطعات و هزینه‌ی ثابت سفارش دهی است. هزینه‌ی ثابت سفارش دهی وابسته به نوع سفارش است. هزینه‌ی سفارش اضطراری از تأمین‌کننده‌ی اصلی به مراتب از هزینه‌ی سفارش‌های عادی از تأمین‌کنندگان محلی بیشتر است.

## ۴. مدل‌سازی

در این قسمت پس از معرفی علائم و اختصارات به کار رفته، مدل ارائه شده تشریح خواهد شد.

### ۴.۱. علائم و اختصارات

علائم و اختصارات به کار رفته در مدل مطابق جدول ۳ به تفکیک اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم ارائه شده است.

### ۴.۲. مدل‌سازی زوال‌پذیری سیستم

در پیشینه‌ی سیستم‌های زوال‌پذیر عمدتاً از فرایند گاما برای تعیین میزان زوال در بازه‌ی زمانی کارکرد سیستم استفاده می‌شود.<sup>[۲]</sup> ویژگی اصلی فرایند زوال تحت توزیع گاما (با دو پارامتر شکل و بعد) این است که این فرایند به صورت یک‌نواخت افزایش می‌یابد که دقیقاً مشابه فرایند زوال فیزیکی سیستم‌ها در دنیای واقعی است. مثلاً برای بازه‌ی زمانی  $[t_1, t_2]$  سطوح زوال  $X_{t_1}$  و  $X_{t_2}$  به ترتیب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، متغیر تصادفی  $X_{t_2} - X_{t_1}$  از توزیع گاما با پارامتر شکل  $\alpha_k(t_2 - t_1)$  و پارامتر بعد  $\beta$  با تابع چگالی زیر پیروی می‌کنند:

$$f_{\alpha_k(t_2-t_1),\beta}(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha_k(t_2 - t_1))} \beta^{\alpha_k(t_2-t_1)} x^{\alpha_k(t_2-t_1)-1} e^{-\beta x} I_{(x \geq 0)} \quad (1)$$

جدول ۳. علائم و اختصارات به کار رفته در مدل.

اندیس ها:	
اندیس مربوط به بازه زمانی چرخه‌ی عمر سیستم (پهلوسته)	$t$
اندیس مربوط به تعداد دفعات بازرسی	$i$
اندیس مربوط به تعداد دفعات نت ناکامل متوالی	$k$
اندیس مربوط به تأمین‌کنندگان محلی	$s_1, s_2$
اندیس مربوط به سفارش معمولی	$o$
اندیس مربوط به عملیات نت اصلاحی	$c$
اندیس مربوط به تأمین‌کنندگان/سفارش اضطراری	$oe$
اندیس مربوط به عملیات نت پیشگیرانه‌ی ناکامل	$ip$
اندیس مربوط به عملیات نت پیشگیرانه‌ی کامل	$p$
متغیرهای تصمیم:	
آستانه‌ی انجام نت پیشگیرانه	$M$
بیشینه‌ی تعداد نت ناکامل متوالی	$K$
سطح زوال سفارش دهی	$T$
سقف موجودی قطعه	$S$
پارامترها:	
پارامتر مربوط به شکل در توزیع گامای متغیر تصادفی تغییر سطح زوال	$\alpha_k$
پارامتر مربوط به بعد در توزیع گامای متغیر تصادفی تغییر سطح زوال	$\beta$
احتمال وقوع خرابی بین دو بازرسی	$Q$
آستانه‌ی وقوع خرابی	$L$
عامل مؤثر در تابع توزیع متغیر افزایش سرعت زوال سیستم	$\gamma$
زمان تدارک قطعه‌ی تأمین شده از تأمین کننده‌ی ۱	$LT_{s_1}$
زمان تدارک قطعه‌ی تأمین شده از تأمین کننده‌ی ۲	$LT_{s_2}$
زمان تدارک قطعه‌ی تأمین شده از طریق تأمین کننده‌ی اصلی	$LT_{oe}$
هزینه‌ی خرید هر قطعه	$C_{pur}$
هزینه‌ی نگهداری هر قطعه	$C_h$
هزینه‌ی هر بار سفارش معمولی	$C_o$
هزینه‌ی سفارش اضطراری از تأمین کننده	$C_{oe}$
مدت زمان نقصان در عملکرد سیستم	$d_1(t)$
مدت زمان توقف سیستم	$d_2(t)$
هزینه‌ی مربوط به نقصان (اشکال) در عملکرد سیستم	$C_{d_1}$
هزینه‌ی مربوط به توقف سیستم	$C_{d_2}$
هزینه‌ی هر بار بازرسی	$C_i$
هزینه‌ی هر بار نت اصلاحی	$C_c$
هزینه‌ی نت ناکامل $ka_m$	$C_P^K$
هزینه‌ی نت پیشگیرانه کامل	$C_P^o$
تعداد قطعات مورد استفاده در عملیات نت اصلاحی	$CMS$
تعداد قطعات مورد استفاده در عملیات نت پیشگیرانه‌ی کامل	$PMS$
تعداد قطعات مورد استفاده در عملیات نت پیشگیرانه‌ی ناکامل	$IPMS$

متغیرهای حالت:	
میزان بهبود در سطح زوال حاصل از نت ناکامل $k$ ام	$Z^k$
زمان بازرسی $i$ ام	$T_i$
میزان افزایش سرعت زوال پس از انجام $k$ نت کامل	$\varepsilon_k$
تعداد بازرسی انجام شده	$N_i(t)$
تعداد نت پیشگیرانه‌ی ناکامل $k$ ام انجام شده	$N_{ipk}(t)$
تعداد کل نت پیشگیرانه‌ی کامل انجام شده	$N_p(t)$
تعداد نت اصلاحی انجام شده	$N_c(t)$
تعداد سفارش معمولی انجام شده	$N_o(t)$
تعداد سفارش اضطراری انجام شده	$N_{oe}(t)$
سطح موجودی کل (شامل موجودی در راه و موجودی در دسترس) در بازرسی $i$	$Tinv_i$
سطح موجودی در دسترس در بازرسی $i$	$Einv_i$
موجودی قطعات در لحظه	$R(x)$
سطح زوال در بازرسی $i$ ام	$X_i$
مقدار سفارش در بازرسی $i$ ام	$Qu_i$
سرعت زوال در نت ناکامل $k$ ام	$v_k$

را نشان می‌دهد:

$$T_{i+1} = T_i + m(X_{T_i}, Q) \quad (6)$$

$$m(X_{T_i}, Q) = \{\Delta T : P(X_{T_i+\Delta T} \geq L | X_{T_i}) = Q\} \quad (7)$$

به طوری که:

$$P(X_{T_i+\Delta T} \geq L | X_{T_i}) = P(X_{T_i+\Delta T} \geq L - X_{T_i}) = \int_{L-X_{T_i}}^{\infty} f_{\alpha_k, \Delta T, \beta}(x) dx = 1 - \int_0^{L-X_{T_i}} f_{\alpha_k, \Delta T, \beta}(x) dx \quad (8)$$

عملیات مورد انتظار در بازرسی بعدی، انجام نت کامل یا نت ناکامل است. حال در صورتی که موجودی در دسترس در زمان بازرسی پیش‌بینی شده برای انجام عملیات مورد انتظار بعدی کافی باشد، زمان بازرسی پیش‌بینی شده از روش ذکر شده انتخاب می‌شود؛ در غیر این صورت باید دید که در چه زمانی موجودی در دسترس مقدار کافی را دارد و آن زمان به عنوان زمان بازرسی بعدی انتخاب می‌شود.

#### ۵.۴. انتخاب عملیات نت بهینه

عملیات نت اصلاحی زمانی صورت می‌پذیرد که در زمان بازرسی از سیستم، سطح زوال آن از آستانه‌ی خرابی عبور کرده باشد. پس از انجام هر نت اصلاحی سطح زوال سیستم به صفر و موجودی کل به سقف خود می‌رسد که این شرایط در واقع همان شرایط اولیه‌ی مسئله نیز به حساب می‌آید و با انجام هر نت اصلاحی مسئله به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد. پس چرخه‌ی عمر سیستم در این مسئله بازه‌ی زمانی بین انجام دو نت اصلاحی در نظر گرفته می‌شود.

عملیات نت کامل پیش از وقوع خرابی انجام می‌گیرد و سطح زوال سیستم را به سطح صفر بازمی‌گرداند. زمان انجام نت کامل به تعداد نت‌های ناکامل متوالی انجام شده بر سیستم بستگی دارد و می‌تواند آثار منفی نت ناکامل بر سیستم را از بین ببرد و مجدداً سیستم را مهیای انجام نت ناکامل سازد، بدون این‌که توفقی در سیستم ایجاد شود. عملیات نت ناکامل زمانی انجام می‌شود که زوال سیستم از آستانه‌ی نت پیشگیرانه عبور کرده باشد. عملیات نت ناکامل سطح زوال سیستم

موجودی پس از انجام عملیات نت اصلاحی به اندازه‌ی سقف خود باشد. همچنین برای تعیین زمان بازرسی بعدی در این حالت نزدیک‌ترین زمانی را که قطعه به تعداد کافی برای انجام عملیات نت اصلاحی می‌رسد، به دست می‌آوریم و انتخاب می‌کنیم.

#### ۴.۴. تعیین زمان بازرسی بعدی

در بسیاری از مقالات بازه‌های زمانی بازرسی متغیر و مبتنی بر رویدادهاست. [۲۳،۲۴] در این مدل در هر بازرسی یا هر نقطه‌ی تصمیم<sup>۳</sup> باید با توجه به اطلاعاتی که در آن لحظه از سیستم در دسترس است، زمان بازرسی بعدی را تعیین کرد. در پژوهش‌ها، در چنین شرایطی از سیاست نت دوره‌ی با بازه‌ی زمانی بازرسی مشخص استفاده می‌کنند؛ اما این سیاست بازرسی‌های غیرضروری را تحمیل می‌کند که هم هزینه‌بر و هم زمان‌بر است. از این رو، تعیین زمان بازرسی بعدی از اقدامات مهمی است که با هدف کاهش هزینه‌های مربوط به بازرسی‌های دوره‌ی صورت می‌گیرد و سیاست نگهداری و تعمیرات اتخاذ شده‌ی مدل را به سمت نت پیشگویانه سوق می‌دهد. این پیش‌بینی به عوامل مختلفی در تمام حوزه‌های مطرح شده در مسئله بستگی دارد که عبارت‌اند از:

- در حال حاضر سیستم در چه سطحی از زوال قرار دارد؟
- پیش از این چند نت ناکامل متوالی انجام گرفته است؟
- سطح قابلیت اطمینان سیستم چقدر است؟
- آیا در نقطه‌ی بازرسی تعیین شده موجودی کافی برای انجام عملیات نت مورد انتظار وجود دارد؟
- Q در این مدل مقداری ثابت و معادل احتمال وقوع خرابی در سیستم در فاصله‌ی زمانی بین دو بازرسی (بازرسی کنونی و بازرسی بعدی) است. به عبارت دیگر، مقدار  $Q = 1 -$  معادل سطح قابلیت اطمینان سیستم است. بنابراین، زمان بازرسی بعدی از حاصل جمع زمان بازرسی حال حاضر و تابعی از سطح زوال کنونی، قابلیت اطمینان و تعداد نت ناکامل متوالی انجام گرفته به دست می‌آید. فرمول ۶ این رابطه

#### ۶.۴. مدل بهینه‌سازی

در این مدل از شاخص هزینه به عنوان تابع هدف استفاده می‌شود. در واقع هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌ها شامل هزینه‌های بازرسی، هزینه‌های عملیات نت (اصلاحی، کامل و ناکامل)، هزینه‌های توقف سیستم و عملکرد ناقص سیستم، هزینه‌های نگهداری موجودی و هزینه‌های خرید و سفارش‌دهی قطعات است به گونه‌ای که سطح دسترسی سیستم از مقداری که توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود ( $A^*$ )، کمتر نشود. در ادامه به تشریح هر یک از هزینه‌های به کارگرفته شده در تابع هدف می‌پردازیم:

هزینه بازرسی: برای انجام هر بازرسی هزینه‌ی در نظر گرفته شده است ( $C_i$ ) که مجموع هزینه‌های کل بازرسی‌های انجام گرفته در یک چرخه عمر در تابع هدف لحاظ می‌شود.

همان‌گونه که پیش از این گفته شد، هزینه‌ی هر بار انجام نت ناکامل ( $C_p^k$ ) متغیر است و به عواملی همچون میزان بهبود ایجاد شده در سطح زوال و برخی پارامترهای فیزیکی سیستم بستگی دارد. مجموع این هزینه‌ها در یک چرخه در تابع هزینه لحاظ می‌شود.

هزینه‌ی انجام نت اصلاحی: هزینه‌ی انجام هر بار نت اصلاحی ثابت است ( $C_c$ ) و هزینه‌ی یک بار نت اصلاحی در هر چرخه محاسبه می‌شود. (به عبارت دیگر با توجه به تعریف چرخه عمر:  $N_c(t) = 1$ )

هزینه‌ی انجام نت پیشگیرانه کامل: هزینه‌ی هر بار نت کامل ثابت است ( $C_p^k$ ) و مجموع این هزینه‌ها در یک چرخه در تابع هزینه لحاظ می‌شود.

هزینه‌ی عملکرد ناقص سیستم: پس از عبور سطح زوال سیستم از آستانه‌ی خرابی مدت زمانی طی می‌شود تا به زمان بازرسی تعیین شده برسیم. در طول این بازه‌ی زمانی سیستم با نقصان عملکرد مواجه است که می‌تواند باعث کاهش کیفیت محصولات نیز شود و این مقدار کاهش کیفی را می‌توان در قالب هزینه در تابع هدف لحاظ کرد. هزینه برای این بازه‌ی زمانی ثابت ( $d_1(t)$ ) در نظر گرفته می‌شود.

هزینه‌ی توقف سیستم: با توجه به این‌که از زمان انجام عملیات مختلف نت صرف نظر شده است، توقف در سیستم فقط زمانی اتفاق می‌افتد که در هنگام انجام نت اصلاحی با کمبود قطعه مواجه شویم و در طول زمان توقف با نرخ ثابتی ( $d_2(t)$ ) برای سیستم هزینه ایجاد می‌شود. در زمانی که سیستم متوقف شود، هزینه‌ی که به بار می‌آورد دقیقاً برابر با مقدار درآمدی است که اگر سیستم در حال کار بود به دست می‌آمد و این هزینه جزء هزینه‌های پنهان اقتصادی به شمار می‌رود.

هزینه‌ی نگهداری موجودی: در انبار هزینه‌ی صرف نگهداری قطعات می‌شود که این هزینه می‌تواند شامل انرژی و دستمزد نیروی انسانی باشد که با نرخ ( $C_h$ ) برای هر قطعه در واحد زمان تعریف می‌شود.

هزینه‌ی سفارش‌دهی (معمولی و اضطراری): هزینه‌ی سفارش در این مسئله بسته به نوع سفارش متغیر است و به اندازه‌ی سفارش وابسته نیست. بنابراین، اگر سفارش از تأمین‌کننده‌های محلی تأمین شود، هزینه‌ی مشخصی ( $C_o$ ) دارد که برای تأمین‌کننده‌های محلی مختلف یکسان در نظر گرفته شده است و اگر خرید قطعه از تأمین‌کننده‌ی اصلی به صورت اضطراری تهیه شود، مقدار آن ثابت ( $C_{oe}$ ) و بیشتر از سفارش عادی است. به ازای هر قطعه‌ی تأمین شده در چرخه عمر سیستم، هزینه‌ی ثابت ( $C_{pur}$ ) به عنوان هزینه‌ی خرید در تابع هدف لحاظ می‌شود.

را کاهش می‌دهد، ولی به صفر نمی‌رساند. هر بار انجام نت ناکامل باعث افزایش سرعت زوال در ادامه‌ی کار سیستم می‌شود. این افزایش سرعت در هر بار انجام نت ناکامل، در قالب متغیر تصادفی پیوسته‌ی غیر منفی  $\varepsilon_k$  که از توزیع نمایی پیروی می‌کند، تعریف می‌شود که تابع چگالی آن به صورت زیر است:

$$h(x) = \gamma e^{-\gamma x} I_{(x \geq 0)} \quad (9)$$

$$\text{if } f(x) \geq 0, I_{(x \geq 0)} = 1 \quad (10)$$

$$\text{Otherwise, } I_{(x \geq 0)} = 0 \quad (11)$$

اگر نت اصلاحی یا نت پیشگیرانه کامل صورت پذیرد،  $k$  صفر و مقدار  $v_k$  به  $v_0$  تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر:

$$v_k = v_0 \quad (12)$$

و اگر این نت به صورت ناکامل صورت پذیرد، آن‌گاه:

$$v_k = v_{k-1} + \varepsilon_k \quad (13)$$

شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی تأثیر نت ناکامل بر سطح زوال سیستم و سرعت زوال در ادامه‌ی کار سیستم است.

پس از هر نت ناکامل، سطح زوال تا حدودی بهبود می‌یابد که این مقدار بسته به این‌که پیش از این چند نت ناکامل رخ داده است، با مقدار  $Z^k$  نمایش داده می‌شود. مقدار  $Z^k$  از توزیع نرمال با چگالی زیر پیروی می‌کند، به طوری که:

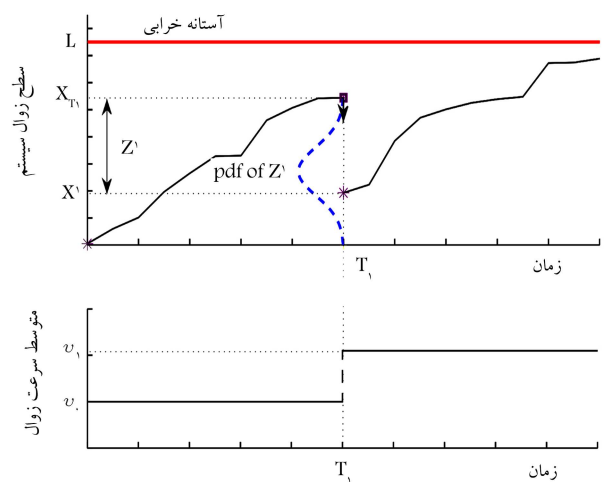
$$\mu = \frac{X_{T_i}}{\gamma}, \sigma = \frac{X_{T_i}}{\delta}, a = \mu - 3\sigma, b = \mu + 3\sigma \quad (14)$$

$$E(Z^k) = \mu, VAR(Z^k) = \sigma^2 \quad (15)$$

بدیهی است که سطح زوال کنونی، حد بالایی برای مقدار بهبود حاصل از نت انجام شده است، بنابراین:

$$0 \leq Z^k \leq X_{T_i} \quad (16)$$

هزینه‌ی انجام نت ناکامل را نیز می‌توان بر اساس هزینه‌ی انجام نت کامل و با توجه به تابع بهبود محاسبه کرد.



شکل ۲. نمودار تأثیر نت ناکامل بر سطح زوال و سرعت زوال.

در نتیجه، مدل بهینه‌سازی عبارت است از:

$$MINC^t(M, K, S, T) = C_i \cdot N_i(t) + \sum_{k=1}^K N_{ipk}(t) \cdot C_p^k + C_p^o \cdot N_p(t) + C_c \cdot N_c(t) + C_{d_1} \cdot d_1(t) + C_{d_r} \cdot d_r(t) + C_o \cdot N_o(t) + C_{oe} \cdot N_{oe}(t) + C_h \cdot \int_0^t R(x) dx + C_{pur} \cdot \sum_{i=1}^{N_i(t)} Qu(i) \quad (17)$$

s.t. :

$$Availability \geq A^* \quad (18)$$

و Availability به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Availability = \frac{\text{operating time}}{\text{operating time} + \text{down time}} \quad (19)$$

در نتیجه در مدل حاضر، در دسترس بودن را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$Availability = \frac{\text{Cycle time} - d_r(t)}{\text{Cycle time}} \quad (20)$$

## ۵. رویکرد حل و نتایج

برای حل مسئله از رویکرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. همان طور که مشاهده شد بهبود سطح زوال سیستم پس از انجام نت ناکامل ( $Z^k$ ) و سرعت زوال سیستم پس از انجام نت ناکامل ( $\nu_k$ ) متغیرهای تصادفی هستند که از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. فرایند زوال سیستم نیز از توزیع گاما پیروی می‌کند. در نتیجه برای حل مسئله یک الگوریتم تکرارشونده طراحی شده است که در آن برای تعیین سطح زوال و سرعت زوال پس از هر بار انجام نت ناکامل از شبیه‌سازی استفاده شده است. احتمال خرابی و امکان تأمین قطعه توسط تأمین‌کنندگان نیز به صورت تصادفی تعیین می‌شود. روش حلی که در مدل‌های بهینه‌سازی هم‌زمان برنامه‌ریزی نت و موجودی قطعات یدکی نیز فراگیر شده است، رویکرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی<sup>۲</sup> است (جدول ۲).

روش حل مسئله برای تعیین جواب بهینه به شرح زیر است: به ازای مقادیر مشخص از متغیرهای تصمیم مسئله  $(M, K, T, S)$ ، به دفعات کافی (تعداد ۳۰ بار شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است تا بتوان از توزیع نرمال استفاده کرد) در بازه‌ی زمانی شبیه‌سازی - که همان چرخه‌ی عمر سیستم است - شبیه‌سازی انجام می‌شود و مقدار متوسط هزینه (تابع هدف) به دست می‌آید. سپس میانگین تابع هدف و میانگین زمان سطح دسترسی سیستم محاسبه می‌شود. در ادامه با مقایسه‌ی این مقدار با مقدار مورد انتظار تصمیم‌گیرنده، حالت‌های نامطلوب، حذف شده و ۲۰ گزینه‌ی برتر (از نظر هزینه) انتخاب می‌شوند. سپس برای هر یک از این گزینه‌ها، مجدداً شبیه‌سازی (به تعداد ۳۰ بار) انجام می‌شود. پس از محاسبه‌ی میانگین تابع هدف و میانگین زمان سطح دسترسی سیستم، گزینه‌ی به عنوان بهینه انتخاب می‌شود که علاوه بر ارضای مقدار مورد انتظار تصمیم‌گیرنده، کمترین هزینه را داشته باشد. حلقه‌ی اصلی شبه کد الگوریتم به شرح زیر است:

برای مقادیر مشخص از  $M, K, T, S$ :

گام ۱. محاسبه‌ی  $X_{T_i}$

گام ۲. اگر  $X_{T_i} \geq L$ ، آن‌گاه:

اگر  $Einv_i \geq CMS$ ، آن‌گاه:

$$X_{T_i} = 0$$

لحاظ کردن هزینه‌های مربوط به نت اصلاحی سفارش تا سقف  $S$  ( $Tinv_i = S$ ) در غیر این صورت ( $Einv_i < CMS$ ):

سفارش تا سقف  $S + CMS$

صبر کردن تا تعداد  $CMS$  قطعه موجود شود

$$X_{T_i} = 0$$

لحاظ کردن هزینه‌های مربوط به نت اصلاحی

پایان الگوریتم

در غیر این صورت ( $X_{T_i} < L$ ): به گام ۳ بروید.

گام ۳. اگر  $X_{T_i} \geq M$ ، آن‌گاه:

اگر  $k \geq K$ ، آن‌گاه:

اگر  $Einv_i \geq PMS$ ، آن‌گاه:

$X_{T_i} = 0$  لحاظ کردن هزینه‌های نت کامل

$$k = 0$$

به گام ۴ بروید.

در غیر این صورت ( $Einv_i < PMS$ ):

زمانی که شرط  $Einv_i \geq PMS$  برقرار می‌شود، به عنوان گزینه‌ی بی برای بازرسی بعدی ( $G$ ) منظور می‌شود.

به گام ۴ بروید.

در غیر این صورت ( $k < K$ ):

اگر  $Einv_i < IPMS$ ، آن‌گاه:

$$X_{T_i} = X_{T_i} - Z_k$$

$$\nu_k = \nu_{k-1} + \varepsilon_k$$

$$k = k + 1$$

لحاظ کردن هزینه‌های نت ناکامل به گام ۴ بروید.

در غیر این صورت ( $Einv_i < IPMS$ ):

زمانی که شرط  $Einv_i \geq IPMS$  برقرار می‌شود،

به عنوان گزینه‌ی بی برای بازرسی بعدی ( $G$ ) منظور می‌شود.

به گام ۴ بروید.

در غیر این صورت ( $X_{T_i} < M$ ): به گام ۴ بروید.

گام ۴.  $X_{T_i}$  پس از انجام نت احتمالی روزآمد می‌شود.

اگر  $X_{T_i} \geq T$ ، آن‌گاه سفارش تا سقف  $S$  ( $Tinv_i = S$ )

$$T_{i+1} = \min\{G, T + m(X_{T_i}, Q)\}$$

مقادیر  $Einv_{i+1}$  و  $Tinv_{i+1}$  برای نقطه‌ی تصمیم (بازرسی) بعدی بر اساس زمان‌های تدارک روزآمد می‌شود.

$$i = i + 1$$

به گام ۱ بروید.

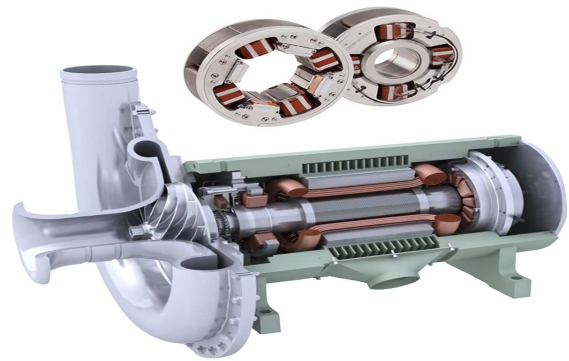


جدول ۴. بازه‌ی تغییرات متغیرهای تصمیم در مطالعه‌ی موردی.

نماد	تعریف	بازه
$M$	آستانه‌ی انجام نت پیشگیرانه	$1 \leq M \leq L$
$K$	بیشینه‌ی تعداد نت ناکامل متوالی	$1 \leq K \leq 10$
$T$	سطح زوال سفارش‌دهی	$1 \leq T \leq M$
$S$	سقف موجودی قطعه	$1 \leq S \leq 20$

جدول ۵. مقادیر سایر پارامترها.

نماد	مقدار	نماد	مقدار	نماد	مقدار
$\alpha_0$	۱	$CMS$	۳	$LT_{s1}$	۳ (روز)
$\beta$	۱	$PMS$	۲	$LT_{s2}$	۷
$\gamma$	۰٫۲	$IPMS$	۱	$LT_{oe}$	۱۰



شکل ۳. باتاقان مغناطیسی و کمپرسور توربو.

کدنویسی این الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۶a انجام شده است و در رایانه‌ی با پردازنده‌ی  $Intel@CoreiV^{TM} - CPU$  با رم ۳۲GB اجرا شده است. برای بررسی کاربرد و ارزیابی مدل ارائه شده در دنیای واقعی، یک نمونه‌ی واقعی در نظر گرفته شده است: ماشین کمپرسور توربو اکسپندر<sup>۵</sup> که قطعه‌ی مورد بررسی در آن باتاقان مغناطیسی<sup>۶</sup> است و به صورت زوجی در آن به کار می‌رود شکل ۳ باتاقان مغناطیسی در این ماشین یک قطعه‌ی بحرانی به حساب می‌آید؛ به گونه‌ی که در صورت از کار افتادن قطعه، سیستم نیز از کار می‌افتد. این کمپرسور دارای کاربرد برودتی در صنایع پتروشیمی است. پالایشگاهی در عسلویه به عنوان مطالعه‌ی موردی انتخاب شده است.

ساختار زنجیره‌ی تأمین مسئله به شرح زیر است:

اولویت سفارش‌دهی در این ساختار، با تأمین‌کننده‌ی محلی اول است. اگر وی با کمبود مواجه باشد، تأمین‌کننده‌ی محلی دوم انتخاب می‌شود. اگر وی نیز با کمبود مواجه باشد، یک سفارش اضطراری به تأمین‌کننده‌ی اصلی داده می‌شود. با توجه به این‌که پالایشگاه در عسلویه قرار دارد، دو تأمین‌کننده‌ی محلی نزدیک در بوشهر و بندرعباس قرار دارند. تأمین‌کننده‌ی محلی مستقر در بوشهر به محل پالایشگاه نزدیک‌تر است، پس در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد. در صورت نیاز به تأمین قطعه و در صورتی که این دو تأمین‌کننده‌ی محلی قادر به تأمین نباشند، این قطعه از تأمین‌کننده‌ی اصلی یعنی تهران به محل پالایشگاه فرستاده می‌شود. با توجه به آماری که در بخش بازرگانی پالایشگاه موجود است، احتمال موجود بودن قطعه در تأمین‌کننده‌ی مستقر در بوشهر ۰٫۶ و همین احتمال برای تأمین‌کننده‌ی بندرعباس ۰٫۴ است. درحالی که در صورت نیاز به تأمین قطعه از تهران، فرض بر این است که این قطعه همیشه در انبار تهران موجود است.

برای انجام نت اصلاحی از یک قطعه برای آزمون عملکرد سیستم استفاده می‌شود و پس از آزمون، دو قطعه‌ی جدید به جای باتاقان مغناطیسی - که به صورت زوجی به کار می‌رود - در سیستم جایگزین می‌شود. در حالی که برای نت کامل عمل آزمون انجام نمی‌گیرد. در عملیات نت ناکامل نیز فقط با یک قطعه جایگزینی صورت می‌گیرد که همین مسئله عامل ناکامل بودن نت است. زمان حداقلی برای فاصله‌ی میان دو نت اصلاحی (توقف سیستم) توسط کارفرما ۳۰۰ روز تعیین شده است (در واقع به جای  $Availability$  معیار چرخه‌ی عمر انتخاب شده است). بازه‌ی تغییرات متغیرهای تصمیم در جدول ۴ نشان داده شده است. آستانه‌ی وقوع خرابی بر اساس سطح زوال، ۲۰ در نظر گرفته شده است ( $L = 20$ ). بیشینه‌ی تعداد نت ناکامل بر اساس داده‌های تاریخی ۵ بار بوده است و حد بالای آن مطابق نظر خیرگان نت، ۱۰ بار در نظر گرفته شده است. همچنین حد بالای سقف موجودی

بیش از دو برابر داده‌های تاریخی در نظر گرفته شده است تا با جستجوی فضای جواب بزرگ‌تر از زیربهبستگی اجتناب شود.

مقادیر سایر پارامترها نیز بر اساس داده‌های تاریخی تعیین شده و در جدول ۵ ارائه شده است (به دلیل عدم رضایت کارفرما از ذکر پارامترهای هزینه‌ای صرف نظر شده است):

مدت زمان شبیه‌سازی با نرم‌افزار برای رسیدن به خروجی‌های مورد نیاز حدود ۱۰ ساعت است. با انجام محاسبات، مقدار بهینه برای متغیرهای تصمیم و تابع هدف به دست می‌آید؛ به گونه‌ی که برای برقراری قابلیت اطمینان ۹۹٪ و با لحاظ شرایط زیر برای زیرسیستم:

-- در نظر گرفتن سیاست موجودی (۱،۸) که به معنای این است که زمانی که زوال سیستم به بالای ۱ رسید تا سقف ۸ عدد برای قطعه‌ی یدکی سفارش‌گذاری صورت پذیرد.

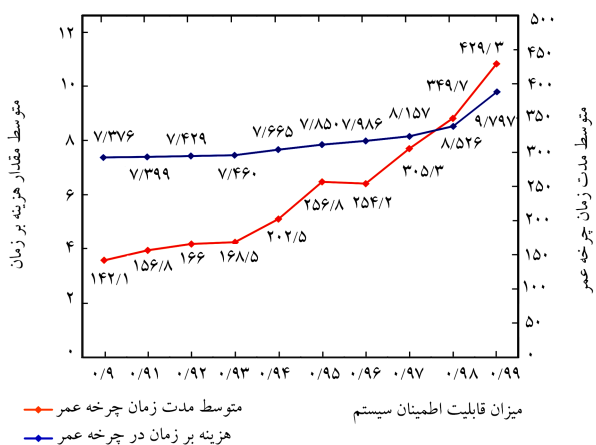
-- حد بالای انجام متوالی نت ناکامل در سیستم ۲ باشد و در نوبت سوم نت کامل انجام گیرد.

-- زمانی که سیستم در سطح زوال بیشتر از مقدار ۴ باشد، عملیات مربوط به نت پیشگیرانه صورت گیرد.

می‌توان تضمین کرد که متوسط دسترسی به زیرسیستم بیشتر از ۳۰۰ روز (۴۲۹ روز) باشد و هزینه کمترین مقدار خود را در بین گزینه‌های قابل قبول داشته باشد. مقادیر بهینه‌ی متغیرهای تصمیم و شاخص‌های بهینه‌سازی در جدول ۶ آمده است.

## ۶. تحلیل حساسیت

برای مقایسه‌ی این مدل در دو حالت لحاظ و عدم لحاظ نت ناکامل، ابتدا مقدار  $K$  را برابر با صفر قرار می‌دهیم و مقدار بهینه‌ی تابع هزینه را برای گزینه‌های موجه و قابل قبول به دست می‌آوریم. سپس با افزایش واحد به واحد پارامتر  $K$  مقادیر بهینه‌ی تابع هزینه‌ی متناظر را محاسبه می‌کنیم. نکته‌ی قابل توجه این است که با افزایش این پارامتر به تدریج گزینه‌های قابل قبول کمتر می‌شود تا جایی که در حالت  $K = 5$  و مقادیر بالاتر از آن (ناحیه‌ی هاشورخورده) هیچ گزینه‌ی موجهی وجود ندارد که زمان چرخه‌ی عمر آن بالای ۳۰۰ روز باشد. این اتفاق حاصل تأثیر منفی نت ناکامل بر سطح دسترسی سیستم است. بنابراین، در این حالت مقدار متناظر



شکل ۶. تحلیل حساسیت به قابلیت اطمینان سیستم.

جدول ۶. جواب بهینه‌ی حاصل از شبیه‌سازی.

زمان دسترسی	هزینه بر زمان	M	T	K	S
۴۲۹/۳	۹/۷۹۶۵۱۴۷۴۳	۴	۱	۲	۸

جدول ۷. هزینه‌ی سیستم در بازه‌ی بلندمدت به ازای سطوح مختلف قابلیت اطمینان.

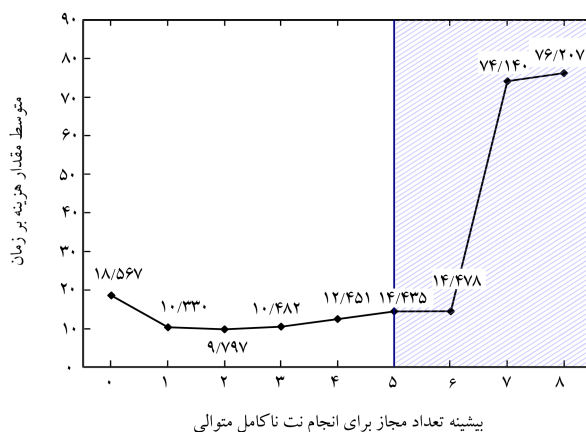
قابلیت اطمینان	هزینه‌های نت در بازه‌ی زمانی ۱۰ ساله طول عمر تجهیز (میلیون تومان)
%۹۷	۴۸۴۳۰
%۹۸	۳۹۰۲۵
%۹۹	۳۶۲۰۵

است، در حالی که به ازای مقادیر کمتر تمایل برای استفاده از نت ناکامل شدت می‌گیرد.

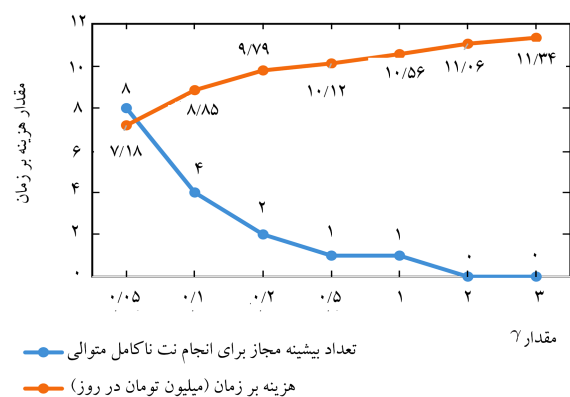
## ۲.۶. مقدار بهینه‌ی سیاست هم‌زمان نت و موجودی به ازای مقادیر مشخص از قابلیت اطمینان سیستم

نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبل به ازای مقدار مشخص از قابلیت اطمینان است. برای بررسی تأثیر قابلیت اطمینان بر بهینگی متغیرهای تصمیم و تابع هدف می‌توان حساسیت آنها را نسبت به پارامتر  $Q = 1 - R$  تحلیل و بررسی کرد.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، هرچه مقدار قابلیت اطمینان بیشتر شود، مقدار تابع هزینه نیز افزایش می‌یابد. در حالی که بالا بردن سطح قابلیت اطمینان از تعداد خرابی‌ها و عملیات نت اصلاحی می‌کاهد. نکته‌ی قابل توجه این است که بازه‌ی بررسی شده برای مقایسه‌ی هزینه‌های روزانه (تابع هزینه بر زمان) فاصله‌ی زمانی بین دو نت اصلاحی است و در هر چرخه فقط هزینه‌ی یک نت اصلاحی لحاظ می‌شود. با محاسبه‌ی تخمینی مقدار هزینه در بازه‌ی زمانی بلندمدت همچون طول عمر شتابمندی تجهیز (به طور مثال ۱۰ سال) مشاهده می‌کنیم که تعداد نت‌های اصلاحی با برقراری سطح پایین از قابلیت اطمینان، افزایش یافته است و در پی آن هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات با سطح قابلیت اطمینان پایین‌تر نیز مقدار بیشتری به خود خواهد گرفت (جدول ۷). دلیل این امر وقوع تعداد خرابی‌ها و تعداد بیشتر عملیات نت اصلاحی صورت گرفته برای سیستم با قابلیت اطمینان کمتر است.



شکل ۴. تحلیل حساسیت به تعداد مجاز نت ناکامل متوالی.

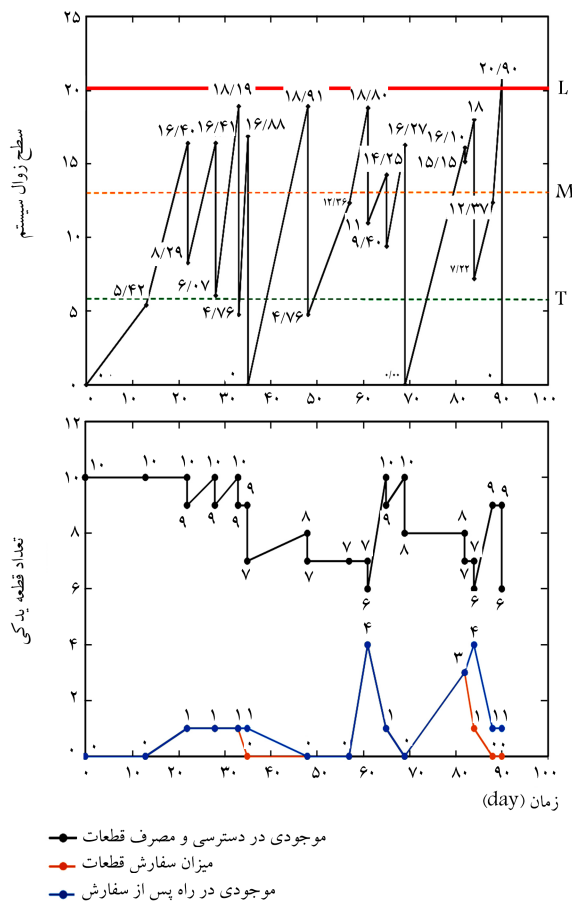


شکل ۵. تحلیل حساسیت به تأثیر نت ناکامل بر سرعت زوال.

تابع هزینه را برای گزینه‌ی که بیشترین زمان چرخه‌ی عمر را ایجاد می‌کند، در نمودار مقایسه‌ی لحاظ می‌کنیم. نتایج در شکل ۴ نشان می‌دهد که سیاست به کارگیری نت کامل به صورت مطلق هزینه‌ی به مراتب بالاتری را از سیاست توأم با استفاده از نت ناکامل به بار می‌آورد. به ازای مقادیر کمتر از ۲ و با نزدیک شدن  $K$  به صفر، هزینه افزایش می‌یابد و از سوی دیگر به ازای مقادیر بیشتر از ۲ و با افزایش مقدار  $K$ ، تابع هزینه سیر صعودی در پیش می‌گیرد. پس این نمودار بیان‌گر این مطلب است که به کارگیری سیاست نت ناکامل مناسب‌تر از لحاظ کردن نت کامل به صورت مطلق است.

## ۱.۶. تحلیل حساسیت به تأثیر نت ناکامل بر سرعت زوال سیستم:

برای انجام این تحلیل مقادیر مختلف برای  $\gamma$  را لحاظ می‌کنیم. به ازای مقادیر مختلف  $\gamma$ ، مقادیر بهینه برای متغیرهای تصمیم و تابع هدف به دست می‌آید. مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل (شکل ۵)، زمانی که تأثیر نت ناکامل کم است، هزینه نیز مقدار متناسب کمی دارد. در نقطه‌ی مقابل با شدت گرفتن تأثیر نت ناکامل بر سرعت زوال سیستم، مقدار تابع هزینه نیز افزایش می‌یابد و سیاست بهینه‌ی نت به سمت نت کامل سوق داده می‌شود. به عبارت دیگر در حالت معمول نت ناکامل از نت کامل کم‌هزینه‌تر است، ولی با افزایش تأثیر منفی نت ناکامل بر سیستم، سیاست بهینه به سمت کامل بودن سیاست نگهداری و تعمیرات سوق داده می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در مقادیر بالای  $\gamma$  ( $\gamma \geq 2$ ) سیاست بهینه‌ی نت استفاده از نت کامل به صورت مطلق



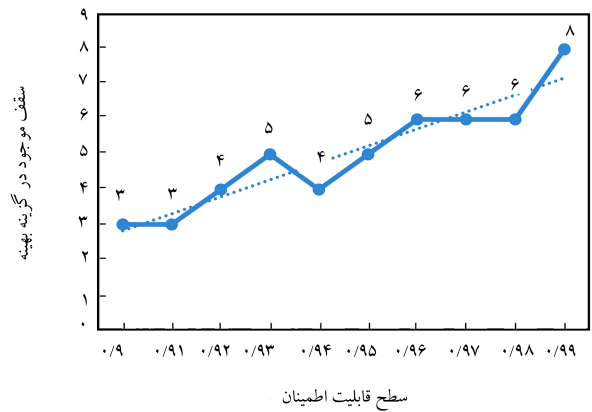
شکل ۸. خروجی یک چرخه عمر سیستم با قابلیت اطمینان ۹۷٪.

نت اصلاحی می‌شود، پس تضمین چنین تعویقی کاملاً وابسته به کفایت یا عدم کفایت موجودی برای انجام عملیات مربوط به نت پیشگیرانه است. در صورتی که موجودی کافی باشد احتمال وقوع کمبود و متعاقب آن احتمال وقوع خرابی به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، بالا بردن سطح قابلیت اطمینان مستلزم لحاظ کردن موجودی اطمینان بیشتر برای مقابله با کمبودهای احتمالی است.

یکی از روش‌های اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی استفاده از گزارش ردیابی است. گزارش ردیابی گزارش مفصلی است که جریان تغییرات متغیرهای منتخب را در گذر زمان نمایش می‌دهد. نمونه‌ی از روند زوال در چرخه عمر سیستم برای یکی از حالات متغیرهای تصمیم به عنوان یک گزارش ردیابی در جدول ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در جدول ۸ مشخص است، مدل شبیه‌سازی کار خود را به درستی انجام می‌دهد. همچنین نمودار زوال سیستم و نحوه مصرف و سفارش قطعات در شکل ۸ نشان داده شده است. در این حالت سطح زوال در نظر گرفته شده برای سیستم ۹۷٪ است.

## ۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، مسئله‌ی بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی را بررسی کرده است. بدین منظور یک سیستم تک جزئی زوال‌پذیر در نظر گرفته شده است که تعیین سطح زوال آن صرفاً از طریق بازرسی امکان‌پذیر است. در هر بازرسی امکان انجام عملیات نت پیشگیرانه‌ی کامل یا



شکل ۷. حساسیت مقدار موجودی بهینه‌ی قطعه‌ی یدکی به سطح قابلیت اطمینان.

از طرف دیگر، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با کاهش قابلیت اطمینان و به طبع آن کاهش متوسط چرخه عمر سیستم، گزینه‌های قابل قبول مدل به شدت کاهش می‌یابد؛ به گونه‌یی که برای قابلیت اطمینان زیر ۹۷٪ هیچ گزینه‌ی موجهی وجود ندارد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که این سیستم با لحاظ قابلیت اطمینان ۹۷٪ هم محدودیت مربوط به چرخه عمر سیستم را برآورده می‌سازد و هم تابع هدف آن مقدار کمتری را در برمی‌گیرد. بنابراین، در حالتی که سطح قابلیت اطمینان از پیش تعیین نشده باشد و مقدار آن قابل تنظیم باشد، می‌توان این مقدار از قابلیت اطمینان را به عنوان سطح بهینه تعیین کرد؛ اما همان‌طور که در ابتدای این قسمت بیان شد، تصمیم‌گیرنده سطح مشخصی از قابلیت اطمینان را برای اجرای مدل لحاظ می‌کند که همان بالاترین مقدار قابلیت اطمینان یا ۹۹٪ است. این تصمیم مبتنی بر دلایل زیر قابل تفسیر است:

۱) با لحاظ سطح قابلیت اطمینان پایین، فاصله‌ی زمانی بین وقوع دو نت اصلاحی به مرور زمان کاهش می‌یابد و تعداد این خرابی‌ها در بازه‌ی زمانی بلندمدت مشخص (عمر شناسنامه‌ی تجهیز) در قیاس با حالت‌هایی با سطح قابلیت اطمینان بالا به مراتب بیشتر می‌شود. ۲) بدیهی است که با افزایش تعداد این خرابی‌ها عمر اقتصادی تجهیز نیز کاهش می‌یابد که این امر برای صاحبان تجهیز مطلوب نخواهد بود. ۳) با توجه به حساسیت این صنعت، هزینه‌ی خسارات جبران‌ناپذیر و غیرقابل پیش‌بینی ناشی از خرابی این تجهیز (به عنوان یک تجهیز بحرانی در فرایند تولید) گزاف است.

بنابراین، قابلیت اطمینان به عنوان یک پارامتر با مقدار ثابت در مسئله لحاظ می‌شود و مقدار آن با توجه به دلایل ذکر شده بیشترین حد ممکن را به خود اختصاص می‌دهد. اما برای تجهیزاتی که چنین شرایطی را ندارند و امکان تنظیم قابلیت اطمینان نیز برای پیاده‌سازی رویکرد فرصت‌طلبانه وجود دارد، قابلیت اطمینان می‌تواند به عنوان یک متغیر تصمیم توسط مدل بهینه شود.

## ۳.۶. تحلیل حساسیت مقدار سقف بهینه‌ی موجودی قطعه‌ی یدکی

### به سطح قابلیت اطمینان

شکل ۷ نمایانگر رابطه‌ی مستقیم و صعودی بین سطح قابلیت اطمینان سیستم و سقف موجودی قطعه‌ی یدکی است، به گونه‌یی که برای بهینه‌سازی سیستم با لحاظ قابلیت اطمینان بالا نیاز به سقف موجودی بالاتری برای قطعه‌ی یدکی است. این سیر صعودی به صورت خط‌چین آبی رنگ در شکل نمایش داده شده است. با توجه به این که قابلیت اطمینان بالاتر منجر به تعویق زمان وقوع خرابی و انجام عملیات

جدول ۸. خروجی یک چرخه از عمر سیستم.

خروجی یک بار پیاده‌سازی الگوریتم شبیه‌سازی برای چرخه‌ی عمر سیستم به ازای مقادیر مشخص از متغیرهای تصمیم														مقادیر متغیرهای تصمیم		
۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰	شماره‌ی بازرسی	نماد مقدار
۹۰	۸۸	۸۴	۸۲	۶۹	۶۵	۶۱	۵۷	۴۸	۳۵	۳۳	۲۸	۲۲	۱۳	۰	زمان بازرسی	M ۱۳
۲۹,۹۰	۱۲,۳۷	۱۸,۰۰	۱۶,۱۰	۱۶,۲۷	۱۴,۲۵	۱۸,۸۰	۱۲,۳۶	۱۸,۹۱	۱۶,۸۸	۱۴,۶۴	۱۶,۴۱	۱۶,۴۰	۵,۴۲	۰	سطح زوال قبل از عملیات	K ۳
۰,۰۰	۱۲,۳۷	۷,۲۲	۱۵,۱۵	۰,۰۰	۹,۴۰	۱۱,۰۰	۱۲,۳۶	۴,۷۶	۰,۰۰	۹,۰۳	۶,۰۷	۸,۲۹	۵,۴۲	۰	سطح زوال بعد از عملیات	T ۶
۹	۹	۷	۸	۱۰	۱۰	۷	۷	۸	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	موجودی در دسترس قبل از مصرف	S ۱۰
۳	۰	۱	۱	۲	۱	۱	۰	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۰	مصرف قطعه	
۶	۹	۶	۷	۸	۹	۶	۷	۷	۹	۹	۹	۹	۱۰	۱۰	موجودی در دسترس بعد از مصرف	
۱	۱	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	موجودی در راه قبل از سفارش	
۰	۰	۱	۳	۰	۱	۴	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	مقدار سفارش	
۱	۱	۴	۳	۰	۱	۴	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	موجودی در راه بعد از سفارش	
۰	۹۱	۹۱	۸۵	۰	۶۸	۶۴	۰	۰	۰	۳۶	۳۱	۲۵	۰	۰	زمان رسیدن سفارش	

میانگین مدت زمان دسترسی به سیستم در نمونه‌ی نشان داده شده برابر با ۹۴/۵ روز است و هزینه در واحد برابر است با ۱۳/۱۷ که این گزینه پذیرفتنی نیست.

مجدد با در نظر گرفتن سطح زوال سیستم در هر نقطه‌ی تصمیم پیش‌بینی کند. با توجه به پیچیدگی‌های مدل، بهینه‌سازی از طریق شبیه‌سازی انجام شده است. بدین منظور الگوریتم شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و حل شده است. کاربرد مدل در دنیای واقعی با استفاده از یک مطالعه‌ی موردی (ماشین توریو کمپرسور به همراه قطعه‌ی یاتاقان مغناطیسی در یک پالایشگاه گاز طبیعی واقع در عسلاویه) بررسی شده است. مدل ارائه شده می‌تواند نقش یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری را برای مدیران ایفا کند و در تصمیم‌گیری به ایشان کمک نماید.

این مقاله به بررسی آثار و نتایج مربوط به سیاست‌های به کار گرفته شده در دو حوزه‌ی نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی بر روی بهینه‌سازی یک سیستم زوال‌پذیر می‌پردازد. در حوزه‌ی نت با لحاظ رویکردهای اصلاحی، پیشگیرانه

ناکامل وجود دارد. علاوه بر این، در صورت خرابی، عملیات نت اصلاحی انجام می‌شود. هر سه نوع عملیات نت از طریق تعویض قطعه انجام می‌شوند، اما هزینه‌های متفاوتی دارند. همچنین قطعه‌ی یدکی مورد بررسی در پژوهش حاضر دارای دو تأمین‌کننده‌ی محلی و یک تأمین‌کننده‌ی اصلی است که در صورت مواجهه‌ی تأمین‌کنندگان محلی با کمبود برای انجام نت اصلاحی، می‌تواند قطعه را به صورت اضطراری ارسال کند. تا جایی که نویسندگان این پژوهش بررسی کرده‌اند و مطلع هستند، بحث نت پیشگیرانه‌ی ناکامل و چندسطحی/چندمکانی بودن زنجیره اولین بار است که در پژوهش‌های بهینه‌سازی هم‌زمان فعالیت‌های نت و موجودی سیستم‌های زوال‌پذیر بررسی شده است. مدل ارائه شده در این پژوهش قادر است با هدف کمیته‌سازی هزینه‌ها، بهترین زمان بازرسی بعدی و ترکیب عملیات نت را هم‌زمان با انتخاب تأمین‌کننده، اندازه‌ی سفارش و نقطه‌ی سفارش

یافت تا قطعات یدکی برای انجام عملیات نت کامل و ناکامل در دسترس باشند.

لحاظ کردن قابلیت اطمینان به عنوان یک متغیر تصمیم، در پژوهش‌های آتی این قابلیت را به تصمیم‌گیران می‌دهد تا سیستم‌های گوناگون با ویژگی‌های مختلف را در شرایط بهینه قرار دهند. همچنین برای تحقیقات آتی می‌توان مسئله را به حالت سیستم چندجزئی/چندقطعه‌یی توسعه داد. در این حالت با لحاظ آستانه‌های مختلف برای هر یک از قطعات (در دو حوزه نت و موجودی قطعات) می‌توان تأثیر متقابل نحوه زوال هر یک از آنها را بر روی روند زوال کل سیستم تحلیل و بررسی کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود محدودیت‌های مربوط به انواع عملیات نت از قبیل نیروی انسانی و ابزار و تجهیزات در نظر گرفته شوند. در نهایت از آنجا که الگوریتم پیشنهادی کل فضای جواب را به طور کامل جستجو می‌کند و از این نظر زمان حل بالایی دارد، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی امکان استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری بررسی شود.

و فرصت طلبانه تأثیر نت ناکامل را بر روی هزینه‌های نت در چرخه عمر و روند زوال سیستم و مدت زمان متوسط چرخه عمر بررسی و تحلیل می‌کند و بهبود عملکرد سیستم را که حاصل به کارگیری سیاست نت ترکیبی است، تشریح می‌کند. از طرف دیگر با لحاظ ساختار دوسطحی تأمین قطعات به تحلیل آثار مربوط به سیاست اتخاذی در حوزه موجودی قطعات می‌پردازد؛ سیاستی که مستقیماً به سطح زوال سیستم وابسته است. بنابراین، مدیران می‌توانند با بهره‌گیری از این رویکرد هم‌زمان به بهینه‌سازی سیستم‌های گوناگون بپردازند.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده مؤثر از نت پیشگیرانه‌ی ناکامل در کنار عملیات نت کامل و اصلاحی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های سیستم شود؛ اما زیاده‌روی در انجام نت ناکامل هزینه‌های سیستم را افزایش خواهد داد. در واقع در مثال بررسی شده، انجام عملیات نت ناکامل هزینه‌های سیستم را حدوداً پنجاه درصد کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش سهم نت پیشگیرانه در برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات، سقف موجودی قطعات یدکی افزایش خواهد

## پانویس‌ها

1. perfect maintenance
2. imperfect maintenance
3. decision point
4. optimization via simulation
5. turbo expander-compressor machine
6. magnetic bearing

## منابع (References)

1. Pierskalla, W. P. and Voelker, J. A. "A survey of maintenance models: The control and surveillance of deteriorating systems," *Nav. Res. Logist. Q.*, **233**, pp. 353-388 (Sep 1976).
2. Valdez-Flores, C. and Feldman, R. M. "A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems," *Nav. Res. Logist. NRL*, **364**, pp. 419-446 (Aug 1989).
3. Grall, A., Dieulle, L., Berenguer, C. and et al. "Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system", *IEEE Trans. Reliab.*, **512**, pp. 141-150 (Jun 2002).
4. Falkner, C. H. "Jointly optimal inventory and maintenance policies for stochastically failing equipment", *Oper. Res.*, **163**, pp. 587-601 (Jun 1968).
5. Acharya, D., Nagabhusanam, G. and Alam, S. S., "Jointly optimal block-replacement and spare provisioning policy", *IEEE Trans. Reliab.*, **354**, pp. 447-451 (Oct 1986).
6. Van Horenbeek, A., Buré, J., Cattrysse, D. "Joint maintenance and inventory optimization systems: A review", *Int. J. Prod. Econ.*, **1432**, pp. 499-508 (Jun 2013).
7. Chelbi, A., Aı't-Kadi D., "Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure", *Int. J. Prod. Econ.*, **74**, 1-3, pp. 183-189 (Dec 2001).
8. Wang, W., "A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **9611**, pp. 1535-1541 (Nov 2011).
9. Jiang, Y., Chen, M. and Zhou, D., "Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory", *J. Manuf. Syst.*, **35**, pp. 191-205 (Apr 2015).
10. Kader, B., Softene, D., Nidhal, R. and et al. "Ecological and joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventories for an optimal production plan", *IFAC-Pap.*, **483**, pp. 2139-2144 (Jan 2015).
11. Siddique, P. J., Luong, H. T. and Shafiq M. "An optimal joint maintenance and spare parts inventory model", *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, **292**, pp. 177-192 (Jan 2018).
12. Armstrong, M. J. and Atkins, D. A. "A note on joint optimization of maintenance and inventory", *IIE Trans.*, **302**, pp. 143-149 (1998).
13. Elwany, A. H. and Gebraeel, N. Z., "Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory", *IIE Trans.*, **407**, pp. 629-639 (Apr 2008).
14. Nguyen, K.-A., Do. P. and Grall, A., "Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using Birnbaum's structural importance", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **168**, pp. 249-261 (Dec 2017).
15. Zahedi-Hosseini, F., Scarf, P. and Syntetos A. "Joint optimisation of inspection maintenance and spare parts provisioning: a comparative study of inventory policies using simulation and survey data", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **168**, pp. 306-316 (Dec 2017).

16. Sarker, R. and Haque A., "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation", *Appl. Math. Model.*, **24**10, pp. 751-760 (Aug 2000).
17. Ilgin, M. A. and Tunali, S. "Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **34**5-6, pp. 594-604 (May 2006).
18. Nguyen, D. and Bagajewicz, M. "Optimization of preventive maintenance scheduling in processing plants", *In Computer Aided Chemical Engineering*, **25** B. B. and X. Joulia, Ed. Elsevier, pp. 319-324 (2008).
19. Kazemi Zanjani, M. and Nourelfath, M. "Integrated spare parts logistics and operations planning for maintenance service providers", *Int. J. Prod. Econ.*, **158**, pp. 44-53 (Dec 2014).
20. Shi, Y., Xiang, Y., Jin, T. and et al. "Joint planning for spare parts inventory and preventive maintenance in a multi-echelon network", *Int. J. Inventory Res.*, **33**, pp. 263-281 (Jan 2016).
21. Kabir, A.B.M. Zohrul and Al-Olayan, Ahmed S. "Joint optimization of age replacement and continuous review spare provisioning policy", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, **14**7, pp. 53-69 (Jul 1994).
22. Kabir, A.B.M. Zohrul and Al-Olayan, Ahmed S. "A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement", *Eur. J. Oper. Res.*, **90**1, pp. 171-181 (Apr 1996).
23. Wang, L., Chu, J. and Mao, W. "A condition-based order-replacement policy for a single-unit system", *Appl. Math. Model.*, **32** 11, pp. 2274-2289 (Nov 2008).
24. Wang, L., Chu, J. and Mao, W. "A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure", *Eur. J. Oper. Res.*, **194**1, pp. 184-205 (Apr 2009).
25. Wang, L., Chu, J. and Mao, W. "An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains", *J. Qual. Maint. Eng.*, **14**4, pp. 387-401 (Sep 2008).
26. Costantino, F., Di Gravio, G. and Tronci, M. "Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **119**, pp. 95-101 (Nov 2013).
27. Wang, Z., Hu, C., Wang, W. and et al. "A prognostics-based spare part ordering and system replacement policy for a deteriorating system subjected to a random lead time", *Int. J. Prod. Res.*, **53**15, pp. 4511-4527 (Aug 2015).
28. Olde Keizer, M. C. A., Teunter, R. H. and Veldman J., "Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components", *Eur. J. Oper. Res.*, **257** 1, pp. 209-222 (Feb 2017).
29. Zhang, X. and Zeng, J. "Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems", *Eur. J. Oper. Res.*, **262**2, pp. 479-498 (Oct 2017).
30. Liu, Q., Dong, M. and Peng Y. "A dynamic predictive maintenance model considering spare parts inventory based on hidden semi-markov model", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, **227**(9), pp.2090-2103 (Dec 2012).
31. Kabir, A.B.M. Zohrul and Al-Olayan, Ahmed S. "Simulation of an integrated age replacement and spare provisioning policy using SLAM", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **52**2, pp. 129-138 (May 1996).
32. Eruguz, A. S., Tan, T. and van Houtum, G.-J. "Integrated maintenance and spare part optimization for moving assets", *IISE Trans.*, **50**3, pp. 230-245 (Mar 2018).