

بهینه‌سازی ترکیبی موجودی قطعات یدکی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات

یاسر سعیدی سوق^{۱*}، اردشیر احمدی^۲، سعید رضانی^۳

دانشگاه جامع امام حسین(ع)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱

چکیده

امروزه با توجه به شرایط رقابتی موجود، شرکت‌ها تلاش می‌کنند به منظور کاهش هزینه‌های خود، سطح موجودی خود را کاهش دهند. در مدیریت و کنترل موجودی در سازمان‌ها، باید یک توازن بین سطح موجودی قطعات یدکی و هزینه و ریسک ناشی از عدم وجود قطعه به هنگام نیاز برقرار نمود. واضح است که این سطح از موجودی قطعات یدکی متأثر از خصوصیات دستگاه‌ها و قابلیت اطمینان آنها است. به طور کلی در صنایع مختلف، سیاست‌های نگهداری و تعمیرات و تعیین میزان موجودی قطعات یدکی به صورت جداگانه انجام می‌شوند. در این مقاله، از شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور بهینه‌سازی ترکیبی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت و موجودی قطعات یدکی استفاده شده است. از الگوریتم ژنتیک باینری به منظور پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم استفاده گردیده است. در این سیاست؛ فواصل بازرسی (T)، حداکثر موجودی قطعات یدکی (S)، نقطه سفارش مجدد موجودی قطعات یدکی (s)، سرحد فرسایش به منظور انجام تعویض پیشگیرانه (Lp) و نیروی انسانی مورد نیاز برای انجام تعویض‌های اصلاحی و پیشگیرانه (labor) بهینه می‌شود. در مطالعه موردی برای شبیه‌سازی رویدادهای مختلف تعمیراتی، از بانک اطلاعاتی آنالیز روغن یک شرکت عمرانی شامل ۸۰۰۰ داده آنالیز روغن استفاده شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو مورد نظر و همچنین الگوریتم ژنتیک در نرم افزار Matlab کد نویسی شده است و در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی مطالعه موردی آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: موجودی، قطعات یدکی، نگهداری و تعمیرات، شبیه‌سازی مونت کارلو، بهینه‌سازی ترکیبی

مقدمه

چشمگیری مشاهده کرد. در واقع با بهینه‌سازی سیاست‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی به صورت جداگانه از یک طرف برای بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، میزان موجودی را بی‌نهایت فرض می‌کنیم و این خود هزینه هنگفتی را با توجه به نوع دستگاه به سیستم انبار ما تحمیل می‌کند و از طرف دیگر برای بهینه‌سازی موجودی، فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات را نادیده می‌گیریم و این موضوع باعث می‌شود برای تعیین میزان بهینه موجودی انبار، درک درستی از تقاضای واحدهای نگهداری و تعمیرات وجود نداشته باشد و در تعیین میزان موجودی دچار افراط و تفریط شود.

در مدیریت و کنترل موجودی در سازمان‌ها، باید یک توازن بین سطح موجودی قطعات یدکی و هزینه و ریسک ناشی از عدم وجود قطعه به هنگام نیاز برقرار نمود. واضح است که این سطح از موجودی قطعات یدکی متأثر از

اکثر تحقیقات گذشته، نگهداری و تعمیرات را با فرض دسترسی نامحدود به قطعات یدکی در نظر می‌گرفتند. در نظر گرفتن این فرض، باعث بالا رفتن هزینه‌های موجودی می‌شود. با در نظر گرفتن سطح بهینه موجودی قطعات یدکی، می‌توان در میزان هزینه‌های موجودی، کاهش

*۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه جامع امام حسین(ع)، نویسنده پاسخگو، پست الکترونیکی: yasser.saeidisugh@yahoo.com، نشانی: تهران، اتوبان بابایی شرق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی صنایع

۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، پست الکترونیکی: ardashir79@yahoo.com

۳- مربی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، پست الکترونیکی: ramezani.sr@gmail.com

دادند، هرچند در مقاله آنها به مسئله تأمین قطعات یدکی نپرداختند. در واقع آنها میزان قطعات یدکی در دسترس را نامحدود در نظر گرفتند و فرض کردند هر میزان قطعه یدکی نیاز داشتند، بدون وقفه در اختیار دارند. به صورت مشابه، در بیشتر مطالعات دیگر برای سیاست‌های CBM، فرض شده که میزان نامحدود قطعات یدکی همیشه در دسترس است [۷] [۸] [۹] [۱۰]. متأسفانه بین زمان سفارش و زمان تحویل تأخیر زمانی وجود دارد. از این‌رو کمبود قطعات یدکی باعث کاهش خدمت‌رسانی و سوددهی می‌شود. این تأخیر زمانی، زمان تدارک نامیده می‌شود. دهی^۸ و همکاران یک مدل سفارش-تعویض عمومی با در نظر گرفتن زمان تدارک ثابت برای سیستم‌های تک واحدی ارائه دادند که در آن تصمیم‌گیری در مورد تعویض پیشگیرانه و سفارش قطعات یدکی براساس زمان عملیات انجام می‌شود [۱۱]. شو و گریفث^۹ یک سیاست عمر-تعویض با در نظر گرفتن حداقل تعمیر مبتنی بر عمر و زمان تدارک سفارش قطعات یدکی به صورت تصادفی، پیشنهاد کردند [۱۲]. شو و چن^{۱۰} بر همان سیاست عمر-تعویض با در نظر گرفتن زمان تدارک تصادفی سیستم‌های تحت تأثیر شوک، تمرکز کردند [۱۳]. برزاوسک و هودکلین^{۱۱} ترکیب مسائل تعویض و تأمین قطعات یدکی را به صورت دوره‌ای در نظر گرفتند [۱۴]. دیگر مسائل مربوط به بهینه‌سازی تعویض و تأمین قطعات یدکی، سیاست تعویض مبتنی بر طول عمر و تأمین قطعات یدکی است [۱۵] [۱۶] [۱۷]. تعداد کمی از سیاست‌های تعویض و تأمین قطعات یدکی در زمینه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت توسعه داده شده‌اند. کاوایی^{۱۲} در مورد مسئله بهینه‌سازی تعویض و سفارش یک سیستم فرسایشی مبتنی بر فرآیند مارکف بحث کرد [۱۸]. در این سیاست تصمیم‌گیری در مورد سفارش قطعات یدکی و تعویض، براساس مشاهده وضعیت سیستم در زمان‌های گسسته انجام می‌شود. برای سیستمی که فرآیند زوال آنها به‌طور مداوم است، مدل‌سازی فرآیند زوال با استفاده از زمان‌های گسسته محدود، سیستم را به چندین وضعیت مصنوعی تقسیم‌بندی می‌کند. تخمین ماتریس احتمال انتقال یک پله‌ای برای

خصوصیات دستگاه‌ها و قابلیت اطمینان آنها است. رویکرد سنتی در بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی به صورت متوالی بود، یعنی به‌طور جداگانه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات (فواصل بازرسی، تعویض پیشگیرانه، سرحد تعویض پیشگیرانه و غیره) و موجودی قطعات یدکی بهینه می‌شدند. در مقایسه با بهینه‌سازی متوالی در دو مدل، مدل ارائه‌شده توسط کبیر و فاراش^۱ تأثیر قابل توجهی بر هزینه کل داشته و این تأثیر به دلیل روش‌های بهینه‌سازی به‌کار گرفته‌شده توسط آنها بود [۱].

در دهه‌های گذشته، میزان علاقه در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در حال افزایش بوده است. این موضوع را در مقاله‌های مروری مانند مقاله فام و ونگ^۲ [۲] و ونگ [۳]، می‌توان مشاهده کرد. تاکنون صدها مقاله در زمینه نگهداری و تعمیرات چاپ شده است. به صورت کلی می‌توان نگهداری و تعمیرات را به دو دسته اصلی، اصلاحی و پیشگیرانه، تقسیم کرد. نگهداری و تعمیرات اصلاحی بعد از خرابی انجام می‌شود و شامل همه اقداماتی است که در صورت خرابی سیستم باید انجام شود. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه (PM)^۳، نگهداری و تعمیراتی است که قبل از خرابی سیستم و به‌منظور نگه‌داشتن تجهیزات در سطح خاصی از آمادگی با استفاده از بازرسی‌ها، اکتشافات و جلوگیری از وقوع خرابی اولیه به صورت سیستماتیک، انجام می‌شود [۳]. PM خود به دو دسته نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر زمان (TBPM)^۴ و نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت (CBM)^۵ تقسیم می‌شود. رویکردهای متنوعی در مدل‌سازی و بهینه‌سازی نگهداری و تعمیرات برای انجام PM طراحی شده‌اند [۴].

بعضی محققان مانند کاستانییر^۶ و همکاران [۵] و دیولی^۷ و همکاران [۶] بر سیستم‌هایی که فرآیند زوال آنها به‌صورت احتمالی و مداوم است، تمرکز کردند و مدل‌های تحلیلی برای سیاست بازرسی و جایگزینی مبتنی بر وضعیت ارائه

- 1- Kabir & Farrash
- 2- Pham & Wang
- 3- Preventive maintenance
- 4- time-based preventive maintenance
- 5- Condition-based maintenance
- 6- Castanier
- 7- Dieulle

- 8- Dohi
- 9- Sheu & Griffith
- 10- Chien
- 11- Brezavsč`ek and A. Hudoklin
- 12- Kawai

فرآیند مارکف در عمل اغلب کار دشواری است [۱۹]. در بسیاری از سیاست‌های CBM موجود که فرآیند زوال سیستم را به‌طور مداوم در نظر می‌گیرند، فرض شده است که سرحد خرابی مقدار ثابت و از پیش تعیین شده‌ای است [۲۰] [۲۱]. به عبارت دیگر، فرض شده در صورتی که سطح زوال یک سیستم از مقدار ثابتی متجاوز شود، خرابی رخ می‌دهد. هرچند این فرض کاربردهای سیاست‌های CBM را محدود می‌کند، اما در بیشتر موارد، سرحد خرابی مقدار ثابت و روشنی برای شاخص‌های شرایط کلیدی مرتبط با زوال آنها ندارند. برای مثال میزان ذرات فرسایشی موجود در روغن موتور کامیون و ارتعاش اندازه‌گیری شده در ماشین‌آلات از یک خرابی به خرابی دیگر متفاوت است [۲۲]. می‌توان گفت سطح زوال تا بروز خرابی اغلب غیرقطعی است. در این مقاله از مفهومی به نام قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت برای شبیه‌سازی فرآیند خرابی استفاده می‌شود که انعکاس بهتری از واقعیت را نشان می‌دهد.

رایج‌ترین رویکردهای استفاده شده برای توسعه مدل‌های ممکن برای تصمیم‌گیری تأمین قطعات یدکی، شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی ریاضی است. برنامه‌ریزی ریاضی به توسعه مدل‌های ریاضی براساس برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی ریاضی دینامیکی، برنامه‌ریزی آرمانی و غیره مربوط می‌شود. محققان به مطالعه مسئله مدیریت تأمین قطعات یدکی از جنبه‌های مختلف پرداختند. در این زمینه کندی^۱ و همکاران یک مقاله مروری ارائه دادند. لازم به ذکر است که همه این مطالعات دربردارنده مدل‌های ساده شده سیستم‌ها یا ماشین‌آلات می‌باشند و پیش‌بینی می‌شود واقع‌گرایی و قابلیت اطمینان آنها برای خوانندگان ایجاد سؤال کند [۲۳]. رویکرد دیگری که در حل مسئله مدیریت موجودی قطعات یدکی در صنایع رایج است، مدل شبیه‌سازی است [۲۴]. مدل‌های ترکیب هزینه‌ها که تاکنون توسعه داده شده است، اغلب دارای پیچیدگی فراوانی می‌باشند و از این رو ممکن است حل کردن تحلیلی این مدل‌ها، به استثنای موارد بسیار کم و با ساده‌سازی فرضیات، ممکن نباشد [۲۵]. در مواردی که بیش از یک دستگاه مشابه به صورت موازی کار می‌کنند، مدل‌سازی به صورت قابل توجهی سخت می‌شود. علاوه بر این، به علت پیچیدگی ریاضی مسائلی که سفارش‌دهی و نگهداری و تعمیرات را برای چندین دستگاه

به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرند، بیشتر تحقیقات منتشر شده در این زمینه سیاست تعمیر و نگهداری و سفارش را به صورت ساده در نظر گرفته‌اند یا از شبیه‌سازی برای محاسبه هزینه مدل پیشنهاد شده استفاده کردند [۲۶]. اصلی‌ترین دلیل برتری مدل شبیه‌سازی بر مدل ریاضی، توانایی توصیف ارتباطات غیرخطی چند متغیره است که بیان آن به شکل تحلیل صریح، ممکن است بسیار دشوار باشد [۲۷]. به هر حال، مدل شبیه‌سازی یک تکنیک بهینه‌سازی نیست. اگر هدف ایجاد کردن سیاست‌های بهینه موجودی قطعات یدکی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات با استفاده از شبیه‌سازی باشد، باید مدل شبیه‌سازی با یک تکنیک بهینه‌سازی یکپارچه شود. تکنیک‌های بهینه‌سازی با جست‌وجو در فضای حل و به دست آوردن جواب‌های ممکن برای مدل شبیه‌سازی و حرکت به سمت بهینه کلی، باعث به دست آوردن جواب بهینه برای مدل شبیه‌سازی می‌شوند. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک باینری به منظور بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی ارائه شده استفاده شده است.

۲- قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت

قابلیت اطمینان سنتی مفهومی مبتنی بر زمان دارد، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(t) = Pr\{T_f > t\} = 1 - Pr\{T_f \leq t\} = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du \quad (1)$$

متغیر تصادفی T_f ، به معنی مدت زمان تا وقوع خرابی؛ $F(t)$ تابع توزیع تجمعی خرابی^۲، $f(t)$ تابع چگالی احتمال خرابی و $R(t)$ احتمال این است که سیستم بین زمان 0 و t خوب کار کند. این تعریف قابلیت اطمینان به صورت گسترده پذیرفته شده است و ابزار مهمی برای آنالیز یک سیستم، تحت سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر زمان است.

اخیراً CBM توجه زیادی را به خود جلب کرده و مهندسان طراح و مدیران تلاش می‌کنند سیستم‌های خود را براساس وضعیت واقعی، به جای در نظر گرفتن فقط طول عمر و زمان عملیات، ارزیابی کنند. از این رو، نیاز به رویکردی برای تشخیص قابلیت اطمینان سیستم براساس اندازه‌گیری کارایی فیزیکی، احساس می‌شود. کولاریک^۳ مفهوم و روشی

2- cumulative distribution function

3- Kolarik

1- Kennedy

است)، و X_f نشان‌دهنده زوال تا خرابی (سطحی از فرسودگی که خرابی رخ می‌دهد) است. همچنین فرض شده است که متغیر تصادفی X با گذشت زمان در حال افزایش است. در نظر داشته باشید، بیشتر سیستم‌ها در طول زمان خدمت‌دهی، به سمت خراب شدن می‌روند. به این نکته توجه داشته باشید، که شکل تعریف قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت (رابطه (۳)) شبیه به قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان سنتی است (رابطه (۱)). از این‌رو، $R(X)$ نشان دهنده احتمال سالم ماندن سیستم از سطح زوال 0 تا X است. استفاده از قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت در مدل شبیه‌سازی، باعث می‌شود که مدل شبیه‌سازی شده، با وضعیت واقعی سیستم تطابق بیشتری داشته باشد.

برای تخمین زدن قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت، $R(X)$ می‌توان از روش‌های موجود برای تخمین زدن قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان، $R(X)$ ، استفاده کرد. در عمل، سطوح زوال واحدهایی که در آنها در همان موقع خرابی اتفاق می‌افتد، باید به عنوان مشاهدات کامل در نظر گرفته شوند و سطوحی از زوال که در آنها تعویض پیشگیرانه انجام می‌شود باید به عنوان مشاهدات Censored در نظر گرفته شوند، که در اصطلاح نمونه‌های Censored نامیده می‌شوند [۳۰]. نوع توزیع $f(x)$ براساس آزمایش‌های پیشرفته یا هیستوگرام نمونه‌ها، می‌تواند تعیین شود. در پایان، $R(X)$ ، $F(X)$ ، $f(x)$ را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف تخمین برای توزیع‌های متفاوت براساس نمونه‌های Censored [۳۰]، مانند تخمین ماکزیمم Likelihood [۳۱] به دست آورد. بعد از به دست آوردن $R(X)$ ، قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت را به شرطی که سطح زوال سیستم مشاهده شده باشد، را می‌توان محاسبه کرد.

۳- سیاست تعویض مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات بدکی

معرفی نمادها

ΔX_i : افزایش سطح زوال واحد i در طول آخرین دوره زمانی.

F_j : نشان می‌دهد که آیا واحد j در زمان جاری قبل از اینکه تصمیمی گرفته شود، خراب شده است (در صورتی که خرابی اتفاق افتد $F_j = 1$ و در غیر این صورت $F_j = 0$).

I_j : نشان می‌دهد که آیا بازرسی واحد j در زمان جاری باید

را توسعه داد که در اصطلاح قابلیت اطمینان عملکرد^۱ نامیده می‌شود و براساس تعیین مداوم سطح عملکرد فیزیکی تعریف می‌شود و به صورت زیر قابل ارائه است [۲۸]:

$$R_{PR}(t) = Pr\{X_t < L\} = 1 - Pr\{X_t \geq L\} \quad (2)$$

X_t سطح زوال سیستم یا اندازه عملکرد سیستم در زمان t ، هر چقدر کوچک‌تر باشد بهتر است، L نشان‌دهنده یک تعریف برای خرابی از نظر شاخص زوال X_t است (خرابی).

براساس رابطه (۲)، قابلیت اطمینان عملکرد، بر ارزیابی احتمال خرابی، براساس سطح / وضعیت زوال تأکید دارد، در حالی که برای محاسبه قابلیت اطمینان مبتنی بر عمر / زمان، زمان عملکرد یا عمر سیستم، در نظر گرفته می‌شود. براساس قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان، احتمال خرابی سیستم‌هایی از یک نوع در یک زمان، با همدیگر برابر است، اگر چه سطوح زوال آنها ممکن است با همدیگر متفاوت باشد. قابلیت اطمینان عملکرد برای سیستم‌های با سطوح زوال متفاوت، در همان زمان، اگر L مقدار ثابتی باشد، متفاوت است. لو^۲ و همکاران تعریفی برای قابلیت اطمینان عملکرد سیستم، با اندازه‌گیری متعدد عملکرد و حالت‌های خرابی متعدد ارائه کردند [۲۹]. بر اساس تعریف ارائه شده از قابلیت اطمینان عملکرد در بالا، سرحد خرابی L ثابت و دقیق فرض شده و اگر سطح زوال، از سرحد خرابی تجاوز کند، سیستم در حالت خراب در نظر گرفته می‌شود. هر چند در عمل، تعیین سرحد خرابی برای تجهیزات / سیستم کار دشواری است. به عنوان مثال، مقدار عناصر موجود در روغن موتور کامیون در زمانی که موتور خراب باشد، برای خرابی‌های گوناگون، کاملاً متفاوت است. به عبارت دیگر، سطح زوال زمانی که خرابی رخ می‌دهد، در اصطلاح زوال تا خرابی، اغلب تصادفی و احتمالی است. در نتیجه، برای مشخص کردن ارتباط بین خرابی تصادفی سیستم و سطح زوال، قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت پیشنهاد می‌شود، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R(X) = Pr\{X_f > x\} = 1 - Pr\{X_f \leq x\} \quad (3)$$

X سطح زوال سیستم (هرچه کوچک‌تر باشد بهتر

1- Performance reliability
2- Lu

انجام شود (در صورتی که بازرسی مورد نیاز باشد $I_j = 1$ و در غیر این صورت $I_j = 0$).

ICR_j : نشان می‌دهد که آیا جایگزینی اصلاحی واحد j در زمان جاری باید انجام شود (در صورتی که تعویض پیشگیرانه انجام شود $ICR_j = 1$ و در غیر این صورت $ICR_j = 0$).

IN_j : نشان می‌دهد که آیا نیاز است واحد j در زمان بازرسی بعدی در سیکل زمانی جاری مورد بررسی قرار گیرد (اگر $IN_j = 1$ باشد، واحد j باید در آینده بازرسی شود و در غیر این صورت $IN_j = 0$).

IPR_j : نشان می‌دهد که آیا تعویض پیشگیرانه در زمان جاری باید انجام شود (اگر تعویض پیشگیرانه انجام شود $IPR_j = 1$ و در غیر این صورت $IPR_j = 0$).

IR_j : نشان می‌دهد که آیا تعویض در زمان جاری انجام شده است (اگر تعویض انجام شده باشد $IR_j = 1$ و در غیر این صورت $IR_j = 0$).

$Last OT$: آخرین زمان سفارش.

$labor$: تعداد نیروی انسانی را نشان می‌دهد.

NA : تعداد قطعات یدکی که در زمان جاری می‌رسند ($NA = S - s$) می‌باشد. اگر سفارش در t_s واحد زمانی قبل صادر شود، $S - s$ واحد قطعه یدکی در یک لحظه می‌رسد در غیر این صورت ($NA = 0$).

OC : نشان می‌دهد که آیا سفارش در راه است ($OC = 0$) نشان می‌دهد که سفارش صادر شده نداریم و $OC = 1$ نشان می‌دهد که یک سفارش صادر شده که هنوز نرسیده است، داریم).

SL : تعداد قطعات یدکی در دسترس در زمان جاری.

ST_j : زمان شروع چرخه عمر جاری واحد j .

t_k : زمان گسسته فعلی.

$X_{f,j}$: سطح خرابی واحد j متناظر با چرخه عمر جاری.

X_j : سطح زوال واحد j در زمان گسسته جاری قبل از اینکه تصمیمی در مورد جایگزینی گرفته شود.

X_j^{last} : سطح خرابی واحد j در زمان گذشته بعد از اینکه تصمیم جایگزینی گرفته شد.

t_s : زمان تدارک.

۳-۱- ویژگی‌های سیستم

سیستم مورد مطالعه، از n واحد مستقل و مشابه تشکیل شده است. فرض کلی برای هر واحد در زیر آورده شده است:

• سطح زوال هر واحد با یک متغیر عددی تصادفی X_t توصیف می‌شود، که به صورت تصادفی در طول عمر خدمت‌دهی در حال افزایش است. در $X_t = 0, t = 0$ نظر گرفته می‌شود و دستگاه در دوره‌های زمانی بعدی در وضعیت جدیدی قرار می‌گیرد. مقدار بزرگ‌تر X_t ، سیستم را به خرابی نزدیک‌تر می‌کند.

• خرابی را خود دستگاه اعلام می‌کند. سطوح زوال، زمانی که خرابی اتفاق می‌افتد (X_f) در طول سیکل‌های مختلف، متفاوت در نظر گرفته می‌شود. X_f زوال تا خرابی نامیده می‌شود، که با زمان تا خرابی قابل مقایسه است. در یک کلمه، X_f تصادفی و احتمالی در نظر گرفته می‌شود. براساس روش قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت ارائه شده در بخش قبل، فرض شده است که X_f از توزیعی با CDF خرابی مبتنی بر وضعیت $F(X)$ ، پیروی می‌کند.

• سطح زوال دستگاه می‌تواند با بازرسی‌های لحظه‌ای و غیر مخرب در زمان‌های گسسته‌ی $t_k = k\Delta t$ تعیین شود، که $k \in N$ و Δt طول یک واحد زمانی است (با استفاده از مسئله نگهداری و تعمیرات مرتبط حاصل می‌شود). با این وجود ممکن است بازرسی دستگاه همیشه در زمان t_k ، برای صرفه‌جویی در هزینه نیاز نباشد، که بعداً در این مورد بحث خواهد شد.

افزایش X_t بین دو زمان متوالی، t_{k-1} و t_k به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta X_k = X_k - X_{k-1} \quad (4)$$

• فرض شده است که این میزان افزایش، ΔX_k ، غیرمنفی، پابرجا و مستقل آماری است و از توزیع با تابع چگالی احتمال (PDF)، $g_X(X)$ ، پیروی می‌کند. در نتیجه، توزیع افزایش‌ها در طول m واحد زمانی $g_X^{(m)}(X)$ می‌باشد، به صورتی که $\ln g_X^{(m)}(X)$ امین‌گردش از $g_X(X)$ است. برای تعیین $g_X^{(m)}(X)$ می‌توان از توزیع‌های زیادی که موجود است استفاده کرد. به عنوان مثال توزیع گاما [۲۰]. در این مقاله یک ناوگان کامیون مورد بررسی قرار گرفته شده است. هر کامیون در معرض یک فرآیند زوال پیوسته و دائمی می‌باشد.

۳-۲- عملیات نگهداری و تعمیرات و سفارش قطعات یدکی
سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت ارائه

تعویض پیشگیرانه و اصلاحی به ترتیب C_p و C_c در نظر گرفته می‌شود. در حالت واقعی می‌توان $C_c > C_p$ در نظر گرفت.

- موجودی قطعات یدکی تحت سیاست موجودی (S, s) در نظر گرفته می‌شود. در این سیاست، سطح موجودی در ابتدا S در نظر گرفته می‌شود و مقدار موجودی را در زمان گسسته t_k بدون هیچ هزینه‌ای می‌توان به دست آورد. تعویض پیشگیرانه و اصلاحی، باعث کاهش موجودی قطعات یدکی می‌شود و زمانی که سطح موجودی تا s کاهش پیدا کند، می‌توان به میزان $S-s$ واحد قطعه یدکی سفارش داد. در این مطالعه فرض می‌شود که اگر سفارشی صادر شود و نرسیده باشد، امکان صدور سفارش جدید وجود ندارد، یعنی در هر زمان فقط اجازه صدور یک سفارش وجود دارد. در اینجا زمان تدارک به صورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده است و در هر سیکل به صورت تصادفی تولید می‌شود، زیرا در عمل متعددی باعث می‌شوند که زمان تدارک مقدار ثابتی نباشد. زمانی که سفارش قطعات یدکی می‌رسد، در بعضی از دستگاه‌ها که از قبل نیاز به تعویض می‌باشد، فوراً جایگزینی صورت می‌گیرد و باقیمانده در انبار موجودی قرار داده می‌شوند. همچنین فرض شده است که قطعات یدکی که در انبار هستند، مستهلک نمی‌شوند. هزینه نگهداری هر واحد در انبار Ch و هزینه سفارش دهی Cs می‌باشد.
- از عوامل مهم در انجام کارهای نگهداری و تعمیرات، نیروی تعمیراتی می‌باشد. در موارد زیادی کمبود یا مازاد نیروی انسانی باعث می‌شود، شرکت متحمل هزینه‌های اضافی شود. در این مقاله، نیروی انسانی که مسئول انجام تعویض می‌باشد، به عنوان یکی از متغیرهایی در نظر گرفته شده است که باید درباره تعداد آن تصمیم‌گیری شود. تعداد نیروی انسانی را با $labor$ و هزینه به کارگیری هر نفر در هر دوره زمانی C_{labor} مدنظر قرار می‌گیرد. این تعداد نیروی انسانی به صورت دائم در دسترس می‌باشند و کار تعمیر به وسیله آنها، یک دوره زمانی طول می‌کشد. به عبارت دیگر اگر یک نیروی کار مشغول انجام کار تعمیراتی باشد، تا دوره زمانی بعد، بیکار نمی‌شود.
- بر اساس میزان در دسترس بودن قطعات یدکی و در دسترس بودن نیروی انسانی و همچنین مشاهدات مربوط به زوال دستگاه j ، X_j ، در هر زمان بازرسی t_k ، امکان تصمیم‌گیری در مورد تعویض واحد و سفارش قطعات یدکی وجود دارد. تصمیم‌های ممکن به صورت زیر

شده، یک سیاست کنترل حدود (CLP)^۱ با سرحد تعویض پیشگیرانه L_p ، برای سطوح زوال دستگاه‌هاست و سیاست موجودی از نوع (S, s) است که S ماکزیمم سطح موجودی و s سطح سفارش مجدد می‌باشد. کبیر و ال‌اولایان^۲ برای اولین بار سیاست مرور دائمی موجودی (S, s) را برای سیستم یک واحدی ارائه کردند، که در آن تعویض بر اساس طول عمر، برای دستگاه در نظر گرفته شد [۳۲] و سپس کبیر و فاراش [۱] سیاست تعویض بر اساس طول عمر و تأمین قطعات یدکی را برای سیستم‌های چند واحدی، توسعه دادند، که در آن واحدها، مشابه و مستقل در نظر گرفته شده‌اند. با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های سفارش و موجودی، سیاست موجودی (S, s) برای یک سیستم با چندین واحد مستقل، که از قطعات یدکی مشابهی استفاده می‌کنند، مناسب است. در نتیجه سیاست موجودی (S, s) برای سیاست نگهداری و تعمیرات ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفته شده است.

فرض‌های مربوط و تصمیم‌گیری‌های ممکن برای تعویض مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات یدکی در زیر آورده شده‌اند:

- هر دستگاه در زمان‌های گسسته، $k \in N$ ، $t_{KT} = KT$ بازرسی می‌شود، که T فواصل بازرسی ثابت و برابر $K_t \in NT = K_t \Delta t$ ، و سطح زوال مشاهده شده دستگاه X_j ($j=1, 2, \dots, n$) در هر زمان بازرسی، X_j است. هزینه بازرسی هر دستگاه C_i و از زمان مورد نیاز برای انجام بازرسی صرف نظر شده است. Δt را برابر ۱ در نظر بگیرد. اگر چه همه دستگاه‌های موجود در سیستم، فاصله بازرسی یکسانی دارند، اما ممکن است که در یک زمان بازرسی نشوند. این موضوع به این دلیل اتفاق می‌افتد، که زمان شروع چرخه عمر دستگاه‌ها متفاوت است.
- فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات که برای هر دستگاه ممکن است انجام شود شامل؛ نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه قبل از وقوع خرابی و تعویض اصلاحی بعد از خرابی می‌باشد، که فقط در زمان‌های گسسته t_k انجام می‌شوند. یک تعویض شامل تعویض کامل دستگاه یا یک آورمال می‌باشد و بعد از آن دستگاه مثل یک دستگاه نو عمل می‌کند. فرض می‌شود که نگهداری و تعمیرات به صورت لحظه‌ای انجام می‌شود. هزینه

1- Control limit Policy
2- Kabir & Al-Olayan

می‌باشند:

✓ اگر $X_j < LP$ شود، تعویض پیشگیرانه‌ای انجام نمی‌شود.

✓ اگر $X_j \geq LP$ شود و حداقل یک قطعه یدکی در انبار در دسترس باشد و همچنین حداقل یک نیروی انسانی بیکار باشد، باید عملیات تعویض پیشگیرانه بدون هیچ وقفه‌ای انجام شود.

✓ اگر $X_j \geq LP$ باشد و در انبار قطعه یدکی در دسترس نباشد یا نیروی انسانی بیکار وجود نداشته باشد، در این صورت، باید یک سفارش قطعه یدکی صادر شود یا تا بیکار شدن حداقل یک نیروی انسانی، انتظار کشید، سپس واحد ز به عملکرد خود ادامه دهد. با توجه به این موضوع، نیازی نیست واحد ز پس از این، مورد بازرسی قرار گیرد. اگر در زمان رسیدن سفارش صادر شده، واحد ز هنوز در حال کار باشد، باید فوراً تعویض پیشگیرانه انجام شود (تأخیر در تعویض پیشگیرانه)، اگر قبل از رسیدن سفارش واحد ز خراب شود، بعد از رسیدن سفارش باید فوراً تعویض اصلاحی انجام شود.

• خرابی هر واحد بدون انجام بازرسی و فوری کشف می‌شود. در زمان گسسته t_k به دنبال بروز خرابی، واحد مورد نظر، در صورت وجود حداقل یک قطعه یدکی در انبار و حداقل یک نیروی انسانی بیکار، مورد تعویض اصلاحی قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، واحد خراب منتظر سفارش قطعه یدکی می‌ماند و به محض اینکه سفارش قطعات یدکی رسید یا نیروی انسانی بیکار شد، تعویض اصلاحی انجام می‌شود. Cd هزینه ماندن یک واحد، در واحد زمان در حالت خرابی است.

• بعد از هر تعویض اصلاحی / پیشگیرانه واحد ز، باید فوراً در مورد صدور سفارش برای قطعات یدکی بر اساس سیاست موجودی شرح داده شده، تصمیم‌گیری شود.

• بعد از یک تعویض، یک چرخه عمر جدید، برای واحد ز تکرار می‌شود.

فرضیات زیر، به صورت لحظه‌ای و متوالی در هر زمان گسسته t_k تحت سیاست سفارش - تعویض وجود دارد:

۱. بررسی سطح موجودی و اینکه آیا سفارش صادر شده قبلی رسیده است.
۲. قرار دادن قطعات یدکی در انبار درست در لحظه‌ای که می‌رسند.
۳. یک دستگاه را در نظر بگیرید و خرابی آن را بررسی

کنید. اگر عملکرد آن خوب بود، تصمیم‌گیری در مورد نگهداری و تعمیرات و بازرسی بر پایه قواعد ارائه شده در سیاست بالا، گرفته شود.

۴. تصمیم‌گیری در مورد سفارش قطعات یدکی بر اساس قواعدی که در سیاست بالا پیشنهاد شد.

۵. قدم‌های ۳ و ۴ را برای دومین و سومین و... n امین واحد به ترتیب تکرار کنیم.

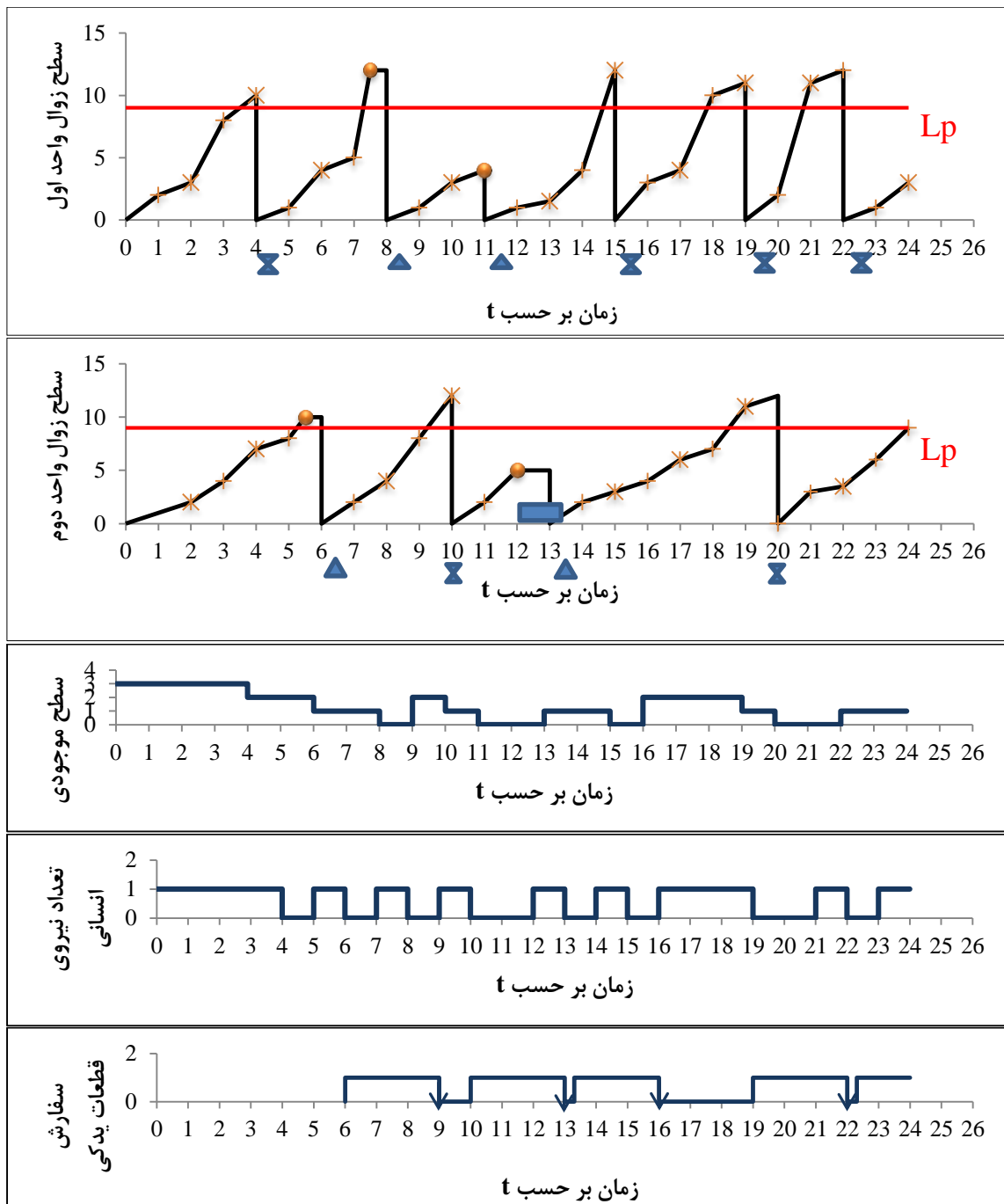
یک مثال در مورد ارزیابی زوال واحد و وضعیت متناظر با قطعات یدکی و نیروی انسانی در شکل (۱) برای دو واحد عملیاتی، برای یک سیستم فرضی ارائه شده است.

در مدل‌سازی این چارچوب، فرض می‌شود که هر رویداد تعویض اصلاحی / پیشگیرانه، بازرسی‌ها، سفارش قطعات یدکی و رسیدن قطعات یدکی سفارش داده شده، فقط می‌توانند در زمان‌های گسسته اتفاق افتد. این موضوع ممکن است در بعضی موارد واقعی نباشد. اگرچه، طول واحد زمانی به اندازه کافی کوچک باشد، فرضیات سیاست جایگزینی مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات یدکی، می‌تواند به واقعیت بسیار نزدیک باشد.

در مدل ارائه شده، متغیرهای تصمیم زیر بهینه شده‌اند:

- فواصل بازرسی T
- سرحد تعویض پیشگیرانه برای سطح زوال Lp
- سطح سفارش مجدد S
- ماکزیمم سطح موجودی
- تعداد نیروی انسانی مورد نیاز labor

برای زوال کند و آرام، بازرسی به صورت مکرر، غیرضروری و گران است. برعکس، موقعی که فواصل بازرسی زیاد باشد، احتمال خرابی قبل از رسیدن به بازرسی بعدی افزایش می‌یابد. به طور مشابه، سرحد تعویض پیشگیرانه کم (Lp)، تعویض پیشگیرانه مکرر را نتیجه می‌دهد و از عمر باقی‌مانده دستگاه نمی‌توان به خوبی بهره‌برداری کرد. در نظر داشته باشید که در مورد سفارش قطعات یدکی، هزینه نگهداری موجودی در صورت مقدار زیاد S و S ممکن است افزایش یابد. اما مقدار کم S و S باعث افزایش احتمال عدم دسترس‌پذیری دستگاه‌ها می‌شود. زیرا باعث افزایش ریسک کمبود قطعات یدکی می‌گردد. ماکزیمم سطح موجودی بهینه، ممکن است از مجموع تعداد n واحد سیستم، بیشتر باشد. زمانی که هزینه نگهداری (Ch) در مقایسه با هزینه سفارش (Cs) بسیار کم باشد و



شکل (1): مثالی در مورد زوال واحدها و تأمین قطعات یدکی برای یک سیستم که دارای دو واحد عملیاتی است با در نظر گرفتن $S=3$, $labor=1$, $t_s = 3$, $s=1$, $T=2$

می‌شود. ممکن است قطعات یدکی در دسترس باشند ولی نیروی انسانی بیکار موجود نباشد و به همین دلیل هزینه کاهش سود به مدل اعمال شود. پس در شرایطی که هزینه استخدام نیروی انسانی در مقابل هزینه کاهش سود ناچیز

هزینه کمبود هر واحد در واحد زمان که به‌موجب خرابی ایجاد می‌شود C_d باشد، ممکن است نگهداری بیش از n واحد موجودی قطعه یدکی در انبار اقتصادی‌تر باشد. عدم دسترس بودن دستگاه‌ها، باعث کاهش سود به‌اندازه C_d

باشد، مقرون به صرفه است که با استخدام بیشتر نیروی انسانی، ریسک از کار افتادگی کاهش پیدا کند. از این رو به منظور متعادل کردن هزینه‌های تعویض / سفارش / نگهداری و عدم در دسترس بودن دستگاه‌ها برای مینیمم کردن هزینه‌ها، مدیران نگهداری و تعمیرات و مهندسان باید مقادیر مناسب را برای T, S, s, Lp و $labor$ انتخاب کنند. وقتی نرخ هزینه مینیمم می‌شود، سیاست تعویض مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات یدکی با متغیرهای تصمیم بهینه متناظر با مینیمم نرخ هزینه، سیاست بهینه نامیده می‌شود. اگر متوسط نرخ هزینه (EC_∞) را بتوان به عنوان تابعی از $labor, T, S, s, Lp$ نشان داد، بهینه‌سازی سیاست ارائه شده می‌تواند به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شود. مانند

$$\begin{aligned} \min EC_\infty &= \min f_{EC}(T, S, s, Lp, labor) \quad (5) \\ \text{Subject to } T &= 1, 2, 3, \dots \\ S &= 1, 2, 3, \dots \\ s &< S, \text{ and } s = 0, 1, 2, \dots \\ Lp &> 0 \\ Labor &> 0 \end{aligned}$$

به دلیل پیچیدگی سیاست تعویض - سفارش، دستیابی به یک فرمول تحلیلی برای تابع $f_{EC}(T, S, s, Lp, labor)$ کار دشواری است. هر چند، متوسط هزینه هر واحد، در هر واحد زمان در مدت زمان بی‌نهایت برای سیستم در نظر گرفته شده می‌تواند به راحتی به صورت زیر نشان داده شود.

$$EC_\infty = \lim_{t_m \rightarrow \infty} \frac{C_i \cdot N_i + C_p \cdot N_p + C_c \cdot N_c + C_s \cdot N_s}{t_m \cdot n} \quad (6)$$

$$+ \frac{\sum_{K=1}^m N_d(t_k) + \sum_{K=1}^m N_h(t_k) + C_{labor} \cdot N_{labor}}{t_m \cdot n}$$

N_i مجموع تعداد بازرسی‌ها در طول زمان t_m ، N_p مجموع تعداد تعویض‌های پیشگیرانه در طول زمان t_m ، N_c مجموع تعداد تعویض‌های اصلاحی در طول زمان t_m ، N_s مجموع تعداد سفارشات قطعات یدکی در طول زمان t_m ، $N_d(t_k)$ تعداد دستگاه‌های خراب شده قبل از انجام تعویض اصلاحی در زمان t_k ، $N_h(t_k)$ تعداد قطعات یدکی موجود در انبار قبل از انجام تعویض اصلاحی یا پیشگیرانه در زمان t_k ، N_{labor} تعداد نیروی استخدام شده در طول زمان t_m .

۴- تشریح فلوجارت مدل

شکل (۲) چارچوب کلی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

برای راحتی در فهم فلوجارت شکل (۲)، هر قسمت فلوجارت شماره‌گذاری شده و در ادامه به توضیح هر قسمت پرداخته شده است..

۱- در قدم اول عوامل ابتدایی سیاست ذکر می‌شود $Lp, T, S, s, n, t_m, t_s, Ci, Cp, Ch, Cs, Cd, Cc$ فرض شده است $F_j = 0, I_j = 0, OC = 0, ICR_{j=0}, SL = S, ST_j = 0, LastOT = 0, IR_j = 0, IPR_j = 0, IN_j = 1, X_j = 0, t = 0, j = 1, 2, 3, \dots, n$

۲- در مرحله بعد تعداد دوره‌هایی که شبیه‌سازی تکرار می‌شود، تعیین می‌گردد. تعداد دوره‌هایی که شبیه‌سازی انجام می‌شود برابر با t_m است. بعد از اینکه شبیه‌سازی t_m بار انجام شد، هزینه کل محاسبه می‌شود.

۳- در این مرحله شبیه‌سازی هر دوره شروع می‌شود. برای هر دوره به صورت تصادفی زمان تدارک تولید خواهد شد.

۴- در مرحله بعد میزان فرسایش اضافه شده به هر قطعه را، که قبلاً نحوه محاسبه آن شرح داده شد، در هر دوره محاسبه می‌شود و به سطح فرسایش قبلی (X_j^{Last}) اضافه خواهد شد. توجه داشته باشید که در صورتی که تعویضی انجام شود مقدار X_j^{Last} صفر خواهد شد.

۵- بعد از این، بررسی می‌شود که آیا سفارش در راه وجود دارد.

۶- اگر سفارش در راه وجود نداشته باشد، میزان موجودی قطعات یدکی بررسی می‌شود.

۷- اگر به سطح سفارش مجدد (s) رسیده باشد، سفارشی صادر خواهد شد $(OC=1)$ و از قطعه شماره ۱ $(j=1)$ شبیه‌سازی خرابی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات شروع خواهد شد.

۸- اگر سفارش در راه وجود داشته باشد، بررسی می‌شود که آیا سفارش صادر شده رسیده است یا نه.

۹- اگر سفارش صادر شده رسیده باشد، تعداد قطعات یدکی رسیده $(NA=S-s)$ به موجودی قطعات اضافه می‌شود و شبیه‌سازی فرآیندهای خرابی و نگهداری و تعمیرات از قطعه شماره ۱ شروع می‌شود.

۱۰- در مرحله بعد شبیه‌سازی وارد سیکلی می‌شود که به تعداد دستگاه (n) تکرار می‌شود.

۱۱- در ابتدا، با توجه به سطح X_j و تابع وایبل مربوط به خرابی که مقدار X_f را به طور تصادفی در هر مرحله تعیین می‌کند، در مورد خرابی یا عدم خرابی تصمیم‌گیری می‌شود.

۱۲- در مرحله بعد در مورد انجام تعویض اصلاحی یا پیشگیرانه، تصمیم‌گیری می‌شود و هزینه انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات با توجه به شکل (۳) به دست می‌آید.

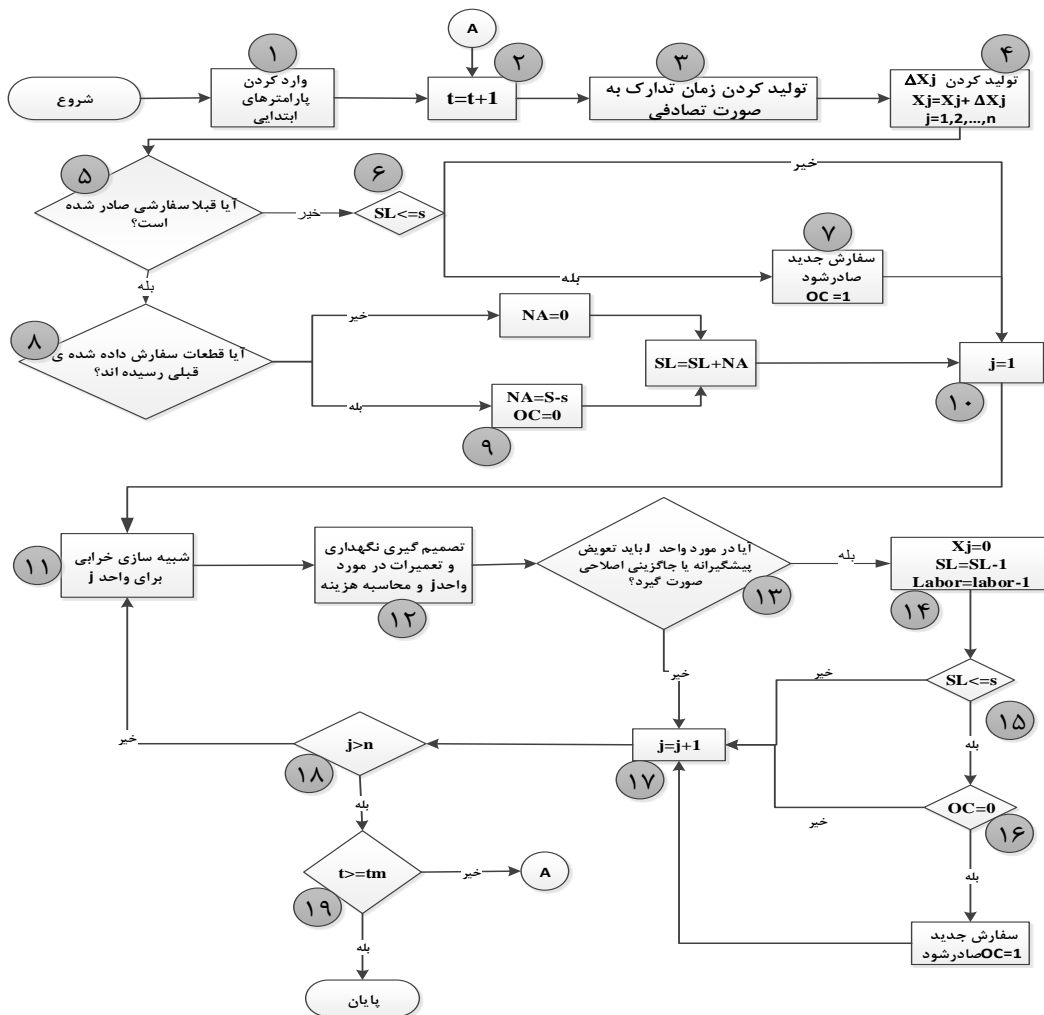
و تا tm دوره، این فرآیند تکرار می‌شود. شکل (۲) و شکل (۳) و شکل (۴) دید کلی درباره نحوه پیاده‌سازی مدل، در نرم‌افزار matlab را نشان می‌دهند. باید توجه کرد که در صورتی که شرط زیر برقرار باشد، سفارش صادر شده قبلی می‌رسد:

$$NA = \begin{cases} S-s, & \text{if } (t_k - LastOT = t_s, \text{ and, } OC=1) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

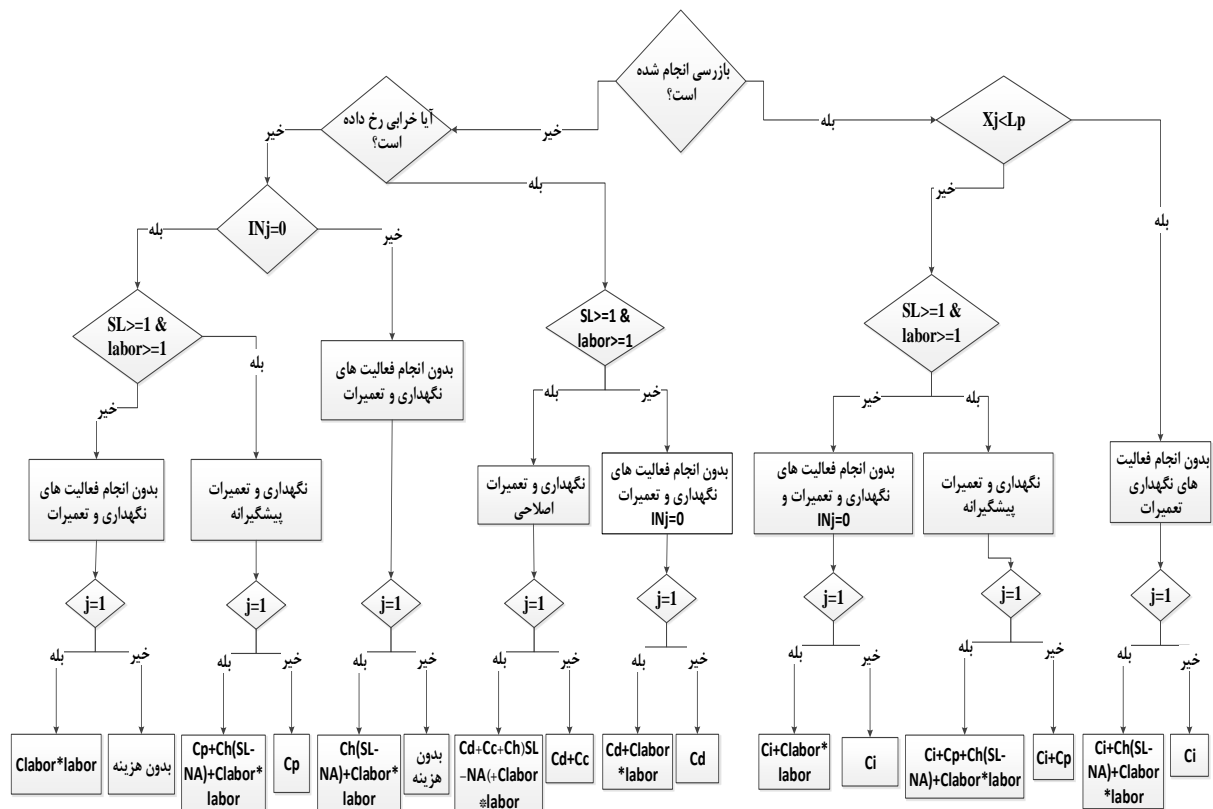
۵- تطبیق مدل کامپیوتری با سیستم طراحی شده

شبیه‌سازی مدل توضیح داده شده، با استفاده از کد نویسی در محیط Matlab، پیاده‌سازی شده است. قبل از به‌کارگیری این مدل و تلفیق آن با الگوریتم ژنتیک، که آن‌هم در Matlab کد نویسی شده است، برای اطمینان از عملکرد صحیح مدل، به متغیرهای مسئله، اعداد فرضی داده شده و چندین بار، با اعداد مختلف آزمایش گردید تا اطمینان حاصل شود که مدل پیاده‌سازی شده به خوبی عمل می‌کند. به عبارت دیگر با دادن مقادیر مختلف به متغیرهای

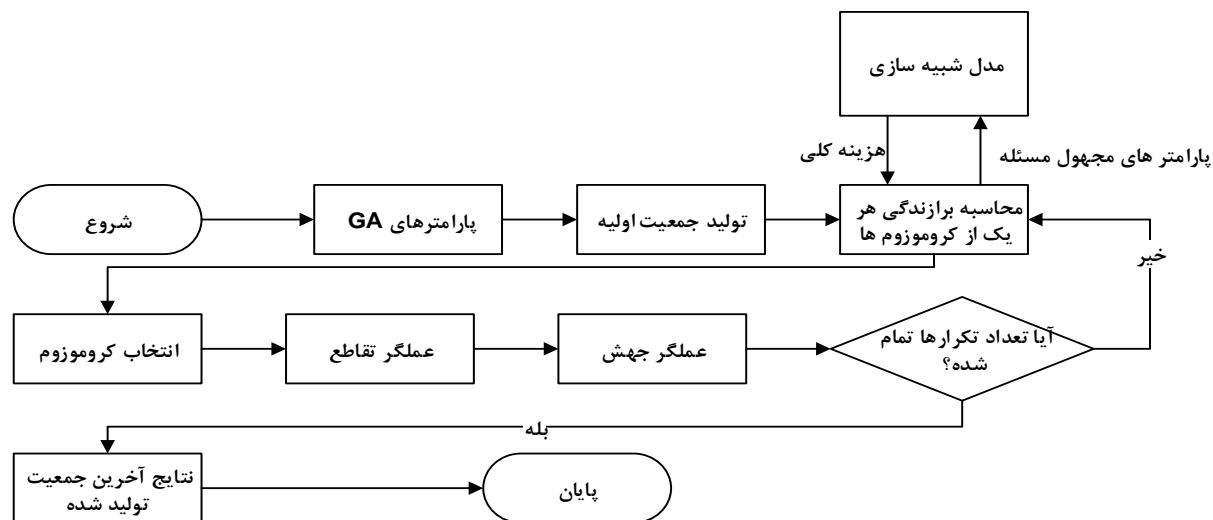
۱۳- در مرحله بعد بررسی می‌شود که آیا در مورد واحد j تعویضی انجام شده است یا نه.
 ۱۴- اگر تعویض انجام شده باشد، یک نفر از نیروی انسانی مشغول به کار می‌شود و تا دوره زمانی بعد، بیکار نمی‌شود و از تعداد قطعات بدکی، یک عدد کم می‌شود.
 ۱۵- در مرحله بعد بررسی می‌شود که آیا سطح موجودی قطعات بدکی به سطح سفارش مجدد رسیده است یا نه.
 ۱۶- اگر سطح موجودی قطعات بدکی به سطح سفارش مجدد رسیده باشد و سفارشی در راه نباشد ($OC=0$)، در نتیجه سفارشی صادر می‌شود ($OC=1$)
 ۱۷- بعد از اتمام فرآیند شبیه‌سازی برای یک دستگاه، همین فرآیند برای دستگاه‌های دیگر تکرار می‌شود. این فرآیند تا n (تعداد دستگاه‌ها) دوره ادامه می‌یابد.
 ۱۸- در این مرحله بررسی می‌شود که آیا برای این دوره زمانی همه دستگاه‌ها شبیه‌سازی شده‌اند یا خیر.
 ۱۹- در صورت اتمام فرآیند شبیه‌سازی برای همه دستگاه‌ها در این دوره زمانی، دوره زمانی بعد شروع می‌شود



شکل (۲): فلوجارت مدل کد نویسی شده در Matlab



شکل (۳): نحوه محاسبه هزینه



شکل (۴): نحوه ارتباط بین الگوریتم ژنتیک و مدل شبیه‌سازی

که در بالا توضیح داده شد، نرخ هزینه می‌تواند با تنظیم متغیرهای تصمیم $(T, S, s, Lp, labor)$ بر اساس سیاست تعویض مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات یدکی، ارزیابی شود. هدف از بهینه‌سازی این سیاست، مینیمم کردن نرخ هزینه و به دست آوردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم $(T^*, S^*, s^*, Lp^*, labor^*)$ است. از این‌رو، از یک الگوریتم ژنتیک (GA) برای به دست آوردن این مقادیر بهینه استفاده می‌شود.

مسئله $(T, S, s, Lp, labor)$ ، بعد از اجرای مدل، مشاهده شد که زمان صدور سفارش، تصمیم‌گیری در مورد انجام بازرسی‌ها، زمان رسیدن سفارش، زمان انجام بازرسی، محاسبات مربوط به هزینه و متغیرهای مختلف مدل، به خوبی عمل می‌کنند و نگرانی‌ها از لحاظ صحت عملکرد مدل، کاملاً برطرف گردیده است (شکل (۵)). در قسمت آخر، چگونگی تأثیر متغیرهای تصمیم در نرخ هزینه قرار داده می‌شود. با استفاده از کاربرد رویکرد مونت کارلو

۶- مطالعه موردی

یک نمونه از بانک آنالیز روغن در دسترس، که در طول ۹ سال در یک شرکت عمرانی جمع شده است، در جدول (۱) نشان داده شده است. حدود ۸۰۰۰ داده آنالیز روغن در بانک اطلاعاتی موجود است. این بانک اطلاعاتی مربوط به یک ناوگان ۲۶ تایی کامیون حمل مصالح می‌باشد. هر کامیون دارای دو چرخ موتور است. این پایگاه داده، سوابق مربوط به مقادیر آهن (Fe)، سرب (Pb)، سیلیکون (Si)، مس (Cu)، قلع (Sn)، تیتانیوم (Ti)، آلومینیوم (Al)، کروم (Cr)، رسوب (Sed) و چسبندگی روغن را در بردارد (جدول (۱)). تاریخ مربوط به نمونه‌گیری (Date)، عمر عملکرد (Working Age) و کد شناسایی (Ident) چرخ موتورهای بازرسی شده، در پایگاه داده ثبت شده است. علاوه بر این، اطلاعات مربوط به نوع رویداد رخ داده شده که نقشه کلیدی در تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از آنالیز روغن دارند؛ ثبت شده است. هر سیکل زمانی باید با یک رویداد شروع (B) و با یک رویداد پایان (EF) برای حالت خرابی یا ES برای Censored (به معنی تعویض پیشگیرانه) نشان داده شود. هر یک از مقادیر ثبت شده عناصر در یک زمان مشخص رخ می‌دهد، که آن را عمر عملکردی دستگاه می‌نامند. در نظر داشته باشید که مقدار رسوب و دیگر عناصر بعد از تعویض روغن (OC)²، صفر می‌شود. خرابی‌هایی که ناشی از عوامل الکتریکی و شکستگی سیستم باشد، در این مقاله در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا وضعیت آن‌ها با استفاده از داده‌های بازرسی روغن، منعکس نمی‌گردد.

قبل از استفاده از داده‌های آنالیز روغن باید فرآیندهای پاک‌سازی داده، بر روی آن‌ها انجام شود. پاک‌سازی داده‌ها، باعث حذف یا اصلاح داده‌های نامتعارف می‌شود. هرچقدر که بانک اطلاعاتی ما، خالی از داده‌های نامتعارف باشد، مدل استخراج شده از این داده‌ها، منعکس کننده وضعیت واقعی بهتری از سیستم است و دارای خطای کمتری می‌باشد. همچنین همبستگی‌ها و روندها، که در درک مدل به ما کمک می‌کنند، بهتر نشان داده می‌شوند [۳۳]. در این مطالعه از نرم‌افزار EXACT برای انجام این کار استفاده شده است. تعیین همبستگی بین متغیرها امکان درک بهتر داده‌ها و فهم مدل تولید شده به وسیله نرم‌افزار را فراهم می‌کند. برای مثال، اگر آهن و نیکل دارای همبستگی زیادی باشند،

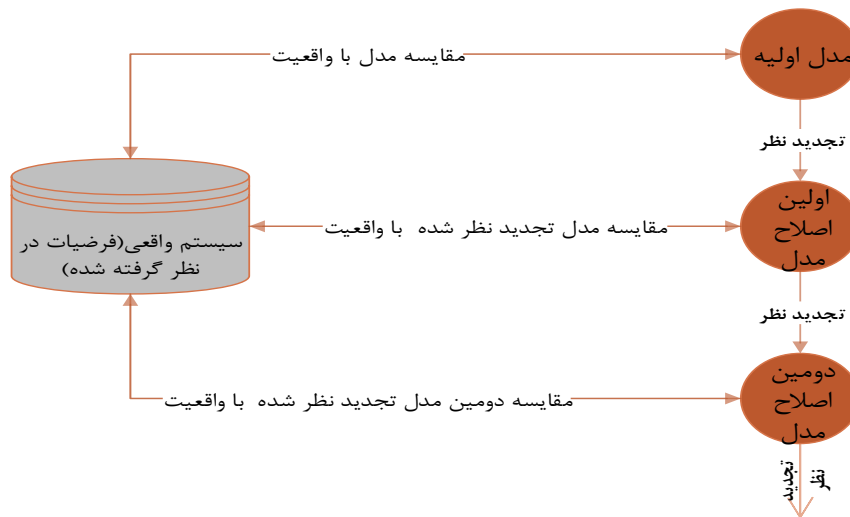
فرآیند مدل‌سازی شامل نیکل نمی‌شود زیرا اطلاعات اضافی در مورد احتمال خرابی را منعکس نمی‌کند. پس با رسم گراف همبستگی بین عناصر گوناگون، می‌توان متغیرهایی را که وضعیت زوال را بهتر منعکس می‌کنند، یافت. برای مثال در شکل (۶ و ۷) نمونه‌ای از همبستگی بین آهن و رسوب، آهن و سیلیکون مشاهده می‌شود. با توجه به شکل و جدول آنالیز همبستگی بین عناصر، مشاهده می‌شود که همبستگی بین آهن و سیلیکون زیاد و بین آهن و رسوب کم است. با بررسی همبستگی‌های مختلف بین عناصر، نتیجه گرفته می‌شود که مقادیر آهن و رسوب، بهترین عناصر برای نشان دادن وضعیت زوال دستگاه می‌باشند. این همبستگی‌ها ناشی از فرسایش اجزاء آلیاژ فلزی به کار رفته در واحدهاست.

۱-۶- ارزیابی متغیرهای زوال واحدها

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد و بنا به روابط همبستگی بین عناصر مختلف، آهن و رسوب به عنوان معیارهای زوال در نظر گرفته شده، در این قسمت به بررسی دو فرآیند مختلف از مقادیر انباشته شده آهن و رسوب، که به ترتیب Y_t و Z_t در نظر گرفته شده‌اند، در طول زمان خدمت‌دهی موتورها، پرداخته می‌شود. بر اساس تحلیل‌هایی که وایسمن^۳ ارائه داده، رفتار Y_t و Z_t از فرآیند مارکوف پیروی می‌کنند [۳۳]. از این رو، یک ترکیب خطی از Y_t و Z_t می‌کند و W_y و W_z مقادیر ثابتی هستند که ضریب اهمیت هر یک از عناصر را نشان می‌دهند. عدد تصادفی X_t برای توصیف کردن سطح زوال موتور در زمان بازرسی T مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعداد نمونه‌های موجود افزایش مقادیر در واحد زمان، برای آهن و رسوب تقریباً ۸۰۰۰ نمونه است. میانگین افزایش آهن و رسوب در واحد زمان به ترتیب ۹۳٫۱ و ۶۳۷٫۰۲ می‌باشد. با فرض اینکه آهن و رسوب تأثیر یکسانی در نرخ زوال (X_t) دارند، مقادیر ثابت W_y و W_z به دست می‌آیند. از این رو، اگر $W_z = 1$ باشد، سپس $W_y = \frac{637.02}{93.1} = 6.84$ حاصل می‌شود.

1- WorkingAge
2- Oil Change

3- Wiseman

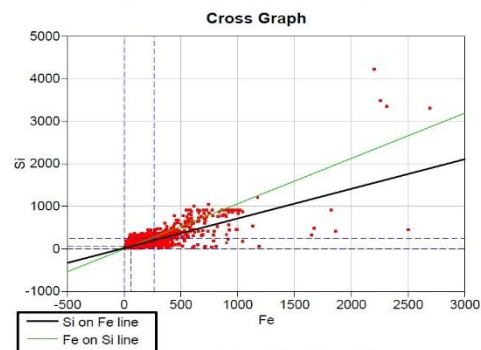


شکل (۵): فرآیند تکرارپذیر تطبیق مدل کامپیوتری با سیستم طراحی شده

جدول (۱): نمونه ای از بانک اطلاعاتی در دسترس

Sed	Visc100	Visc40	Sn	Si	Pb	Ti	Ni	Fe	Cu	Cr	Al	Event	Working Age	Date	Ident
0	30/81	276	0	25	0	0	0	44	1	0	9	*	74402	1/21/1999	5501L
2595	32/28	271	1	25	0	0	1	43	1	0	10	*	74629	3/8/1999	5501L
220	33/08	285	0	29	0	1	1	43	1	0	9	*	74891	4/6/1999	5501L
890	33/29	282	0	37	0	1	1	59	2	1	12	*	75201	6/21/1999	5501L
100	37	338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	OC	75344/75	6/30/1999	5501L
795	36/35	325	0	21	0	0	1	48	1	1	6	*ES	75640	9/13/1999	5501L
100	37	338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B	21474	1/1/1990	5501R
1525	28/82	442	0	44	99	1	0	50	2	0	10	*	35125	1/9/1990	5501R
345	28/11	425	0	82	186	0	0	100	3	0	19	*	35428	2/4/1990	5501R
100	37	338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	OC	35428	2/4/1990	5501R
1190	27/72	416	1	111	121	1	0	170	3	0	28	*	35698	2/28/1990	5501R

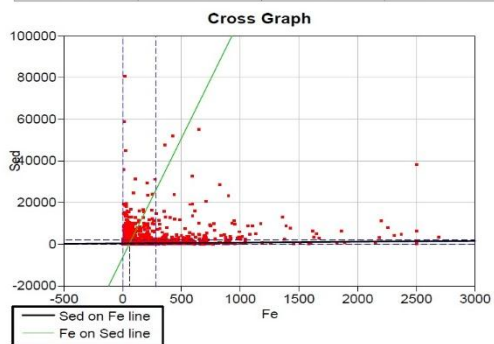
Sample Size: 7905			
Included	Excluded	Missing	% Included
7880	25	0	99.68



Summary of Correlation Analysis					
Variable	Mean	Std. Dev.	Regression Line	Correlation Coefficient	Coefficient of Determination
Fe	57.2384	49.9074	8.13+0.939*Si	0.8087	65.41%
Si	52.3009	42.9856	12.43+0.6966*Fe	0.8087	65.41%

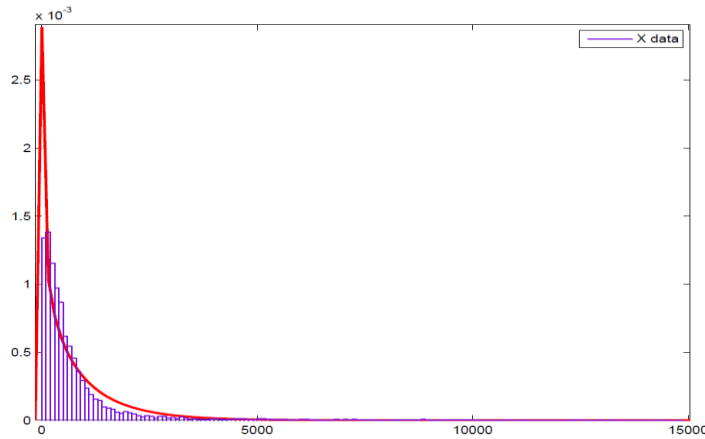
شکل (۶): گراف همبستگی بین آهن و سیلیکون

Sample Size: 7905			
Included	Excluded	Missing	% Included
7846	0	59	99.25



Summary of Correlation Analysis					
Variable	Mean	Std. Dev.	Regression Line	Correlation Coefficient	Coefficient of Determination
Fe	58.6846	52.4755	55.23+0.008746*Sed	0.05934	0.3521%
Sed	395.346	356.036	371.7+0.4026*Fe	0.05934	0.3521%

شکل (۷): گراف همبستگی بین آهن و رسوب



شکل (۸): انطباق توزیع گاما بر هیستوگرام مقادیر افزایش X_t

$\eta = 53968.69$ و $\beta = 1.52$ است.

۷- تحلیل نتایج

در ابتدا، بهینه‌سازی فواصل بازرسی در نظر گرفته نمی‌شود و فرض می‌شود که تعداد قطعات یدکی در دسترس برای موتور نامحدود است و محدودیتی در مورد تعداد نیروی انسانی وجود ندارد، یعنی $s < S, S = \infty, T = 1$ و $labor = \infty$. از این رو فقط تصمیم‌گیری در مورد L_p باقی می‌ماند. چارچوب بهینه‌سازی ارائه شده، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای متغیرهای هزینه، حل می‌شود. تنها هزینه‌ای که برآورد تقریباً دقیقی می‌توان از آن کرد، هزینه تعویض پیشگیرانه است. پس در ابتدا برای نشان دادن کارایی مدل، هزینه تعویض پیشگیرانه را ثابت و برای هزینه تعویض اصلاحی چند مقدار در نظر گرفته می‌شود و با توجه به آن، از مدل شبیه‌سازی و الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مقدار بهینه L_p که مقدار هزینه کل را مینیمم می‌کند، استفاده می‌شود (هزینه تعویض پیشگیرانه C_p ثابت و برابر ۲۰۰۰۰ دلار، هزینه تعویض اصلاحی از ۴۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ دلار متغیر است و هزینه‌های دیگر C_d, C_i, C_s ، C_l و C_h در نظر گرفته نمی‌شوند). هزینه مینیمم به دست آمده توسط چارچوب بهینه‌سازی ارائه شده را با هزینه واقعی که به کارگاه تحمیل می‌شود، مقایسه می‌شود. مینیمم نرخ هزینه، EC_{min} ، بر اساس سیاست پیشنهاد شده، با افزایش CC ، افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده از انجام شبیه‌سازی که در جدول (۲) آورده شده است، مینیمم نرخ هزینه، EC_{min} ، بر اساس سیاست پیشنهاد شده در CC های مختلف در مقایسه با سیاست نگهداری و تعمیرات موجود، کمتر است. همچنین می‌توان

توزیع افزایش X_t ، $g_x(X)$ ، از داده‌های بازرسی روغن به دست می‌آید. اغلب توزیع گاما برای مشخص کردن فرآیندهای فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس هیستوگرام ΔX_k نشان داده شده در شکل (۸) و با منطبق کردن تابع چگالی احتمال توزیع گاما بر این هیستوگرام، می‌توان به این نتیجه رسید که توزیع گاما توزیع مناسبی برای نشان دادن فرآیند فرسایش است (شکل (۸)).

با استفاده از روش تخمین ماکزیمم Likelihood (MLE) و با به کارگیری نرم‌افزار Matlab، متغیرهای شکل و مقیاس توزیع گامای ΔX_k به دست می‌آیند: $a = 0.74$ و $b = 1129.9$.

در نظر داشته باشید که در یک چرخه عمر موتور، مقدار X_t درست قبل از تعویض روغن و تعویض‌های به دلیل خرابی یا تعویض پیشگیرانه باهم جمع می‌شوند. این جمع کردن، تخمین سطح X_t را در زمان انجام تعویض اصلاحی / پیشگیرانه دقیق‌تر می‌کند. پس از تعیین مقدار سطح X_t برای ۹۳ سیکل کامل و ۴۶ سیکل با تعویض پیشگیرانه (Censored) بر اساس $X_t = W_y Y_t + W_z Z_t$ ، از تابع توزیع وایبل برای مشخص کردن توزیع مربوط به $F_X(X)$ استفاده شده است. تابع چگالی احتمال توزیع وایبل به صورت زیر می‌باشد:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (۸)$$

که η متغیر مقیاس و β متغیر شکل می‌باشند. با به کارگیری نرم‌افزار ReliaSoft و با استفاده از روش MLE، متغیر شکل و مقیاس مربوط به توزیع وایبل که توصیف‌کننده سطح زوال تا خرابی، X_t ، می‌باشد، به دست می‌آیند. متغیر تخمین زده شده توزیع وایبل در این حالت برابر با:

مشاهده کرد که سرحد بهینه تعویض پیشگیرانه برای سطح زوال x, Lp^* ، با افزایش هزینه تعویض اصلاحی، کاهش پیدا می‌کند. پس می‌توان گفت، به‌منظور خودداری از خرابی‌های هزینه زا، سیاست محافظه‌کارانه‌تری موردنیاز است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، با افزایش هزینه تعویض اصلاحی، درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها افزایش می‌یابد.

۷-۱- تعیین اعتبار مدل

به‌منظور تعیین اعتبار مدل می‌توان از تحلیل حساسیت استفاده کرد. در این مورد بررسی می‌شود که آیا در صورت تغییر یک یا چند متغیر ورودی، مدل عملکرد مورد انتظار را نشان می‌دهد یا نه [۳۴].

یکی دیگر از دلایل استفاده از تحلیل حساسیت این است که در عمل شناسایی مقدار متغیرهای هزینه، به‌خوبی ممکن نیست. بنابراین نیاز است که بر متغیرهای هزینه، تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شود تا به حساسیت جواب نهایی نسبت به هر یک از هزینه‌ها، پی برده شود. این کار باعث می‌شود هزینه‌های مهم شناسایی شوند و در تخمین آن‌ها دقت بیشتری

به‌کاربرده شود. جدول (۳) تا جدول (۷)، تجزیه و تحلیل حساسیت جواب بهینه را نسبت به $Cs, Ci, Cd, Ch, C_{labor}$ نشان می‌دهد. برای مثال؛ به توضیح جدول (۳) پرداخته خواهد شد. در صورتی که مقدار دقیق Cs مشخص شده باشد (ستون اول)، EC_{min} ، مینیمم نرخ هزینه می‌باشد. زمانی که مقدار واقعی Cs مقادیر نشان داده‌شده در ستون اول باشد، اما تصمیم‌گیرنده $Cs=10000$ در نظر بگیرد و متغیرهای تصمیم بهینه متناظر با $Cs=10000$ را مورد استفاده قرار دهد؛ حاصل $EC_{\infty} u \sin g^*$ بر اساس چارچوب پیشنهادشده، حاصل می‌شود. متغیرهای تصمیم متناظر با $Cs=10000$ موقعی که Cs برابر ۵۰۰۰ یا مقادیر دیگر است، بهینه نیستند. در نتیجه، ممکن است در EC_{min} افزایش هزینه رخ دهد، که در ستون آخر جدول (۳) نشان داده‌شده است. در نظر داشته باشید که هزینه‌های به‌دست‌آمده در جداول زیر، بر اساس هزینه‌های ۵۲ دستگاه در یک دوره زمانی است و از مجموع هزینه‌ها، تقسیم‌بر تعداد دوره‌هایی که شبیه‌سازی انجام می‌شود، به دست می‌آید.

جدول (۲): مقایسه بین سیاست موجود و سیاست $(T, S, s, Lp, labor)$ با در نظر گرفتن $T=1, S=\infty, s=\infty, labor = \infty$

$Cp=20000, Ci=0, Ch=0, Cd=0, Cs=0, C_{labor} = 0$

درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها	هزینه واقعی	هزینه شبیه‌سازی	Lp	Cc
۲۰٪	۵۹۵	۵۸۳	۶۵۰۷۶۸	۴۰۰۰۰
۳۰٪	۸۳۳	۸۰۲	۴۹۳۰۸	۶۰۰۰۰
۴۰٪	۱۰۷۲	۱۰۲۴	۳۰۶۶۶	۸۰۰۰۰
۶۰٪	۱۳۱۰	۱۲۲۱	۲۴۶۶۷	۱۰۰۰۰۰
۶۸٪	۱۵۴۹	۱۴۴۳	۲۰۶۶۵	۱۲۰۰۰۰
۸۰٪	۱۷۸۷	۱۶۴۲	۱۸۴۵۴	۱۴۰۰۰۰
۹۰٪	۲۰۲۶	۱۸۳۵	۱۵۳۸۷	۱۶۰۰۰۰
۱۰۰٪	۲۲۶۴	۲۰۲۴	۱۱۸۶۷	۱۸۰۰۰۰
۱۲۰٪	۲۵۰۳	۲۱۹۷	۹۰۶۷	۲۰۰۰۰۰

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی سیاست $(T, S, s, Lp, labor)$ با در نظر گرفتن؛ $Cp=20000, Cd=600000, Ch=100, Ci=50$

$C_{labor} = 1000, n=52$

افزایش	$EC_{\infty} u \sin g^*$	EC_{min}	labor	Lp^*	s^*	S^*	T^*	Cs
۰.۰۲٪	۵۳۷۲۵۰	۵۳۷۱۵۵	۴	۱۳۵۷۷	۱۱	۲۴	۲	۵۰۰۰
۰.۰٪	۰	۵۳۷۹۰۰	۴	۱۳۵۸۰	۸	۲۸	۲	۱۰۰۰۰**
۰.۰۱٪	۵۳۸۵۵۰	۵۳۸۴۷۲	۴	۱۳۵۷۶	۵	۳۴	۲	۱۵۰۰۰
۰.۰۴٪	۵۳۹۲۰۰	۵۳۸۹۷۰	۴	۱۳۵۷۳	۲	۳۷	۲	۲۰۰۰۰
۰.۱۱٪	۵۳۹۸۵۰	۵۳۹۲۴۲	۴	۱۲۵۷۶	۲	۳۹	۲	۲۵۰۰۰

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی سیاست (T,S,s,Lp,labor) با در نظر گرفتن؛ $C_p=20000, C_d=600000, C_h=100, C_{labor} = 1000, C_s=10000, n=52$

افزایش	$EC_{\infty} u \sin g^{**}$	EC_{min}	labor	Lp^*	s^*	S^*	T^*	Ci
۰.۰%	۵۳۷۹۰۰	۵۳۷۹۰۰	۴	۱۳۵۸۰	۸	۲۸	۲	۵۰**
۰.۰۶%	۵۳۹۱۷۶	۵۳۸۸۵۷	۴	۱۳۵۸۰	۴	۳۲	۲	۱۰۰
۰.۰۲%	۵۴۰۴۵۱	۵۴۰۳۵۳	۴	۱۳۵۸۱	۴	۳۵	۲	۱۵۰
۰.۱۳%	۵۴۱۷۲۷	۵۴۱۰۱۵	۴	۱۳۵۸۰	۴	۳۷	۲	۲۰۰
۰.۲۶%	۵۴۳۰۰۳	۵۴۱۵۶۶	۴	۱۳۵۲۸	۲	۱۳	۱	۲۵۰

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی سیاست (T,S,s,Lp,labor) با در نظر گرفتن؛ $C_p=20000, C_h=100, C_i=50, C_{labor} = 1000, C_s=10000, n=52$

افزایش	$EC_{\infty} u \sin g^{**}$	EC_{min}	labor	Lp^*	s^*	S^*	T^*	Cd
۹.۹۶%	۳۹۵۵۸۹	۳۵۶۱۸۹	۲	۳۱۲۵۸	۶	۱۷	۱۹	۲۰۰۰۰۰
۰.۴۲%	۴۶۶۹۰۰	۴۶۴۹۵۰	۴	۱۳۵۷۷	۵	۲۰	۲	۴۰۰۰۰۰
۰.۰%	۵۳۷۹۰۰	۵۳۷۹۰۰	۴	۱۳۵۸۰	۸	۲۸	۲	۶۰۰۰۰۰**
۴.۰۴%	۶۰۸۹۰۰	۵۸۴۳۱۱	۴	۱۳۵۸۰	۲	۲۸	۲	۸۰۰۰۰۰
۴.۲۱%	۶۷۹۸۹۹	۶۵۱۲۴۲	۴	۱۳۵۷۶	۱	۸۸	۲	۱۰۰۰۰۰۰

جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی سیاست (T,S,s,Lp,labor) با در نظر گرفتن؛ $C_p=20000, C_d=600000, C_i=50, C_{labor} = 1000, C_s=10000, n=52$

افزایش	$EC_{\infty} u \sin g^{**}$	EC_{min}	labor	Lp^*	s^*	S^*	T^*	Ch
۱.۰۳%	۵۳۲۸۵۷	۵۲۷۳۸۹	۴	۱۲۲۲۹	۱۲	۳۸	۱	۵۰
۰.۹۹%	۵۳۴۵۳۸	۵۲۹۲۵۷	۴	۱۲۲۳۰	۱۰	۳۵	۱	۱۰۰**
۰.۰%	۵۳۷۹۰۰	۵۳۷۹۰۰	۴	۱۳۵۸۰	۸	۲۸	۲	۱۵۰
۰.۲۲%	۵۴۱۲۶۲	۵۴۰۰۶۲	۴	۱۳۵۸۱	۶	۲۶	۲	۲۰۰
۰.۵۶%	۵۴۴۶۲۴	۵۴۱۵۵۴	۴	۱۳۵۷۵	۶	۲۳	۲	۲۵۰

جدول (۷): نتایج بهینه‌سازی سیاست (T,S,s,Lp,labor) با در نظر گرفتن؛ $C_p=20000, C_d=600000, C_h=100, C_i=50, C_s=10000, n=52$

افزایش	$EC_{\infty} u \sin g^{**}$	EC_{min}	labor*	Lp^*	s^*	S^*	T^*	C_{labor}
۰.۴۵%	۴۳۳۹۰۰	۴۳۱۹۵۶	۴	۱۳۵۸۱	۳	۲۵	۲	۵۰۰
۰.۰%	۵۳۷۹۰۰	۵۳۷۹۰۰	۴	۱۳۵۸۰	۸	۲۸	۲	۱۰۰۰**
۲.۴۳%	۶۴۱۸۹۹	۶۲۶۳۲۴	۴	۱۳۵۲۸	۰	۵۶	۱	۱۵۰۰
۴.۲۵%	۷۴۵۹۰۰	۷۱۴۱۸۹	۲	۳۱۱۰۴	۱	۱۲	۱۹	۲۰۰۰
۹.۷۷%	۸۴۹۹۰۰	۷۶۶۸۲۳	۲	۳۱۱۰۰	۱	۱۵	۱۹	۲۵۰۰

گرفته‌شده برای تأثیرگذاری C_s, C_{labor}, C_i, C_d و Ch بر سیاست بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:
 ۱. تأثیر هزینه سفارش (C_s). بر اساس جدول (۳)، S^* با افزایش C_s افزایش پیدا می‌کند، در حالی که s^* کاهش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش مقدار حداکثر موجودی و کاهش حداقل موجودی، فاصله بین صدور سفارشات افزایش پیدا می‌کند.

با استفاده از جدول (۳) تا جدول (۷)، می‌توان دریافت که ساختار هزینه پیشنهاد شده نسبت به C_d و همچنین C_{labor} حساسیت زیادی دارد و EC_{min} به تغییر مقادیر C_i, C_s و Ch حساسیت زیادی ندارد؛ پس در تعیین C_d و C_{labor} باید دقت فراوانی شود و تا جایی که ممکن است عوامل مختلف تأثیرگذار بر این هزینه‌ها در نظر گرفته شوند. ساختار در نظر

در نتیجه تعداد صدور سفارشات کاهش می‌یابد و این همان نتیجه‌ای است که با افزایش هزینه سفارش دهی، انتظار می‌رود.

۲. تأثیر هزینه بازرسی (Ci). در جدول (۴)، به نظر می‌رسد متغیرهای تصمیم بهینه، به افزایش Ci حساسیت ندارند. موقعی که Ci افزایش می‌یابد نمی‌توان روندی مشاهده کرد. یکی از دلایل این امر می‌تواند به این علت باشد که در ساختار هزینه در نظر گرفته شده Ci مقدار بسیار کمتری نسبت به Cp/Cc/Cs/Cd دارد.

۳. تأثیر هزینه کمبود هر واحد، در واحد زمان که به دلیل خرابی واحدها اتفاق می‌افتد یا سود از دست‌رفته (Cd). بر اساس جدول (۵)، در یک‌فاصله خاص (تغییر هزینه از ۲۰۰۰۰۰ به ۴۰۰۰۰۰) T^* زمانی که Cd بزرگ‌تر می‌شود، کاهش پیدا می‌کند و واحدهای یدکی بیشتری باید ذخیره شود. با توجه به این موضوع که، Lp^* موقعی که Cd افزایش می‌یابد، کاهش پیدا می‌کند، می‌توان دریافت زمانی که هزینه توقف به دلیل کمبود زیاد می‌شود، باید سیاست محافظه‌کارانه‌تری اتخاذ گردد. همچنین با افزایش Cd، $labor^*$ افزایش پیدا می‌کند، تا احتمال توقف به دلیل کمبود نیروی انسانی را به حداقل برساند. در نظر داشته باشید که تغییرات بالا در یک‌فاصله خاص رخ می‌دهد و از ۴۰۰۰۰۰ به بعد به جز در میزان موجودی، در بقیه متغیرها تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود. این امر به این دلیل است که بعد از ۴۰۰۰۰۰، تغییر کوچکی در فواصل بازرسی یا نیروی انسانی باعث بروز هزینه‌های زیادی می‌شود و مدل فقط با افزایش سطح موجودی، سعی در کاهش هزینه بهینه دارد.

۴. تأثیر هزینه نگهداری (Ch). بر اساس نتایج جدول (۶)، افزایش Ch باعث کاهش ذخیره واحدهای یدکی در انبار می‌شود.

۵. تأثیر هزینه نیروی انسانی (C_{labor}): بر اساس نتایج جدول (۷)، با افزایش مقدار C_{labor} ، مینیمم هزینه افزایش می‌یابد. همچنین $labor^*$ ، در زمانی که هزینه نیروی انسانی زیاد است، کاهش پیدا می‌کند. نتایج بالا حاصل از آنالیز حساسیت بر اساس تمرکز بر ساختار هزینه است. در عمل، ممکن است به علت تفاوت در عوامل هزینه، نتایج متفاوتی ارائه شود.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیاست بهینه‌سازی ترکیبی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت و تأمین قطعات یدکی، تحت سیاست موجود (S,S)، برای یک سیستم تحت زوال ارائه شد. برای ارزیابی عملکرد سیاست ارائه‌شده، یک مدل

شبیه‌سازی مونت کارلو توسعه داده شده است و تمام جزئیات مربوط به فرضیات توصیف شدند. از این رو، می‌توان برنامه‌ریزی بازرسی‌های دوره‌ای، فعالیت‌های مربوط به تأمین قطعات یدکی و تصمیم‌های مربوط به تعویض واحدها در چارچوب نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت را به صورت ترکیبی بهینه کرد. از سوی دیگر، مشاهده شده که سطوح زوال قطعات در خرابی‌های متفاوت باهم فرق دارد. در نتیجه، قابلیت اطمینان مبتنی بر وضعیت ارائه‌شده در مقایسه با قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان، می‌تواند ارتباط بین سطح زوال مداوم و خرابی تصادفی را بهتر نشان دهد. در مطالعه موردی با بهره‌گیری از بانک اطلاعاتی آنالیز روغن مربوط به یک ناوگان کامیون حمل‌ونقل، نشان داده شده است که سیاست ارائه‌شده، با توجه به نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش قبل، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های شرکت خواهد شد. پس به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که فعالیت‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات و تأمین قطعات یدکی، به صورت ترکیبی بهینه شوند، در هزینه‌های شرکت صرفه‌جویی ایجاد خواهد شد.

۹- پیشنهادات و تحقیقات آینده

تاکنون در بهینه‌سازی ترکیبی سیاست موجودی و نگهداری و تعمیرات، کهنگی و اسقاط قطعات یدکی در نظر گرفته نشده است. این مقوله تأثیر زیادی بر هزینه‌های موجودی می‌گذارد. فرض اسقاط قطعات یدکی در سیاست بهینه‌سازی ترکیبی، می‌تواند بسیار مفید باشد و مدل را به واقعیت نزدیک کند.

شبکه‌های چند مرتبه‌ای، در صنایع مختلف رایج هستند. تنها چن^۱ و همکاران از زنجیره تأمین چند مرتبه‌ای در مقاله خود استفاده کرده‌اند [۳۵]. در نظر گرفتن روابط متقابل بین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی (مانند نگهداری و تعمیرات و موجودی) و مسیریابی (مانند تعمیرکاران سیار) می‌تواند بسیار جالب باشد. علاوه بر این، امکان برون‌سپاری و ادغام موجودی نیز وجود دارد، که تا حالا تحقیقی در مورد استفاده از آن در مدل بهینه‌سازی ترکیبی انجام نشده است.

منابع

- [1] A. Kabir and S. Farrash, "Simulation of an integrated age replacement and spare provisioning policy using SLAM", *Reliability Engineering and System Safety* 52(2), p. 129-138, 1996.
- [2] H. Pham and H. Wang, "Imperfect maintenance", *European Journal of Operational Research* 14, p.

1- Chen

- deteriorating systems*", *Reliability Engineering and System Safety* 76, p. 167–180, 2002.
- [20] B. Castanier, A. Grall and C. Bérenguer, "A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system", *Reliability Engineering and System Safety* 87, p. 109–120, 2005.
- [21] H. Liao, E. Elsayed and L. Chan, "Maintenance of continuously monitored degrading systems", *European Journal of Operational Research* 175(2), p. 821–835, 2006.
- [22] A. Jardine, D. Banjevic, M. Wiseman, S. Buck and T. Joseph, "Optimizing a mine haul truck wheel motors' condition monitoring program: Use of proportional hazards modeling", p. 286–301, 2001.
- [23] W. Kennedy, J. Wayne Patterson and L. Fredendall, "An over view of recent literature on spare parts inventories", *International Journal of Production Economics* 76(2), p. 201–215, 2002.
- [24] R. Sarker and A. Haque, "Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation", *Applied Mathematical Modelling* 24(10), p. 751–760, 2000.
- [25] N. Kumar Samal and D. Kumar Pratihari, "Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory using genetic algorithms and particle swarm optimization algorithm", *International Journal of Production Economics*, p. 201–215, 2014.
- [26] S. Panagiotidou, "Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures", *European Journal of Operational Research*, p. 300–314, 2013.
- [27] M. Ali Ilgin and S. Tunali, "Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms", *The International Journal of Advanced Manufacturing*, p. 594–604, 2007.
- [28] W. Kolarik, "Performance reliability", Department of Industrial Engineering, Texas Tech University, 1988.
- [29] H. Lu, W. Kolarik and S. Lu, "Real-time performance reliability prediction", *IEEE Transaction on Reliability* 50, p. 353–357, 2001a.
- [30] A. Cohen, "Truncated and Censored Samples: Theory and Applications", New York: Marcel Dekker, 1992.
- [31] J. Lawless, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", Beijing (in Chinese): China Statistics Press, 1998.
- [32] A. Kabir and A. Al-Olayan, "Joint optimization of age replacement and continuous review spare provisioning policy", *International Journal of Operations and Production Management* 14(7), p. 53–69, 1994.
- [33] M. Wiseman, "Optimizing condition based maintenance", *Plant Engineering and Maintenance* 23, pp. 57-71, 2001.
- [34] ج. بنکس و ک. جان، "شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته-پیشامد"، ترجمه محلوجی. هاشم، تهران: مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۸.
- [35] M. Wiseman, "Optimizing condition based maintenance", *Plant Engineering and Maintenance* 23, pp. 57-71, 2001.
- 425–438, 1996.
- [3] H. Wang, "A survey of maintenance policies of deteriorating systems", *European Journal of Operational Research* 139, p. 469–489, 2002.
- [4] M. Ben-Daya, S. Duffuaa and A. Raouf, "Maintenance, Modeling and Optimization", *Kluwer Academic*, 2000.
- [5] B. Castanier, A. Grall and C. Bérenguer, "A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system", *Reliability Engineering and System Safety* 87, p. 109–120, 2005.
- [6] L. Dieulle, C. Bérenguer and A. Grall, "Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system", *European Journal of Operational Research* 150, p. 451–461, 2003.
- [7] S. Amari and L. McLaughlin, "Optimal design of a condition-based maintenance model", In: *Reliability and Maintainability, Annual Symposium*, 2004.
- [8] C. Chen, Y. Chen and J. Yuan, "On a dynamic preventive maintenance policy for a system under inspection", *Reliability Engineering and System Safety* 80, p. 41–47, 2003.
- [9] M. Moustafa, E. Maksoud and S. Sadek, "Optimal major and minimal maintenance policies for deteriorating systems", *Reliability Engineering and System Safety* 83, p. 363–368, 2004.
- [10] W. Wang, "Modelling condition monitoring intervals: A hybrid of simulation and analytical approaches", *Journal of the Operational Research Society* 54, p. 273–282, 2003.
- [11] T. Dohi, N. Kaio and S. Osaki, "On the optimal ordering policies in maintenance theory: Survey and applications", *Applied Stochastic Models and Data Analysis* 14, p. 309–321, 1998.
- [12] S. Sheu and W. Griffith, "Optimal age-replacement policy with age-dependent minimal-repair and random-leadtime", *IEEE Transaction on Reliability* 50, p. 302–309, 2001.
- [13] S. Sheu and Y. Chien, "Optimal age-replacement policy of a system subject to shocks with random lead-time", *European Journal of Operational Research* 159, p. 132–144, 2004.
- [14] A. Brezavc̃ek and A. Hudoklin, "Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy", *IEEE Transaction on Reliability* 52, p. 112–117, 2003.
- [15] A. Chelbi and D. Ait-Kadi, "Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure", *International Journal of Production Economics* 74, p. 183–189, 2001.
- [16] M. Marseguerra, E. Zio and L. Podofillini, "Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation", *Reliability Engineering and System Safety* 87, p. 325–335, 2005.
- [17] A. Kabir and A. Al-Olayan, "A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement", *European Journal of Operational Research* 90, p. 171–181, 1996.
- [18] H. Kawai, "An optimal ordering and replacement policy of a Markovian degradation system under complete observation", *Journal of the Operational Research Society Japan* 26, p. 279–292, 1983.
- [19] A. Grall, C. Bérenguer and L. Dieulle, "A condition-based maintenance policy for stochastically