

بهینه‌سازی توالی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای یک سیستم چند مؤلفه‌ی تعمیر پذیر با ساختار سری

محمود حاتمی* (کارشناس ارشد)

محمود شهرخی (استادیار)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

مرتضی پوراسماعیلی (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تفرش

حمید موکدی (دانشجوی دکتری)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، تابستان ۱۳۹۶ (دوره ۱-۳۳، شماره ۱/۱، ص. ۵۵-۶۳)

در این مقاله، مدلی برای بهینه‌سازی توالی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه برای یک سیستم چند مؤلفه‌ی تعمیر پذیر با ساختار سری ارائه شده است. نرخ خرابی مؤلفه‌های سیستم افزایشی است. فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات (نت) پیشگیرانه شامل انجام سرویس مکانیکی، تعمیر یا تعویض مؤلفه‌هاست. عدم انجام فعالیت نت پیشگیرانه نیز به عنوان یک گزینه در نظر گرفته شده است. فعالیت‌های نت پیشگیرانه در فواصل زمانی یا دوره‌های ثابت انجام می‌شود. در صورت توقف ناگهانی سیستم قبل از رسیدن به انتهای دوره، نت اصلاحی انجام خواهد شد. هدف، تعیین فعالیت نت پیشگیرانه‌ی بهینه (سرویس مکانیکی، تعمیر، تعویض و یا عدم انجام نت پیشگیرانه) برای هر یک از مؤلفه‌های سیستم، در انتهای هر فاصله‌ی زمانی در یک افق برنامه‌ریزی مشخص است. یک مدل ریاضی با هدف بیشینه‌سازی دسترسی پذیری و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌ی، توسعه داده شده است. برای تشریح بهتر مدل پیشنهادی، یک مثال عددی آورده شده است.

واژگان کلیدی: نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه، توالی بهینه‌ی فعالیت‌ها، دسترسی پذیری، سیستم چند مؤلفه‌ی سری.

mahmud.hatami66@gmail.com
shahrokhi292@yahoo.com
pouresmaeeli.morteza@gmail.com
hamid.moakedi@gmail.com

۱. مقدمه

نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه، در برگیرنده‌ی مجموعه فعالیت‌هایی است که هدف آن بهبود قابلیت اطمینان و دسترسی پذیری سیستم است و سعی در کاهش نرخ خرابی آن دارد. به طور کلی، سیاست‌های نت پیشگیرانه با هدف ایجاد توازن بین هزینه‌ی انجام فعالیت‌های نت و صرفه‌جویی در هزینه‌ی ناشی از کاهش نرخ خرابی سیستم تدوین می‌شوند.

محققین یک سیستم چندحالتی را که در آن تعدادی از مؤلفه‌ها دارای سطوح عملکردی مختلف‌اند، در نظر گرفتند^[۱] و یک مدل بهینه‌سازی براساس کمینه‌سازی هزینه‌های نت و با توجه به سطح قابلیت اطمینان مورد نیاز سیستم ارائه دادند، و سپس با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، بهترین استراتژی نت، تعیین شده است. در مطالعه‌ی دیگر،^[۵] با در نظر گرفتن هم‌زمان دو فعالیت نت پیشگیرانه‌ی ساده و تعویض پیشگیرانه، یک مدل زمان‌بندی نت پیشگیرانه‌ی دوره‌ی برای سیستمی با مؤلفه‌های در حال افت، ارائه شده است. سپس فعالیت‌های ترکیبی بهینه در هر دوره‌ی نت پیشگیرانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، با هدف بیشینه‌سازی عمر سیستم تعیین

به منظور اندازه‌گیری کارایی سیستم، دسترسی پذیری معیاری مناسب‌تر از قابلیت اطمینان است، زیرا علاوه بر قابلیت اطمینان، در برگیرنده‌ی قابلیت نگه‌داری نیز هست. دسترسی پذیری را می‌توان به صورت احتمال انجام وظیفه‌ی مورد انتظار سیستم یا مؤلفه در زمان آتی، مطابق با سیاست نگه‌داری و تعمیرات و شرایط عملیاتی تعریف کرد.^[۱]

گاهی تولید از دست رفته در هنگام توقف ناگهانی سیستم برای واحدهای عملیاتی تولید پیوسته دارای هزینه‌ی هنگفتی است. سودمندی اقتصادی در این صنایع متوسط به اجرای سیاست نگه‌داری و تعمیرات مناسب به منظور افزایش دسترسی پذیری و کاهش هزینه‌های عملیاتی است. عدم دسترسی پذیری در صنایع شیمیایی، باعث افزایش تولید از دست رفته در حدود ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دلار در هر ساعت می‌شود، همچنین کل تولیدات از دست رفته در پالایشگاه‌ها به میلیون‌ها دلار می‌رسد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۱۶، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۲۸.

شده است. بر مبنای مطالعه‌ی ذکر شده،^[۵] مدلی بر مبنای دسترسی پذیری با در نظر گرفتن یک سیستم چند مؤلفه‌ی و سه فعالیت برای نت پیشگیرانه، پیشنهاد شد.^[۶] در بررسی‌های بعدی، ابتدا توابع دسترسی پذیری و هزینه بر حسب زمان برای هر دوره و بر مبنای سیاست عمر، در یک افق زمانی محدود مدل‌سازی شده است.^[۷] با این فرض که شروع فرایند خرابی جدید بعد از هر فعالیت نت پیشگیرانه باشد و با معرفی نسبت افت، توابع مذکور به صورت تابعی از این نسبت بازنویسی می‌شود. علاوه بر این، برای کل سیستم پارامتری به نام «سطح بحرانی قابلیت اطمینان»، چنان تعریف شده است که هر مؤلفه در شروع هر پر بود کاری باید دارای این کم‌ترین قابلیت اطمینان باشد. محققین یک مدل برنامه‌ریزی خطی به منظور بهینه‌سازی سیاست نگه‌داری و تعمیرات برای سیستم تک مؤلفه‌ی با نرخ خرابی تصادفی ارائه کردند.^[۸] در ادامه، میانگین زمان‌های عمده و ناچیز فعالیت‌های نت پیشگیرانه بر اساس پیشینه‌سازی دسترسی پذیری مؤلفه از طریق مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی فرایند تصمیم مارکوف، تعیین شده است. همچنین یک مدل ریاضی به منظور پیشینه‌سازی دسترسی پذیری با در نظر گرفتن انواع محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌های نت اصلاحی برای مؤلفه‌هایی با خاصیت افزونگی ارائه شد.^[۹]

به منظور تعیین تعداد اقدام نت پیشگیرانه‌ی تجهیزات، الگوریتمی به منظور تضمین دسترسی پذیری هر مؤلفه، در یک سیستم سری، ارائه شده است.^[۱۰] با توجه به این که مؤلفه‌های موجود در سیستم مذکور، دارای نرخ خرابی افزایشی و نرخ ثابت تعمیر است، فواصل زمانی نگه‌داری و تعمیرات بر اساس کمینه‌سازی هزینه‌ها و با توجه به محدودیت زمان توقف در هر دوره تعیین شده است. به منظور یافتن بهترین زمان اجرای نت پیشگیرانه‌ی دوره‌ی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی ارائه شد.^[۱۱] و سپس با در نظر گرفتن پیشینه‌سازی دسترسی پذیری تجهیزات به عنوان تابع هدف، به منظور ارزیابی اثر پارامترها روی مدل، تحلیل حساسیت انجام شد.^[۱۲] محدودیت بودجه و اثر هزینه‌های توقف بر سیاست‌های تعویض پیشگیرانه توسط برخی از محققین^[۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، برای کمینه‌سازی کل هزینه‌های مورد انتظار سیستم و با در نظر گرفتن زمان‌های تعمیر، تعویض و تعمیرات اساسی و عامل بهبود تعمیرات اساسی، یک مدل عدد صحیح مختلط غیرخطی ارائه شده است. همچنین به منظور پیشینه‌سازی دسترسی پذیری و با توجه به محدودیت هزینه‌ی تعمیر و با تعیین آستانه‌ی افت بهینه، فاصله‌ی زمانی نت پیشگیرانه به دست آمده است.^[۱۴] مهم‌ترین فرض در پژوهش مذکور، در نظر گرفتن کارایی فعالیت تعمیر به صورت کامل و افزایش زمان‌های تعمیر با افزایش تعداد تعمیر است. با تعریف دو فعالیت نگه‌داری و تعویض در یک سیستم چند مؤلفه‌ی تعمیر پذیر، دو مدل بهینه‌سازی جدید به منظور زمان‌بندی بهینه‌ی نت پیشگیرانه ارائه شده است.^[۱۵] در مدل‌های پیشنهادی، کمینه‌سازی هزینه‌ی کل و پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سراسری در یک افق زمانی محدود مد نظر قرار گرفته است. سپس با توجه به نتایج آزمایش‌ها، تحلیل حساسیت انجام شده و الگوریتم‌های به کار رفته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور حل بهینه‌ی سراسری مدل‌های پیشنهادی،^[۱۶] ترکیب الگوریتم شاخه و کران با برنامه‌ریزی پویا به عنوان «متدولوژی حل» به اجرا درآمده است.^[۱۷]

در اکثر مطالعات صورت گرفته تا به حال، توسعه مدل‌های ریاضی بر اساس هزینه و قابلیت اطمینان، بر معیارهای دیگر نظیر دسترسی پذیری ارجحیت یافته است. در سیستم‌های پیچیده، توقف کامل سیستم سبب بروز حوادث حاد و غیر قابل جبران و تحمیل هزینه‌های سنگین می‌شود. در نوشتار حاضر، به منظور انطباق با شرایط عملی و کاربرد آن در صنایع راهبردی، تلاش می‌شود مدلی جدید ارائه شود به گونه‌ی که ضمن پوشش محدودیت‌های اجرایی، با اهداف مدیریت این سیستم‌ها نیز سازگار باشد.

در این نوشتار با در نظر گرفتن انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه در فواصل زمانی (دوره‌های) ثابت، یک مدل ریاضی با هدف پیشینه‌سازی دسترسی پذیری برای یک سیستم چند مؤلفه‌ی با ساختار سری، توسعه داده شده است. فعالیت‌های نت پیشگیرانه به سه نوع سرویس مکانیکی، تعمیر و تعویض تقسیم‌بندی شده یا تصمیم به عدم انجام هر یک از فعالیت‌ها گرفته می‌شود. در صورت توقف ناگهانی سیستم قبل از رسیدن به انتهای دوره، نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی انجام می‌شود. در واقع، مسئله‌ی پیش‌رو، یافتن بهترین توالی از فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات برای هر مؤلفه‌ی سیستم در هر دوره از افق برنامه‌ریزی و با هدف پیشینه‌سازی دسترسی پذیری کل سیستم است.

در ادامه و در بخش ۲، ساختار سیستم، هر یک از فعالیت‌های نت پیشگیرانه (سرویس مکانیکی، تعمیر، تعویض و عدم انجام نت پیشگیرانه) و تخمین عامل‌های بهبود به تفصیل شرح داده شده، هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات سیستم و دسترسی پذیری سیستم محاسبه شده و نهایتاً مدل پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ۳، یک مثال عددی برای تشریح بهتر مطالب آورده شده است. در بخش ۴، نتیجه‌گیری و زمینه‌های آتی تحقیق در این حوزه مطرح شده است.

۲. مدل‌سازی نگه‌داری و تعمیرات مبتنی بر

دسترسی پذیری

نمادهای مورد نیاز برای این منظور عبارت‌اند از:

الف) پارامترها

T : طول افق برنامه‌ریزی؛

J : تعداد دوره‌ها؛

N : تعداد مؤلفه‌های سیستم؛

$v_i(t)$: تابع نرخ خرابی مؤلفه‌ی i ام؛

λ_i : پارامتر مقیاس مؤلفه‌ی i ام؛

β_i : پارامتر شکل مؤلفه‌ی i ام؛

$N_{i,j}$: تعداد خرابی‌های مؤلفه‌ی i ام در دوره‌ی j ام؛

GB : بودجه‌ی در دسترس برای انجام فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات سیستم در طول افق برنامه‌ریزی؛

S : هزینه‌ی ثابت توقف کامل سیستم برای اجرای دوره‌ی نت پیشگیرانه؛

$t_{a,y,i}$: مدت زمان اجرای فعالیت y ام نت پیشگیرانه برای مؤلفه‌ی i ام ($y = 1$) به فعالیت سرویس مکانیکی، $y = 2$ به فعالیت تعمیر و $y = 3$ به فعالیت تعویض اشاره دارد)؛

MS_i : هزینه‌ی سرویس مکانیکی مؤلفه‌ی i ام؛

Re_i : هزینه‌ی تعمیر مؤلفه‌ی i ام؛

R_i : هزینه‌ی تعویض مؤلفه‌ی i ام؛

C_b : هزینه‌ی توقف سیستم برای انجام نت اصلاحی بر حسب واحد زمان؛

$t_{b,m}$: متوسط زمان اجرای نت اصلاحی به‌ازای هر بار توقف ناگهانی سیستم؛

F_i : هزینه‌ی خرابی ناگهانی مؤلفه‌ی i ام؛

$m_{1,i}$: درصد بهبود مؤلفه‌ی i ام با انجام سرویس مکانیکی ($0 \leq m_{1,i} \leq 1$)؛

$m_{2,i}$: درصد بهبود مؤلفه‌ی i ام با انجام تعمیر ($0 \leq m_{2,i} \leq 1$)؛

I_i^k : درجه عملیاتی محیطی بازگردانده شده‌ی مؤلفه‌ی i ام به شرایط اولیه با انجام سرویس مکانیکی با توجه به عامل خرابی ik ام؛

به منظور محاسبه تغییرات در عمر و نرخ خرابی سیستم، با توجه به نو بودن آن، سن ابتدایی برای هر مؤلفه برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. $X_{i,j}$ اشاره به عمر مؤلفه i در شروع دوره J ، و $X'_{i,j}$ اشاره به عمر مؤلفه i در پایان دوره J دارد. در نتیجه رابطه بین $X_{i,j}$ و $X'_{i,j}$ عبارت خواهد بود از:

$$X'_{i,j} = X_{i,j} + \frac{T}{J}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

۱.۱.۲. سرویس مکانیکی

با در نظر گرفتن سرویس مکانیکی مؤلفه i در پایان دوره J ، این فعالیت به طور مؤثری سن مؤلفه i را برای شروع دوره بعد کاهش می‌دهد (مؤلفه جوان‌تر می‌شود).

$$X_{i,j+1} = (m_{1,i}) X'_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ 0 \leq m_{1,i} \leq 1 \quad (3)$$

در رابطه ۳ عبارت $m_{1,i}$ بیان‌گر درصد بهبود مؤلفه i با انجام سرویس مکانیکی است.

۲.۱.۲. تعمیر

با در نظر گرفتن تعمیر مؤلفه i در پایان دوره J ، این فعالیت به طور مؤثری سن مؤلفه i را برای شروع دوره بعد کاهش می‌دهد (مؤلفه جوان‌تر می‌شود).

$$X_{i,j+1} = (m_{r,i}) X'_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ 0 \leq m_{r,i} \leq 1 \quad (4)$$

در رابطه ۴ عبارت $m_{r,i}$ بیان‌گر درصد بهبود مؤلفه i با انجام تعمیر است. عامل‌های بهبود تأثیر فعالیت‌های سرویس مکانیکی و تعمیر را بر عمر سیستم نشان می‌دهند. هنگامی که $m_{1,i}$ یا $m_{r,i}$ برابر صفر می‌شوند، سیستم به شرایط سیستم نو بازمی‌گردد و هنگامی که برابر ۱ می‌شوند، سیستم به شرایط سیستم کهنه باز خواهد گشت. با توجه به انجام فعالیت‌های نگهداری (سرویس مکانیکی و تعمیر) در پایان دوره J ، نرخ خرابی برای مؤلفه i پس از فعالیت‌های مذکور برابر با $v_i(X'_{i,j})$ خواهد بود.

۳.۱.۲. تعویض

در فعالیت تعویض، مؤلفه i با یک مؤلفه نو از همان نوع، در پایان دوره J تعویض می‌شود. نرخ خرابی پس از تعویض $v_i(X'_{i,j})$ از $v_i(0)$ تبدیل خواهد شد و مؤلفه در شرایط یک مؤلفه نو سبب قرار خواهد گرفت. رابطه ۵ بیان‌گر این موضوع است:

$$X_{i,j+1} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (5)$$

۴.۱.۲. عدم انجام نت پیشگیرانه

اگر هیچ فعالیتی در پایان دوره J انجام نشود، هیچ تأثیری در نرخ خرابی مؤلفه i ایجاد نمی‌شود، در این صورت خواهیم داشت:

$$X_{i,j+1} = X'_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

۲.۲. تخمین عامل‌های بهبود

به منظور زمان‌بندی فعالیت‌های نت پیشگیرانه براساس دسترسی‌پذیری، تخمین عامل‌های بهبود از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. عوامل بهبود، مرتبط با قابلیت نگهداری مؤلفه‌های دچار خرابی، یعنی قابل تعمیر یا غیرقابل تعمیر بودن آنهاست.

d_i^k : درصد خرابی باز یابی شده مؤلفه i با انجام تعمیر با توجه به عامل خرابی k ؛

p_i^k : احتمال خرابی مؤلفه i با به‌وسیله عامل خرابی k .

ب) متغیرهای تصمیم

$X_{i,j}$: عمر مؤلفه i در آغاز دوره J ؛

$X'_{i,j}$: عمر مؤلفه i در پایان دوره J ؛

$ms_{i,j}$: متغیر صفر و ۱ انجام یا عدم انجام سرویس مکانیکی (اگر مؤلفه i در دوره J سرویس مکانیکی شود، $ms_{i,j} = 1$ و در غیر این صورت $ms_{i,j} = 0$);

$re_{i,j}$: متغیر صفر و ۱ انجام یا عدم انجام تعمیر (اگر مؤلفه i در دوره J تعمیر شود، $re_{i,j} = 1$ و در غیر این صورت $re_{i,j} = 0$);

$r_{i,j}$: متغیر صفر و ۱ انجام یا عدم انجام تعویض (اگر مؤلفه i در دوره J تعویض شود، $r_{i,j} = 1$ و در غیر این صورت $r_{i,j} = 0$).

۱.۲. ساختار سیستم

فرضیه‌ی مبنا در اکثر تحلیل‌های داده‌های خرابی براساس مستقل و هم‌توزیع بودن داده‌هاست. مستقل و هم‌توزیع بودن داده‌های خرابی از ویژگی‌های فرایندهای بازنوکنی است. طبق این فرایند، مؤلفه‌ها بعد از انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات در حد شرایط یک مؤلفه نو قرار می‌گیرند، اما بسیاری از شرایط عملی نگهداری و تعمیرات در صنعت با فرضیه‌ی نوسازی مجدد فعالیت‌های نت سازگار نیستند. در این سیستم‌ها، که به‌عنوان سیستم‌های تعمیرپذیر شناخته می‌شوند، تعمیر مؤلفه بعد از خرابی باعث قرار گرفتن سیستم در شرایط یک مؤلفه نو نمی‌شود؛ این تعمیر به‌عنوان تعمیر کمین شناخته می‌شود. سیستم‌های تعمیرپذیر در درازمدت و با توجه به نگهداری و تعمیرات اساسی مکرر، تمایل به افت قابلیت اطمینان دارند که بیان‌گر یکسان نبودن توزیع و وابسته بودن زمان‌های خرابی در این سیستم‌هاست. بنابراین سیستم‌های تعمیرپذیر را نمی‌توان توسط توابع توزیع آماری مرسوم مدل‌سازی کرد. یک سیستم تعمیرپذیر با N مؤلفه با ساختار سری را در نظر بگیرید. مؤلفه i با توجه به رفتار در حال افشش دارای یک نرخ خرابی افزایشی با تابع $v_i(t)$ است که در آن t اشاره به زمان دارد ($t \geq 0$). در نوشتار حاضر فرض بر تبعیت خرابی هر مؤلفه از فرایند پواسن غیرهمگن است که تابع خطر آن چنین است:

$$v_i(t) = \lambda_i \beta_i t^{\beta_i - 1} \quad (1)$$

که در آن λ_i و β_i به ترتیب بیان‌گر پارامترهای مقیاس و شکل مؤلفه i است. توجه کنید که فرایند پواسن غیرهمگن مشابه فرایند پواسن همگن است، با این تفاوت که نرخ رخداد خرابی تابعی از زمان است.

زمان‌بندی فعالیت‌های آتی نگهداری و تعمیرات سیستم در طول افق برنامه‌ریزی $[0, T]$ انجام می‌شود. فاصله‌ی $[0, T]$ به J بازه زمانی یکسان تقسیم می‌شود که طول هر بازه برابر با T/J خواهد بود. در پایان هر دوره هر یک از مؤلفه‌ها، سرویس، تعمیر یا تعویض خواهد شد یا هیچ فعالیتی روی آنها انجام نمی‌شود. در این مقاله، فرض بر کاهش سن مؤثر سیستم توسط هر یک از سه فعالیت مذکور و متعاقباً کاهش نرخ خرابی سیستم است. با توجه به هزینه‌های سنگین توقف و اهمیت موضوع دسترسی‌پذیری در صنایع راهبردی مانند نفت، تأثیر زمان انجام هر یک از این فعالیت‌ها بر دسترسی‌پذیری و هزینه‌های تحمیلی به سیستم لحاظ می‌شود. در هنگام توقف ناگهانی سیستم به علت خرابی هر مؤلفه، نگهداری و تعمیرات اصلاحی انجام شده و این تعمیر از لحاظ کارایی کمین فرض می‌شود.

۳.۲. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم

هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم، شامل هزینه‌ی انجام نت (هزینه‌ی انجام نت پیشگیرانه و هزینه‌ی انجام نت اصلاحی) و هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت انجام نت (هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت انجام نت پیشگیرانه و هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت انجام نت اصلاحی) است.

۱.۳.۲. هزینه‌ی انجام نت پیشگیرانه

این هزینه شامل هزینه‌ی انجام هر یک از فعالیت‌های سرویس مکانیکی، تعمیر و تعویض در انتهای هر دوره نت پیشگیرانه در طول افق برنامه‌ریزی است و مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N [(ms_{i,j} MS_i) + (re_{i,j} Re_i) + (r_{i,j} R_i)] \quad (9)$$

که در آن MS_i بیان‌گر هزینه‌ی سرویس مکانیکی مؤلفه‌ی i ام، Re_i بیان‌گر هزینه‌ی تعمیر مؤلفه‌ی i ام، R_i بیان‌گر هزینه‌ی تعویض مؤلفه‌ی i ام است. همچنین، $ms_{i,j}$ ، $re_{i,j}$ و $r_{i,j}$ به ترتیب، متغیرهای صفر و ۱ مربوط به انجام یا عدم انجام سرویس مکانیکی، تعمیر و تعویض مؤلفه‌ی i ام در دوره j ام هستند.

۲.۳.۲. هزینه‌ی انجام نت اصلاحی

چنان‌که پیش‌تر بیان شد، در صورت توقف ناگهانی سیستم قبل از رسیدن به انتهای دوره، نگهداری و تعمیرات اصلاحی انجام می‌شود. به‌منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی انجام نت اصلاحی، تعیین تعداد خرابی‌های هر مؤلفه در هر دوره ضروری است. طبق رویکردهای مورد استفاده محققین در برخی از مطالعات،^[۲۱] و با استفاده از مفهوم متوسط نرخ خرابی، تعداد خرابی مورد انتظار مؤلفه‌ی i ام در دوره j ام (یعنی $N_{i,j}$) به‌وسیله‌ی رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$E(N_{i,j}) = \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t) dt = \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} \lambda_i \beta_i t^{\beta_i-1} dt = \lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right), \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J$

اگر F_i بیان‌گر هزینه‌ی خرابی ناگهانی مؤلفه‌ی i ام در هر دوره باشد، هزینه‌ی مستقیم نت اصلاحی در طول افق برنامه‌ریزی طبق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N [F_i \lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right)] \quad (11)$$

۳.۳.۲. هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت انجام نت پیشگیرانه

با در نظر گرفتن هزینه‌های خرابی و فعالیت‌های نت پیشگیرانه‌ی یک سیستم چندمؤلفه‌یی، مسئله‌ی مورد نظر را می‌توان مسئله‌ی ساده برای یافتن توالی بهینه فعالیت‌های سرویس، تعمیر، تعویض یا عدم انجام فعالیت، و مستقل از دیگر مؤلفه‌ها دانست. بنابراین، N مسئله‌ی بهینه‌سازی مستقل وجود خواهد داشت. در این حالت، یک سیستم N مؤلفه‌یی با J دوره نت پیشگیرانه، دارای $N \times J$ زمان‌بندی ممکن خواهد بود. با به‌کارگیری چنین رویکردی، کل سیستم برای انجام هر فعالیت نت برای هر مؤلفه متوقف خواهد شد و انجام چنین عملی منطقی و واقع‌گرایانه نیست.

با توجه به هزینه‌های بالای توقف در صنایع راهبردی مانند نفت، و به‌منظور جلوگیری از توقف‌های متعدد سیستم، ترکیبی از فعالیت‌های نت را برای مؤلفه‌های مختلف در دوره‌های یکسان به‌کار می‌گیریم. به‌عنوان نمونه، اگر سیستم برای تعویض

محققین مدل‌هایی براساس کاهش سن و عامل بهبود ارائه کرده‌اند.^[۱۶] آنان یک مدل نت پیشگیرانه وابسته به عمر^[۱۷] را براساس پارامترهای پایش، عامل بهبود و شرایط محیطی و عملیاتی تجهیزات در یک نیروگاه هسته‌یی ارائه کرده‌اند. افزون بر این، مدل‌هایی نیز با استفاده از عامل‌های بهبود ارائه شده است.^[۱۸-۲۰]

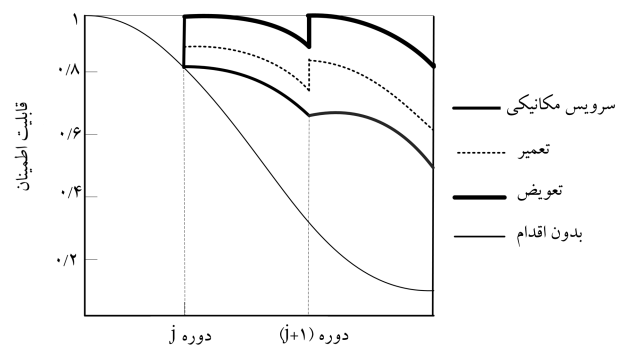
با توجه به خرابی‌ها در صنایع مختلف، می‌توان عوامل خوردگی، سایش و خستگی را به‌عنوان علل رایج بروز خرابی مؤلفه‌های مکانیکی و تعیین عامل بهبود در نظر گرفت. پس از تعیین عوامل خرابی سیستم، باید احتمال خرابی مؤلفه‌ی i ام توسط عامل k ام (p_i^k) را تعیین کنیم. در مرحله‌ی بعد، محیط افت با توجه به عوامل خرابی ذکر شده، نظیر مسائلی مانند بارگذاری، دما، گرد و خاک، میزان رطوبت و... به‌صورت کلی تحلیل می‌شود. در این مقاله، میزان بازیابی مؤلفه‌ی i ام بر اثر فعالیت‌های سرویس مکانیکی ($m_{1,i}$) و تعمیر ($m_{2,i}$) را می‌توان به‌ترتیب مطابق رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه کرد:

$$m_{1,i} = \sum_k p_i^k I_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

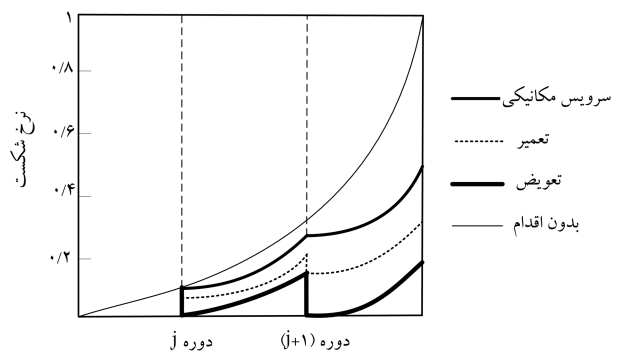
$$m_{2,i} = \sum_k p_i^k d_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

I_i^k بیان‌گر درجه عملیات محیطی بازگرداننده شده‌ی مؤلفه‌ی i ام به شرایط اولیه با انجام سرویس مکانیکی با توجه به عامل خرابی k ام و d_i^k بیان‌گر درصد خرابی بازیابی شده‌ی مؤلفه‌ی i ام با انجام تعمیر با توجه به عامل خرابی k ام است، به‌طوری که $\sum_k p_i^k = 1$ و $0 \leq d_i^k \leq 1$ ، $0 \leq I_i^k \leq 1$.

اثر فعالیت‌های مختلف نت پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. اثر فعالیت‌های مختلف نت پیشگیرانه بر قابلیت اطمینان.



شکل ۲. اثر فعالیت‌های مختلف نت پیشگیرانه بر نرخ خرابی.

یک مؤلفه متوقف شود، انجام انواع فعالیت‌های نت برای دیگر مؤلفه‌ها به‌منظور جلوگیری از توقف سیستم منطقی انجام می‌گیرد، اگرچه زمان بهینه‌ی انجام نت پیشگیرانه‌ی آنها فرا نرسیده باشد. تحت این سناریو، زمان بهینه‌ی انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه به‌طور مجزا برای هر مؤلفه، وابسته به تصمیم‌گیری درمورد سایر مؤلفه‌ها خواهد بود. با به‌کارگیری این رویکرد، هزینه‌ی توقف سیستم برای هر دوره نت پیشگیرانه به‌شرطی در نظر گرفته می‌شود که دست کم یکی از فعالیت‌های نت پیشگیرانه برای یک مؤلفه در دوره مورد نظر انجام شود. در این صورت ما دارای $2^{N \times J}$ جواب ممکن خواهیم بود.

بنابراین، اگر S بیانگر هزینه ثابت توقف کامل سیستم برای اجرای دوره‌ی نت پیشگیرانه باشد، هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت اجرای نت پیشگیرانه در طول افق برنامه‌ریزی از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$S \sum_{j=1}^J \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - (ms_{i,j} + re_{i,j} + r_{i,j})) \right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

۴.۳.۲. هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت انجام نت اصلاحی

چنان‌که اشاره شد، در صورت توقف ناگهانی سیستم قبل از رسیدن به انتهای دوره، نگه‌داری و تعمیرات اصلاحی انجام می‌شود. واضح است که یک سیستم با ساختار سری، در صورتی ناگهانی متوقف می‌شود که حداقل یکی از مؤلفه‌هایش دچار خرابی شود. تعداد دفعات خرابی ناگهانی مؤلفه‌های سیستم در دوره T از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^N E(N_{i,j}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right), \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (13)$$

بنابراین، اگر C_b بیانگر هزینه توقف سیستم برای انجام نت اصلاحی بر حسب واحد زمان و $t_{b,m}$ بیانگر متوسط زمان اجرای نت اصلاحی به ازای هر بار توقف ناگهانی سیستم باشد، هزینه‌ی توقف سیستم به‌علت اجرای نت اصلاحی، طبق رابطه‌ی ۱۴ به‌دست می‌آید.

$$C_b t_{b,m} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right) \quad (14)$$

۴.۴. دسترسی پذیری سیستم

دسترسی‌پذیری یک مؤلفه در شرایط عملیاتی به‌صورت نسبت میانگین زمان فعال بودن آن به میانگین زمان مورد مطالعه محاسبه می‌شود.

$$A_i = \frac{MUT_i}{MUT_i + MDT_i} \quad (15)$$

$$MUT_i = \left(\frac{T}{J} \right) - t_{b,i} \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

$$MDT_i = t_{a,i} + t_{b,i} \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (17)$$

$$A_i = \frac{\left(\frac{T}{J} \right) - t_{b,i} \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t) dt}{\left(\frac{T}{J} \right) + t_{a,i}}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (18)$$

پس از تعیین فعالیت‌های نت پیشگیرانه مؤلفه‌ها، دسترسی‌پذیری کل سیستم با ساختار سری در دوره J را می‌توان طبق رابطه‌ی ۱۹ محاسبه کرد.

$$A_{S,J} = \frac{\left(\frac{T}{J} \right) - t_{b,m} \sum_{i=1}^N \int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t) dt}{\left(\frac{T}{J} \right) + \sum_{y=1}^r \sum_{i=1}^N t_{a,y,i}} = \frac{\left(\frac{T}{J} \right) - t_{b,m} \sum_{i=1}^N \left(\lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right) \right)}{\left(\frac{T}{J} \right) + \sum_{i=1}^N [(t_{a,1,i} ms_{i,j}) + (t_{a,2,i} re_{i,j}) + (t_{a,3,i} r_{i,j})]} \quad (19)$$

۵.۲. مدل پیشنهادی

با توجه به مطالب مطرح شده در بخش قبلی، می‌توان یک مدل بهینه‌سازی به‌منظور یافتن زمان‌بندی فعالیت‌های نگه‌داری و تعمیرات پیشگیرانه در سیستم‌های چندمؤلفه‌ی تعمیرپذیر با ساختار سری ارائه داد. مدل پیشنهادی، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی است که دسترسی‌پذیری سیستم را از طریق تعیین فعالیت‌های نت پیشگیرانه برای مؤلفه‌ها و عدم تجاوز از بودجه‌ی در دسترس، بیشینه می‌کند.

هدف مدل ارائه شده در رابطه‌ی ۲۰، بیشینه‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم است. محدودیت اول بیانگر عمر ابتدایی هر مؤلفه در ابتدای طول افق برنامه‌ریزی است. محدودیت‌های دوم و سوم عمر مؤثر مؤلفه‌ها را براساس فعالیت‌های نت پیشگیرانه به‌طور بازگشتی محاسبه می‌کنند. محدودیت چهارم از انجام هم‌زمان فعالیت‌های سرویس مکانیکی، تعمیر و تعویض بر روی مؤلفه‌ها جلوگیری می‌کند. محدودیت پنجم تضمین می‌کند که هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات اعم از هزینه‌های مستقیم و توقف سیستم در طول افق برنامه‌ریزی، از بودجه‌ی در دسترس تجاوز نکند. نهایتاً در محدودیت‌های ششم و هفتم، به‌ترتیب، متغیرهای تصمیم‌پیوسته مثبت و متغیرهای تصمیم‌باینری تعریف شده است:

$$\text{Max} \prod_{j=1}^J \left[\frac{\left(\frac{T}{J} \right) - t_{b,m} \sum_{i=1}^N \left(\lambda_i \left((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right) \right)}{\left(\frac{T}{J} \right) + \sum_{i=1}^N [(t_{a,1,i} ms_{i,j}) + (t_{a,2,i} re_{i,j}) + (t_{a,3,i} r_{i,j})]} \right]$$

st :

$$X_{i,1} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

۳. مثال عددی

یک سیستم هشت مؤلفه‌یی با ساختار سری در پالایشگاه نفت را در نظر بگیرید. مطابق آمار ارائه شده، [۲۲] خرابی پمپ‌ها و کمپرسورها به‌عنوان تجهیزات کلیدی، یک سوم کل خرابی تجهیزات در پالایشگاه‌ها را شامل می‌شود و سبب تحمیل هزینه‌های هنگفت، به‌ویژه هزینه‌ی از دست دادن تولید می‌شود. سیستم مد نظر یک کمپرسور هیدروژن در یک پالایشگاه نفت است. داده‌های لازم در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. هدف، زمان‌بندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه براساس بیشینه‌سازی دسترسی‌پذیری سیستم است.

افق برنامه‌ریزی ۲۴ ماه است و فعالیت‌های نت پیشگیرانه در فواصل زمانی یا دوره‌های ثابت یک ماهه انجام می‌شوند. هزینه ثابت توقف برای هر نت پیشگیرانه برابر با ۱۰۰۰۰ واحد پولی و هزینه‌ی هر واحد زمانی توقف ناگهانی برای نت اصلاحی برابر با ۲۰۰۰۰ واحد پولی در ماه، متوسط زمان توقف برای هر بار توقف ناگهانی (یعنی $t_{b,m}$) برابر با ۰/۰۲ ماه و بودجه در نظر گرفته شده در طول مدت برنامه‌ریزی برابر با ۸۵۰۰۰۰۰ واحد پولی است.

مثال عددی ارائه شده توسط نرم‌افزار LINGO.۱۴ و حل‌گر شاخه و حد حل شده است. راه‌حل بهینه مقدار تابع هدف را برابر با ۰/۷۱۳۳ نشان می‌دهد. زمان‌بندی و تالی بهینه‌ی فعالیت‌های نت پیشگیرانه و سن مؤثر هر مؤلفه در ابتدای هر دوره (ماه) به‌ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

$$X_{i,j} = (\lambda - ms_{i,j-1})(\lambda - re_{i,j-1})(\lambda - r_{i,j-1})X'_{i,j-1} + ms_{i,j-1}(m_{\lambda,i}X'_{i,j-1}) + re_{i,j-1}(m_{r,i}X'_{i,j-1}),$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 2, 3, \dots, J$$

$$X'_{i,j} = X_{i,j} + \frac{T}{J}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 3, \dots, J$$

$$ms_{i,j} + re_{i,j} + r_{i,j} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 3, \dots, J$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N [(ms_{i,j}MS_i) + (re_{i,j}Re_i) + (r_{i,j}R_i)] + \sum_{j=1}^J S \left[\left(1 - \prod_{i=1}^N (\lambda - (ms_{i,j} + re_{i,j} + r_{i,j})) \right) \right] + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N [F_i \lambda_i ((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i})] + (C_b t_{b,m}) \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \lambda_i ((X'_{i,j})^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i}) \leq GB$$

$$ms_{i,j}, re_{i,j}, r_{i,j} = 0 \text{ or } 1, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 3, \dots, J$$

$$X_{i,j}, X'_{i,j} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 3, \dots, J \quad (20)$$

برای روشن‌تر شدن مدل پیشنهادی، در بخش بعدی مثالی عددی ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای تابع نرخ خرابی و هزینه‌ی فعالیت‌های نت پیشگیرانه مؤلفه‌ها.

مؤلفه	محفظه فشار بالا	محفظه فشار بالا	درپوش مکش	بلمبرینگ محوری	حلقه سایش	بلمبرینگ لغزشی	بلمبرینگ محوری	سپورت حلزونی
i	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
β_i	۱,۷۳	۱,۸۸	۲,۴۳	۲,۵۳	۲,۱۴	۳,۵۵	۲,۶۸	۲,۰۹
λ_i	۰,۲۲۰۰	۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۳۴	۰,۰۰۳۲	۰,۰۰۲۸	۰,۰۰۱۵	۰,۰۰۱۲
F_i	۱۴۸۶۸	۳۹۲۰۴	۴۴۸۸۰	۵۷۸۷۶	۷۳۸۶۰	۴۶۷۵۲	۴۸۵۶۸	۷۴۲۳۲
R_i	۳۶۳۹	۵۴۳۸	۷۳۹۸	۸۲۷۷	۱۳۵۵۴	۱۴۱۳۰	۲۱۳۵۶	۲۴۳۴۸
Re_i	۹۳۰	۱۳۸۰	۱۹۲۰	۲۰۷۰	۳۳۸۹	۳۵۳۵	۱۲۱۴۵	۱۸۵۵۸
MS_i	۵۲۱	۷۷۷	۱۰۵۷	۱۱۸۲	۱۹۳۶	۲۰۲۲	۳۰۵۱	۳۴۸۱

جدول ۲. عوامل بهبود و زمان انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه‌ی مؤلفه‌ها.

مؤلفه	محفظه فشار بالا	محفظه فشار بالا	درپوش مکش	بلمبرینگ محوری	حلقه سایش	بلمبرینگ لغزشی	بلمبرینگ محوری	سپورت حلزونی
i	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
$t_{a,3,i}$	۰,۰۰۷۶	۰,۰۰۵۴	۰,۰۰۵۹	۰,۰۰۴۵	۰,۰۰۹۹	۰,۰۰۶۶	۰,۰۰۵۴	۰,۰۰۶۱
$t_{a,2,i}$	۰,۰۰۹۸۰	۰,۰۰۷۰۰	۰,۰۰۸۳۳	۰,۰۰۶۲۵	۰,۰۰۱۵۲۷	۰,۰۰۹۵	۰,۰۰۹۶	۰,۰۰۸۰
$t_{a,1,i}$	۰,۰۰۶۰	۰,۰۰۳۳	۰,۰۰۳۵	۰,۰۰۲۵	۰,۰۰۰۸۸	۰,۰۰۴۵	۰,۰۰۴۳	۰,۰۰۴۰
$m_{r,i}$	۰,۳۳	۰,۴۲	۰,۴۵	۰,۳۰	۰,۲۵	۰,۴۴	۰,۴۵	۰,۵۵
$m_{\lambda,i}$	۰,۷۸	۰,۶۶	۰,۵۷	۰,۶۵	۰,۵۸	۰,۶۵	۰,۷۵	۰,۶۸

جدول ۳. زمان بندی بهینه ی فعالیت های نت پیشگیرانه در طول افق برنامه ریزی.

j (ماه)	i (مؤلفه)							
	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۱	-	--	-	-	-	-	-	-
۲	-	--	-	-	-	-	-	-
۳	-	--	تعویض	-	-	-	-	-
۴	-	--	-	-	-	-	-	-
۵	-	--	-	-	-	-	-	-
۶	-	تعویض	تعویض	تعمیر	تعمیر	تعمیر	-	-
۷	-	--	-	-	-	-	-	-
۸	-	--	-	-	-	-	-	-
۹	-	--	-	-	تعمیر	سرویس مکانیکی	تعویض	-
۱۰	-	--	تعویض	-	-	سرویس مکانیکی	-	-
۱۱	-	--	-	-	-	-	-	-
۱۲	تعمیر	تعویض	سرویس مکانیکی	تعمیر	تعمیر	سرویس مکانیکی	-	-
۱۳	-	--	-	-	-	-	-	-
۱۴	-	--	تعویض	-	تعمیر	سرویس مکانیکی	-	-
۱۵	-	--	-	-	-	-	-	-
۱۶	-	--	-	-	-	-	-	-
۱۷	-	تعویض	تعویض	-	تعمیر	تعمیر	-	-
۱۸	-	--	-	-	-	-	-	-
۱۹	-	--	-	-	-	-	-	-
۲۰	-	--	تعویض	-	-	سرویس مکانیکی	-	-
۲۱	-	--	-	-	تعمیر	سرویس مکانیکی	-	-
۲۲	-	--	-	-	-	-	-	-
۲۳	-	--	-	-	-	-	-	-
۲۴	-	--	-	-	-	-	-	-

نفت نشان داده شد.

۴. نتیجه گیری

با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مدل ارائه شده، مطالعات آتی در این زمینه را می توان به ارائه ی الگوریتم های حل ابتکاری و فراابتکاری به منظور دست یابی به جواب بهینه در سیستم هایی با تعداد مؤلفه ی زیاد معطوف کرد. علاوه بر این، به منظور نزدیک تر شدن مدل پیشنهادی به واقعیت، می توان تغییر ساختار سیستم و به کارگیری محدودیت های دیگری نظیر قابلیت اطمینان و محدودیت در منابع نگهداری و تعمیرات را در نظر گرفت.

در مطالعه ی حاضر یک مدل بهینه سازی عدد صحیح مختلط غیرخطی به منظور زمان بندی فعالیت های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در یک سیستم چندمؤلفه یی با ساختار خطی ارائه شد. بهترین توالی فعالیت ها برای هر مؤلفه در سیستم در طول یک افق برنامه ریزی محدود براساس بیشینه سازی دسترسی پذیری تعیین شد. کاربرد مدل پیشنهادی از طریق یک مثال عددی در یک سیستم چندمؤلفه یی در پالایشگاه

جدول ۴. مقادیر بهینه‌ی سن مؤلفه‌ها در آغاز هر دوره $X_{i,j}$.

j (ماه)	i (مؤلفه)							
	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۴	۳	۳	۰	۳	۳	۳	۳	۳
۵	۴	۴	۱	۴	۴	۴	۴	۴
۶	۵	۵	۲	۵	۵	۵	۵	۵
۷	۶	۰	۰	۱٫۵	۱٫۸	۲٫۱	۶	۶
۸	۷	۱	۱	۲٫۵	۲٫۸	۳٫۱	۷	۷
۹	۸	۲	۲	۳٫۵	۳٫۸	۴٫۱	۸	۸
۱۰	۹	۳	۳	۴٫۵	۱٫۴	۲٫۹	۰	۹
۱۱	۱۰	۴	۰	۵٫۵	۲٫۴	۲٫۲	۱	۱۰
۱۲	۱۱	۵	۱	۶٫۵	۳٫۴	۳٫۲	۲	۱۱
۱۳	۵٫۴	۰	۱٫۳	۱٫۹	۱٫۳	۲٫۴	۳	۱۲
۱۴	۶٫۴	۱	۲٫۳	۲٫۹	۲٫۳	۳٫۴	۴	۱۳
۱۵	۷٫۴	۲	۰	۳٫۹	۱	۲٫۵	۵	۱۴
۱۶	۸٫۴	۳	۱	۴٫۹	۲	۳٫۵	۶	۱۵
۱۷	۹٫۴	۴	۲	۵٫۹	۳	۴٫۵	۷	۱۶
۱۸	۱۰٫۴	۰	۰	۶٫۹	۱٫۲	۱٫۹	۸	۱۷
۱۹	۱۱٫۴	۱	۱	۷٫۹	۲٫۲	۲٫۹	۹	۱۸
۲۰	۱۲٫۴	۲	۲	۸٫۹	۳٫۲	۳٫۹	۱۰	۱۹
۲۱	۱۳٫۴	۳	۰	۹٫۹	۴٫۲	۲٫۸	۱۱	۲۰
۲۲	۱۴٫۴	۴	۱	۱۰٫۹	۱٫۶	۲٫۲	۱۲	۲۱
۲۳	۱۵٫۴	۵	۲	۱۱٫۹	۲٫۶	۳٫۲	۱۳	۲۲
۲۴	۱۶٫۴	۶	۳	۱۲٫۹	۳٫۶	۴٫۲	۱۴	۲۳

منابع (References)

- Faulin, J., Juan, A.A., Martorell, S. and Marquez, J.E.R., *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*, New York, Springer (2010).
- Radouane, L., Chateaufneuf, A. and Djamil, A. "Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units", *Computers and Chemical Engineering*, **33**, pp. 1499-1510 (2009).
- Radouane, L., Chateaufneuf, A. and Djamil, A. "Impact of few failure data on the opportunistic replacement policy for multi-component systems", *Reliability Engineering and System Safety*, **95**, pp. 108-119 (2010).
- Levitin, G. and Lisnianski, A. "Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems", *Reliability Engineering and System Safety*, **67**, pp. 193-209 (2000).
- Tsai, Y.T., Wang, K.S. and Teng, H.Y. "Optimizing preventive maintenance for mechanical component using genetic algorithms", *Reliability Engineering and System Safety*, **74/1**, pp. 89-97 (2001).
- Tsai, Y.T., Wang, K.S. and Tsai, L.C. "A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems", *Reliability Engineering and System Safety*, **84**, pp. 261-270 (2004).
- Zhao, Y.X. "On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation", *Reliability Engineering and System Safety*, **79**, pp. 301-308 (2003).
- Jayakumar, A. and Asagarpoor, S. "Maintenance optimization of equipment by linear programming", *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System*, pp. 145-149 (2004).
- Castro, H.F.D. and Cavalca, K.L. "Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system", *Reliability Engineering and System Safety*, **91**, pp. 413-420 (2006).
- Duarte, J.A.C., Craveiro, J.T.A. and Trigo, T.P. "Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **83**, pp. 244-248 (2006).
- Alardhi, M., Hannam, R.G. and Labib, A.W. "Preventive maintenance scheduling for multi-cogeneration plants with production constraints", *Quality in Maintenance Engineering*, **13**(3), pp. 276-292 (2007).
- Pascual, R., Meruance, V. and Rey, P.A. "On the effect of down time costs and budget constraint on preventive and replacement policies", *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, pp. 144-151 (2008).
- Zhu, Y., Elsayed, E.A., Liao, H. and Chan, L.Y. "Availability optimization of systems subject to competing risk", *European Journal of Operational Research*, **202**, pp. 781-788 (2010).
- Moghaddam, K.S. and Usher, J.S. "Sensitivity analysis and comparison of algorithms in preventive maintenance and replacement scheduling optimization models", *Computers and Industrial Engineering*, **61**, pp. 64-75 (2011).
- Moghaddam, K.S. and Usher, J.S. "Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming", *Computers and Industrial Engineering*, **60**, pp. 654-665 (2011).
- Jabayalan, V. and Chaudhuri, D. "Cost optimization of maintenance scheduling for a system with assured reliability", *IEEE Transactions on Reliability*, **41**, pp. 21-25 (1992).
- Martorell, S., Sanchez, A. and Serradell, V. "Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions", *Reliability Engineering and System Safety*, **64/1**, pp. 19-31 (1999).
- Xi, L.F., Zhou, X.J. and Lee, J. "Research on sequential preventive maintenance policy in finite time horizon", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, **11**, pp. 1465-1468 (2005).

19. Bartholomew-Biggs, M., Christianson, B. and Zuo, M. "Optimizing preventive maintenance models", *Computational Optimization and Applications*, **35**(2), pp. 261-279 (2006).
20. Che-Hua, L. "Preventive maintenance scheduling via particle swarm optimization method", *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, **1**, pp. 121-126 (2007).
21. Usher, J.S., Kamal, A.H. and Syed, W.H. "Cost optimal preventive maintenance and replacement scheduling", *IEE Transactions*, **30**, pp. 1121-1128 (1998).
22. Tan, J.S. and Kramer, A.M. "A general framework for preventive maintenance optimization in chemical process operations", *Computers and Chemical Engineering*, **21**, pp. 1451-1496 (1997).