

یکپارچه‌سازی کیفیت و نگهداری - تعمیرات با در نظر گرفتن انحرافات با دلیل چندگانه برای فرایندهای با کیفیت بالا

علی سلماس‌نیا* (دانشیار)

احمد حاتمی (کارشناس ارشد)

علی طلش‌کاظمی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۳۹۹ (۳۶-۱) شماره ۲/۲، ص. ۲۷-۳۷

امروزه نظارت بر فرایند آماری (SPM) و نگهداری - تعمیرات دوبار شناخته شده برای کاهش تولید محصول نامنطبق هستند. در این ارتباط، یک رویکرد برای یکپارچه‌سازی SPM و نگهداری - تعمیرات برای فرایندهای با کیفیت بالا ارائه می‌شود. به علاوه، در بیشتر مطالعاتی که این دو مفهوم را به طور هم‌زمان در نظر گرفته‌اند، فرض بر آن است که فقط یک انحراف با دلیل در فرایند تولید می‌تواند رخ دهد. این فرض ساده‌کننده می‌تواند منجر به عملکرد ضعیف خط تولید در هر دو عامل اقتصادی و آماری شود، هنگامی که مقدار انحراف رخ داده در فرایند متفاوت از انحراف پیش‌بینی شده باشد. در نتیجه، به منظور نزدیک‌تر شدن مدل با دنیای واقعی امکان رخداد چند انحراف با دلیل در مدل ارائه شده در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی سود مورد انتظار چرخه‌ی تولید به قسم محدودیت‌های آماری استفاده می‌شود. در پایان، تحلیل حساسیت روی پارامترها و مطالعات مقایسه‌ی برای بررسی تأثیر بر روی تابع هدف انجام می‌شود.

واژگان کلیدی: نگهداری - تعمیرات، طراحی اقتصادی - آماری، انحرافات با دلیل چندگانه، زمان بین رویدادها، پایش آماری فرایند.

a.salmasnia@qom.ac.ir
ahmadhatami.4@gmail.com
ataleshkazemi@gmail.com

۱. مقدمه

محدودیت‌های آماری لحاظ می‌شود که به کاهش هزینه‌ها در واحد زمان کمک شایانی می‌کند.

از نمودارهای کنترل معمولاً برای پایش تغییراتی استفاده می‌شود که ممکن است بر کیفیت فرایند تأثیر بگذارند. برای طراحی نمودارهای کنترل سه روش وجود دارد: طراحی آماری، طراحی اقتصادی و طراحی اقتصادی - آماری. از آنجا که پایش آماری فرایند موجب کشف سریع تغییرات فرایند می‌شود، واکنش لازم در برابر عدم انطباق صورت می‌گیرد. در این رابطه مدلی برای طراحی اقتصادی نمودار کنترل ارائه شده است^[۵] که فقط ویژگی‌های آماری فرایند را در نظر می‌گیرد. محققان طراحی اقتصادی - آماری و اقتصادی نمودار کنترل \bar{X} با انحرافات با دلیل چندگانه را در حضور داده‌های غیر نرمال بررسی کرده‌اند.^[۷] همچنین طراحی اقتصادی - آماری یک نمودار کنترلی شوهارت انطباقی در حضور انحرافات با دلیل چندگانه را نیز بررسی کرده‌اند.^[۸]

ادغام نظارت بر فرایند آماری و نگهداری - تعمیرات در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. در این راستا، برای اولین بار، مدلی برای بهینه‌سازی هم‌زمان کنترل فرایند و نگهداری - تعمیرات ارائه شد^[۹] و مقدار بهینه‌ی پارامترهای نمودار کنترل و فاصله‌ی بهینه بین دو بار انجام نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه (PM) ^۱ را برای

در دنیای رو به پیشرفت امروزی، نظارت بر فرایندهای آماری باعث شناسایی سریع تغییرات فرایند شده و انجام واکنش لازم در برابر آنها می‌شود.^[۱] از طرفی بسیاری از فرایندهای تولیدی مکانیکی اند و درگذر زمان احتمال وقوع خرابی و انحرافات با دلیل رو به افزایش است. در همین راستا، عدم اجرای نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه باعث افزایش تعداد دفعات خرابی و به موجب آن افزایش هزینه‌های فرایند تولید می‌شود. محققان برای جلوگیری از توقفات و کشف سریع تغییرات در فرایند تولید سیاست‌های نگهداری - تعمیرات و نظارت بر روند آماری را به طور هم‌زمان بررسی کردند.^[۲] با این وجود، ادغام نظارت بر فرایند آماری و نگهداری - تعمیرات برای فرایندهای با کیفیت بالا مورد چشم پوشی قرار گرفته است. در این مقاله، رویکردی برای یکپارچه‌سازی نظارت بر فرایند آماری و نگهداری - تعمیرات در فرایندهای با کیفیت بالا ارائه می‌شود. از سوی دیگر برای نزدیک شدن به دنیای واقعی، طراحی نمودارهای کنترل در حضور انحرافات با دلیل چندگانه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن

* نویسنده مسخول

تاریخ: دریافت ۱۷/۶/۱۳۹۸، اصلاحیه ۲۷/۴/۱۳۹۹، پذیرش ۵/۸/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J65.2020.53389.2021

جدول ۱. خلاصه‌ی مرور ادبیات.

مقاله	مفاهیم یکپارچه	انحرافات با دلیل تکی چندگانه	توزیع زمان تا خرابی شیفت	نوع طراحی نمودار اقتصادی - اقتصادی - آماری
[۲۱]	SPM	✓	Exponential	✓
[۵]	SPM	✓	Exponential	✓
[۲]	SPM	✓	Normal	✓
[۲۲]	Maintenance		Exponential	✓
[۳]	SPM/Maintenance	✓	Exponential	✓
[۲۰]	SPM/Maintenance	✓	Weibull	✓
[۲۳]	SPM	✓	Exponential/GAMMA	✓
[۲۴]	SPM/Maintenance		Weibull/Exponential	
[۸]	SPM	✓	Erlang	✓
[۲۵]	Maintenance		Exponential	
[۲۶]	SPM		Erlang/Weibull	
[۱۳]	SPM/Maintenance	✓	Weibull	✓
[۲۷]	Maintenance		Weibull	
[۱۲]	SPM/Maintenance	✓	Weibull	✓
[۱]	SPM	✓	Exponential	✓
[۵]	SPM	✓	Weibull	✓
[۱۴]	SPM/Maintenance	✓	Exponential	✓
[۱۹]	SPM	✓	Exponential	✓
[۷]	SPM	✓	Weibull	✓
[۱۵]	SPM/Maintenance	✓	Weibull	✓
این مقاله	SPM/Maintenance	✓	Weibull/Exponential	✓

دادن خلاصه‌های موجود، تحقیقات معرفی شده خلاصه و دسته‌بندی شده است. برای پرکردن شکاف‌های تحقیق و غلبه بر مشکلات فوق، این مطالعه، یک رویکرد برای یکپارچه‌سازی نظارت بر فرایند آماری و نگهداری - تعمیرات برای فرایندهای با کیفیت بالا ارائه می‌دهد. از سوی دیگر این مقاله برای نزدیک شدن به دنیای واقعی، طراحی نمودارهای کنترل در حضور انحرافات با دلیل چندگانه را در نظر می‌گیرد که هدف آن پیشینه‌سازی سود در واحد زمان است. همچنین، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری لحاظ می‌شود که علاوه بر افزایش سود در واحد زمان، باعث بهتر نشان دادن میزان درصد انطباق محصولات تولید می‌شود.

در ادامه‌ی این نوشتار و در بخش دوم تعریف مسئله و مفروضات آن به طور مفصل ارائه می‌شود. در بخش سوم یک مدل ریاضی برای یکپارچه‌سازی کیفیت و نگهداری - تعمیرات با در نظر گرفتن انحرافات با دلیل چندگانه برای فرایندهای با کیفیت بالا معرفی می‌شود. در بخش چهارم روش حل توضیح داده شده است. بخش پنجم که در آن نتایج تجربی ارائه شده، شامل دو بخش است: ۱. مثال عددی؛ ۲. تحلیل حساسیت؛ ۳. مطالعه‌ی مقایسه‌ی. نهایتاً در بخش ششم، جمع‌بندی نتایج حاصله ارائه شده است.

۲. شرح مسئله

در دنیای رقابتی امروز برای دستیابی به بهترین خروجی از فرایند تولید و شناسایی و کاهش محصولات نامنطبق، لازم است تجهیزات در شرایط عملیاتی مناسب نگهداری شوند. بنابراین، پیش فرایند آماری (SPM) و سیاست نگهداری - تعمیرات دو ابزار

کمینه کردن مجموع هزینه‌ها محاسبه کردند.^[۱۱] برای طراحی اقتصادی نمودار کنترل نیز تحت یک سیاست نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه مدلی ارائه شد^[۱۱] که در آن تأثیر سطوح مختلف نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه روی طراحی اقتصادی نمودار کنترل بررسی شد. در ادامه نیز یک مدل یکپارچه برای کیفیت فرایند و نگهداری - تعمیرات پیشنهاد شد^[۱۲] که در آن از نگهداری - تعمیرات برنامه‌ریزی شده و تعمیرات اصلاحی استفاده کردند. در مطالعات بعدی^[۱۳]، یکپارچگی فعالیت‌های نگهداری - تعمیرات با طراحی نمودار کنترل توسعه داده شد. همچنین یک مدل یکپارچه از SPM و نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه برای یک فرایند تولیدی توسعه داده شد.^[۱۴] پس از آن محققان به طراحی هم‌زمان نمودار کنترل و سیاست نگهداری - تعمیرات با در نظر گرفتن انحرافات با دلیل چندگانه پرداختند.^[۱۵] علاوه بر این، در چندین پژوهش دیگر^[۱۶-۱۸] سیاست‌های نگهداری - تعمیرات و نظارت بر فرایند آماری به طور هم‌زمان بررسی شد.

در فرایندهای صنعتی فرض انحرافات با دلیل چندگانه واقعی‌تر از فرض یک انحراف با دلیل است. در یک فرایند تولیدی انحرافات با دلایل مختلفی مثل مواد اولیه نامرغوب، راه‌اندازی نادرست، شوک‌های ناگهانی و نوسانات جریان برق ممکن است موجب خروج فرایند از حالت تحت کنترل شود. با فرض احتمال وقوع چند انحراف با دلیل^[۱۹]، مدلی که در سال‌های قبل برای یک انحراف با دلیل ارائه شده بود به مدلی با انحرافات با دلیل چندگانه گسترش یافت. مدل طراحی اقتصادی نمودار X با در نظر گرفتن انحرافات با دلیل چندگانه ارائه شد.^[۵] در پژوهشی دیگر، طراحی اقتصادی - آماری نمودارهای تطبیقی مورد بررسی واقع شد^[۲۰] و اثر متقابل انحرافات با دلیل مد نظر قرار گرفت. در ادامه، در جدول ۱، به منظور بهتر نشان

۳. شرح مدل

در این بخش ابتدا حدود کنترل تعیین و سپس تابع تعداد رویداد مشخص و در نتیجه زمان‌های اجرای pm تعیین و هزینه‌ی انجام هر pm محاسبه می‌شود. در ادامه با توجه به انحرافات با دلیل دوره‌های زمانی مشخص شده و پس از تعیین مقدار متغیرهای تصمیم شامل l تعداد رویدادها بین دو بار اجرای pm ، α خرابی نوع اول، m سطح فعالیت نگهداری - تعمیرات، تابع سود ساخته خواهد شد.

۱.۳. حدود کنترل

زمان بین رویدادهای متوالی (دو محصول نامنتطبق تولید شده) در این سیستم را با پارامتر t نشان می‌دهیم به گونه‌ی بی‌گانه‌ی که وقوع یک رویداد، یک توزیع پواسون همگن را دنبال می‌کند. در همین راستا مطابق مطالعات پیشین [۲۷] از یک نمودار نمایی برای تعیین حدود کنترل استفاده می‌شود و چون در این مدل کاربرد نمودار نمایی برای کنترل زمان بین دو رویداد است به عنوان حدود کنترل t چارت معرفی می‌شود. در ضمن با توجه به روال طراحی اقتصادی - آماری یک نمودار، حد کنترل پایین (LCL) و حد کنترل بالا (UCL) به صورت معادلات ۲ و ۳ و با استفاده از معادله‌ی ۱ به دست می‌آید.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda_{in} \cdot t} \quad (1)$$

$$UCL = T_U = -\frac{Ln\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)}{\lambda_{in}}, \quad 1 - e^{-\lambda_{in} \cdot UCL} = 1 - \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2)$$

$$LCL = T_L = -\frac{Ln\left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)}{\lambda_{in}}, \quad 1 - e^{-\lambda_{in} \cdot LCL} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (3)$$

در این مسئله هنگامی که زمان بین دو رویداد از حد کنترل LCL کمتر شود سیستم رو به وخامت می‌رود. در نتیجه حد کنترل LCL نسبتاً مهمتر از UCL است و طراحی یک نمودار t چارت صرفاً شامل تعیین مقدار (T_L) می‌شود. ارتباط یک به یک بین (T_L) و میزان هشدار اشتباه (α) نیز مطابق معادله‌ی ۴ است:

$$T_L = -\frac{Ln(1-\alpha)}{\lambda_{in}} \Rightarrow 1 - e^{-\lambda_{in} \cdot T_L} = \alpha \quad (4)$$

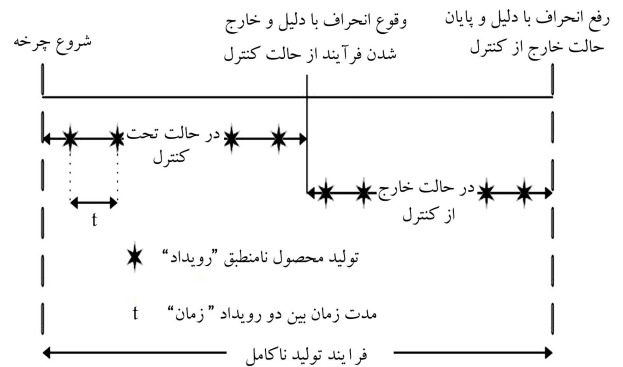
۲.۳. مدل‌سازی استراتژی نگهداری - تعمیرات

در این مطالعه برای نمایش اثر انجام فعالیت‌های pm از مفهوم عمر مجازی استفاده می‌شود. [۲۸، ۲۹] در این مقاله فعالیت‌های pm بعد از تعداد مشخصی از رویدادها اجرا می‌شود. در نتیجه مقاطع اجرای pm با توجه به $\frac{1}{\lambda_{in}} \cdot \left[\frac{i}{T}\right]$ در طول چرخه برنامه‌ریزی شده است. بدین ترتیب، نرخ شکست بعد از اجرای pm کاهش می‌یابد اما نه به اندازه کالای نو و به گونه‌ی بی‌گانه‌ی که تأثیر آن متناسب با درجه و سطح تعمیرات مشخص می‌شود. بنابراین قبل از $\left[\frac{i}{T}\right]$ امین فعالیت pm در حالت $\left[\frac{i}{T}\right] = \left[\frac{i}{T}\right]$ عمر مجازی برابر $\nu_0 = 0, \nu_{i-1} + \frac{1}{\lambda_{in}}$ محاسبه می‌شود. برای یک سطح مشخص pm ، عمر مجازی محصول برای حالت $\left[\frac{i}{T}\right] = \left[\frac{i}{T}\right]$ برای حالتی که $\left[\frac{i}{T}\right] \neq \left[\frac{i}{T}\right]$ طبق رابطه ۵ و ۶ به دست می‌آید:

$$\nu_i = \nu_{i-1} + \delta(m) \frac{1}{\lambda_{in}}, \nu_0 = 0, 0 \leq m \leq M, i > 2 \quad (5)$$

$$\nu_i = \nu_{i-1} + \frac{1}{\lambda_{in}} \nu_0 = 0 \quad (6)$$

که در آن، $\left[\frac{i}{T}\right] \frac{1}{\lambda_{in}}$ عمر واقعی محصول در زمان اجرای $\left[\frac{i}{T}\right]$ امین فعالیت pm و m نشان‌دهنده‌ی سطح pm است. همچنین $\delta(m)$ یک تابع نزولی از m و برابر



شکل ۱. نمایش یک فرایند ناکامل.

متداول برای افزایش تولید محصولات منطبق در سیستم‌های تولیدی هستند؛ در این نوشتار، این دو ابزار در یک فرایند با کیفیت بالا در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر به منظور نزدیکتر ساختن مسئله به دنیای واقعی، امکان رخداد چند انحراف با دلیل در چرخه‌ی تولید محصولات مورد بررسی قرار می‌گیرد. واضح است که یکی از ابزارهای کنترل آماری فرایندها، نمودارهای کنترلی است. رویکرد اقتصادی - آماری روشی است در جهت طراحی نمودارهای کنترلی، که با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری باعث افزایش اطمینان نمودارها می‌شود. در مدل‌های سنتی فرض کامل بودن فرایند وجود دارد، این بدان معناست که فرایند همواره تحت کنترل و خرابی ماشین در آن رخ نمی‌دهد.

چنین فرایندهایی به ندرت در محیط‌های واقعی صنعت وجود دارد. یک فرایند تولیدی معمولاً در حالت تحت کنترل شروع به کار می‌کند و پس از مدتی به دلیل نامناسب بودن مواد اولیه، اشتباهات کارگر، نوسانات برق و ... به حالت خارج از کنترل انحراف پیدا می‌کند. از این رو در این نوشتار مطابق شکل ۱، یک فرایند تولید ناکامل شامل: ۱. حالت تحت کنترل؛ ۲. حالت خارج از کنترل مورد بررسی قرار می‌گیرد. که از دو اصطلاح «رویداد» به معنای تولید محصول نامنتطبق است و اصطلاح «زمان» به معنای زمان بین دو رویداد متوالی استفاده می‌شود.

۱.۲. نشانه و مفروضات

قبل از توسعه‌ی مدل پیشنهادی ریاضی، نشانه‌های مورد استفاده برای شکل‌گیری مسئله در جدول ۲ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، علامت‌ها به سه بخش اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترها تقسیم می‌شود.

۲.۲. مفروضات

فرضیات در نظر گرفته شده در طرح مسئله به صورت خلاصه عبارت‌اند از:

- سیستم دارای دو حالت تحت کنترل و خارج از کنترل است، اما فرض بر این است که چرخه در حالت تحت کنترل شروع به کار می‌کند.
- تعداد خرابی‌ها از توزیع پواسون و زمان بین خرابی‌ها از توزیع نمایی پیروی می‌کند.
- نمونه‌گیری پس از وقوع هر رویداد انجام می‌شود.
- زمان قبل از وقوع هر انحراف با دلیل از توزیع وایبول پیروی می‌کند.

جدول ۲. نمادهای ریاضی.

اندیس‌ها	اندیس‌ها
i	اندیس رویدادها
j	اندیس زمان بین دو فعالیت‌های نگهداری - تعمیرات
C	اندیس انحراف با دلیل
متغیرهای تصمیم	
m	سطح انجام فعالیت نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه
α	خرابی نوع اول
l	تعداد رویدادها بین دو اجرای نگهداری - تعمیرات
پارامترها	
T_U, T_L	حدود پایین و بالا کنترل به ترتیب
M	تعداد رویدادهای مشاهده شده قبل از انحراف با دلیل
G	تعداد رویدادهای مشاهده شده در حالت خارج از کنترل
L	طول مورد انتظار یک چرخه‌ی عملیاتی
P	سود مورد انتظار یک چرخه‌ی عملیاتی
I	سود مورد انتظار در واحد زمان در یک چرخه‌ی عملیاتی
β	خطای نوع دوم
ATS_{out}	متوسط زمان تا صدور یک سیگنال در حالت خارج از کنترل
ATS_{in}	متوسط زمان تا صدور یک سیگنال در حالت تحت کنترل
$\lambda_{out}, \lambda_{in}$	نرخ وقوع رویداد هنگامی که سیستم به ترتیب در حالت کنترل و خارج از کنترل عمل می‌کند
λ_{am}	نرخ وقوع علت با دلیل، که کوچک‌تر از $(\lambda_{out}, \lambda_{in})$ است $(\lambda_{out} < \lambda_{in} < \lambda_{out})$
$\lambda_T(t)$	نرخ وقوع چندین علت با دلیل
V_{out}, V_{in}	میانگین سود برای زمان‌های که سیستم به ترتیب در حالت کنترل و خارج از کنترل عمل می‌کند
A_{in}	میانگین هزینه‌ی مربوط به هشدار اشتباه
A_{out}	میانگین هزینه‌ی مربوط به از بین بردن یک علت با دلیل
C_e	میانگین هزینه‌ی مربوط به یک رویداد مشاهده شده
C_{pm}	هزینه‌ی نگهداری - تعمیرات
H_{out}, H_{in}	ارزش تحمیل شده به ATS_{out} و ATS_{in}
t_δ	زمان مورد انتظار برای پیدا کردن و حذف یک علت با دلیل
پارامترها	
T_m	زمان بین دو فعالیت نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه (pm)
T_{mA}	زمان pm بعد از آخرین خرابی، قبل از وقوع علت با دلیل
T_{mL}	زمان pm بعد از وقوع علت با دلیل، قبل از اولین خرابی

۳.۳. هزینه‌ی نگهداری - تعمیرات پیشگیرانه

با توجه به [۳۰] برای یک فعالیت نگهداری - تعمیرات داده شده در سطح m، هزینه‌ی pm توسط معادله‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$Cp_j(m) = a + b(m) + c_j, j = 1, 2, \dots \quad (8)$$

a به عنوان هزینه‌ی ثابت، b(m) هزینه‌ی سهمی از بهبود است که توسط سطح m ایجاد شده و از طریق رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید:

$$b(m) = \frac{\beta' \cdot m}{1 - e^{-\phi[M-m]}} \rightarrow \beta' > 0, j = 1, 2, \dots$$

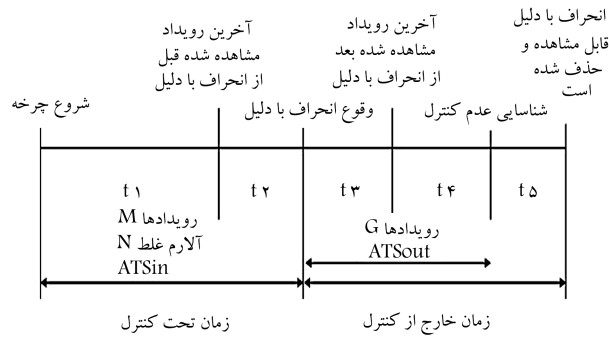
$$\beta' > 0, \phi > 0, 0 \leq m \leq M \quad (9)$$

که در آن β' و ϕ دو ثابت مثبت هستند. در حالتی که $m=0$ هیچ‌گونه بهبودی

بزرگ‌تر نمایان‌گر $\delta(m)$ است؛ از این رو مقدار m بزرگ‌تر نمایان‌گر $\delta(m)$ کم‌تر است. به طور خاص، اگر $M \rightarrow m$ شود در این حالت $\delta(M) = 0$ و هر عمل pm محصول را به حالت روز اول تبدیل می‌کند. اگر $m=0$ آن‌گاه $\delta(0) = 1$ و عملاً فعالیت pm مؤثر واقع نشده است. در حالی که در یک مفهوم عمومی $0 < m < M$ ، آیتم تا حدی بازسازی شده است، یعنی فعالیت pm ناقص است. سپس سن مجازی در زمان t یک متغیر تصادفی از زمان است) محاسبه می‌شود:

$$v(t) = v_{i-1} + \left(t - \frac{[t]}{\lambda_{in}} \cdot l \right) \quad (7)$$

که در آن، $v_{i-1} + \left(t - \frac{[t]}{\lambda_{in}} \cdot l \right)$ نمایان‌گر سن مجازی است و $\frac{[t]}{\lambda_{in}}$ عمر واقعی محصول، زمان اجرای $\frac{t}{l}$ امین فعالیت pm و m نشان‌دهنده‌ی سطح pm است.



شکل ۲. نمودار چرخه‌ی عملیاتی.

با توجه به این مسئله که هر سیستمی دارای اشتباهاتی است، تعداد احتمالی هشدارهای اشتباه توسط معادله‌ی ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$N = \alpha \cdot M \quad (16)$$

علاوه بر این، متوسط زمان تا اولین رویداد ($ATSin$) با استفاده از خطای نوع اول به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$ATSin = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{\lambda_{in}} = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_{in}} \quad (17)$$

مطابق شکل ۲، پس از این که یک انحراف با دلیل رخ می‌دهد، سیستم از کنترل خارج می‌شود. در همین راستا وقوع رویدادها از یک فرایند پواسون همگن پیروی می‌کنند. در ضمن احتمال وقوع هر انحراف با دلیل، نرخ وقوع رویداد مختص به خود را ایجاد می‌کند. در نتیجه زمان اولین وقوع پس از رخداد انحراف با دلیل تحت معادله‌ی ۱۸ به دست می‌آید:

$$\lambda_{out} = \sum_{m=1}^s \lambda'_{out}(m) \cdot \frac{\lambda_a(m)}{\lambda_T} \quad (18)$$

$$t_r = \frac{1}{\lambda_{out}}$$

در این حالت، تعداد مورد انتظار رویدادها هنگامی که فرایند خارج از کنترل است برابر با مقدار G می‌شود:

$$G = p_x + (1 - p_x) [2(1 - \beta)\beta + 4(1 - \beta)\beta^2 + \dots] \quad (الف)$$

در ادامه:

$$[2(1 - \beta)\beta + 4(1 - \beta)\beta^2 + \dots] \\ \Rightarrow 2(1 - \beta) + 3(1 - \beta)\beta + 4(1 - \beta)\beta^2 + \dots \\ \Rightarrow 2 - 2\beta + 3\beta - 3\beta^2 + 4\beta^2 - 4\beta^3 + \dots \\ \Rightarrow 1 + (1 + \beta + \beta^2 + \beta^3 + \beta^4 + \dots) \quad (ب)$$

همان طور که مشاهده می‌شود عبارت داخل پرانتز مجموع یک سری هندسی نامتناهی با قدرنسبت β است به شرطی که

$$-1 < \beta < 1 \\ [2(1 - \beta)\beta + 4(1 - \beta)\beta^2 + \dots] \Rightarrow 1 + \frac{1}{1 - \beta} \quad (ج)$$

حاصل نشده و $b(m)=0$ نتیجه می‌دهد. در حالتی که $m \rightarrow M$ شود محصول به حالتی بر می‌گردد که هیچ‌گونه شکست نداشته است $b(m \rightarrow \infty)$.

در معادله‌ی ۸، C_j نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی کسب دانش و مهارت‌های عملی لازم برای انجام فعالیت‌های نگهداری - تعمیرات است. با معرفی این پارامتر اثر یادگیری به صورت واقعی برآورد می‌شود و در واقع با هر فعالیت pm در اثر افزایش تجربه، هزینه‌های ارائه دهنده فعالیت‌های pm کاهش می‌یابد. طبق مرجع [۲۱] می‌توان این هزینه‌ها را به صورت منحنی یادگیری به صورت زیر بیان کرد.

$$c_j = c_1 \cdot j^{-\xi} \rightarrow \xi = \frac{\log^{\circ} r^{\wedge}}{\log^{\circ} 2}, j = 1, 2, \dots \quad (10)$$

C_1 مقداری ثابت و نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی یادگیری برای اولین اقدام است. باید توجه داشت که پارامترهای C_j و a مستقل از سطح pm هستند و نهایتاً هزینه‌ی pm در یک دوره‌ی مشخص مطابق معادله‌ی ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$Cpm(m) = \sum_{j=1}^m Cp_j(m) \quad (11)$$

در این مقاله فرض می‌شود که S انحراف با دلیل مختلف وجود دارد و زمان وقوع هر یک از انحرافات از یک توزیع وایبول و با پارامتر شکل ν و پارامتر مقیاس λ_{am} پیروی می‌کند.

$$\lambda_T = \sum_{c=1}^s \lambda_{am}(c) \quad (12)$$

علت وقوع برای هر انحراف مستقل از یکدیگر است. به همین دلیل در این فرایند زمانی که یک انحراف رخ می‌دهد انحرافات دیگر نمی‌توانند رخ دهند. همچنین برای محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال وقوع انحراف با دلیل از تابع نرخ وقوع خرابی وایبول به صورت $h(t) = \lambda_{am} \nu t^{\nu-1}$ استفاده می‌شود. احتمال این که سیستم تا زمان رویداد یک انحراف با دلیل همچنان در حالت کنترل (زمان وقوع انحراف با دلیل) باشد به صورت معادله‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$t_{in} = \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{i}{\lambda_{in}} + \int_{\frac{i}{\lambda_{in}}}^{\frac{i+1}{\lambda_{in}}} \nu(t) \cdot f(t) dt \right] \cdot \int_{\frac{i}{\lambda_{in}}}^{\frac{i+1}{\lambda_{in}}} f(t) dt \quad (13)$$

۴.۳. هزینه‌های چرخه

برای محاسبه تعداد رویدادها در یک بازه مشخص از توزیع ارلنگ با پارامترهای $\left(\beta = \frac{1}{\lambda_{in}}\right)$ ($\alpha = i + 1$) استفاده می‌شود به این صورت که رویدادها را با توجه به احتمال رخداد آن مشخص کرده و با توجه به زمان اتفاق افتادن انحراف با دلیل، احتمال تمام رویدادهای ماقبل محاسبه می‌شود (یعنی زمان کمتر از $1 +$ آمین رویداد بعد از آخرین رویداد در حالت کنترل باشد).

$$p(i) = p(t < t_{in}) \\ \frac{\gamma(i, \lambda_{in})}{(i-1)!} = 1 - \sum_{n=0}^{i-1} \frac{e^{-\lambda_{in}} (\lambda_{in})^n}{n!} \quad (14)$$

تعداد مورد انتظار رویداد در حالتی که فرایند تحت کنترل است مطابق معادله‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$M = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot p(i) \quad (15)$$

و با توجه به معادلات الف و ب و ج، معادله‌ی نهایی به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} &= p_x + (1 - p_x) \left[1 + \frac{1}{1 + e^{-\lambda_{out} \cdot T_L}} \right] \\ p_x &= \int_0^{T_1} p(T_r \leq T_1 - T_r | T_r = t) f(T_r = t) dt \end{aligned} \quad (19)$$

پس از محاسبه‌ی تعداد رویداد در حالت خارج از کنترل، مدت زمان تا شناسایی عدم کنترل، t_r از طریق معادله‌ی ۲۰ به دست می‌آید:

$$t_r = (G - 1) \cdot \frac{1}{\lambda_{out}} \quad (20)$$

متوسط زمان تا شناسایی عدم کنترل برای سیستم (ATS_{out}) مطابق رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید.

$$ATS_{out} = t_r + t_r = \frac{G}{\lambda_{out}} \quad (21)$$

فرض کنید که (t_5) مدت زمان مورد انتظار تا کشف دلیل خارج از کنترل و حذف انحراف با دلیل در این مقاله به عنوان یک پارامتر شناخته شده است. در نتیجه، طول مورد انتظار چرخه‌ی L برابر با مجموع تمام بازه‌های زمانی t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 در چرخه است.

$$L = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = t_{in} + ATS_{out} + t_5 \quad (22)$$

سود مورد انتظار در یک چرخه‌ی عملیاتی برابر p است و چنین محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} P &= V_{in} t_{in} + V_{out} [ATS_{out} + t_5] - A_{in} [N] \\ &- A_{out} - C_e [M + G] - C_{pm}(m) \end{aligned} \quad (23)$$

در نهایت، سود مورد انتظار در واحد زمان I در طول یک دوره عملیاتی برابر با نسبت سود مورد انتظار در طول چرخه‌ی p به طول مورد انتظار چرخه‌ی L است.

$$\begin{aligned} \max I &= \frac{P}{L} \\ ATS_{in} &\geq H_{in} \end{aligned} \quad (1-24)$$

$$ATS_{out} \leq H_{out} \quad (2-24) \quad (24)$$

H_{out} و H_{in} به ترتیب مقادیر هدف تحمیل شده روی ATS_{out} و ATS_{in} هستند.

۴. رویکرد حل

مدلی که در بخش سوم ارائه شد، پیچیدگی‌هایی دارد که مانع از حل آن به وسیله‌ی روش‌های دقیق می‌شود. یکی از پیچیدگی‌هایی که می‌توان به آن اشاره کرد قرار گرفتن متغیرهای تصمیم در حدود انتگرال تابع هدف است که با توجه به وجود متغیر تصمیم در حدود انتگرال، از رویکرد حل PSO استفاده کرده‌اند و به دلیل شباهت ماهیت دو مدل، برای حل این مدل نیز از رویکرد حل PSO استفاده می‌شود.

در نتیجه، واضح است که مدل با روش دقیق قابل حل نیست و زمان اجرای آن بسیار زیاد است. الگوریتم‌های فراابتکاری یکی از بهترین روش‌ها برای حل مسائل با پیچیدگی بالا است زیرا این الگوریتم‌ها می‌توانند نتایج مناسب را در زمان معقول به دست آورند.

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است. از مزیت‌های این الگوریتم می‌توان به عملکرد مناسب در بهینه‌سازی مدل‌های غیرخطی، سازگار جستجوی منحصر به فرد، سادگی روش، کارایی محاسباتی و سهولت در پیاده‌سازی اشاره کرد.^[۲۲] این الگوریتم یکی از محبوب‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که اخیراً در تحقیقات زیادی^[۲۳-۲۵] به کار رفته است.

بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که با الهام گرفتن از حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها توسعه یافته است. این الگوریتم از همکاری بین یک جمعیت که ذرات نامیده می‌شوند، برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم در یک فضای جواب استفاده می‌کند. در واقع در این الگوریتم ذرات با دنبال کردن ذرات بهینه‌ی فعلی در فضای جواب حرکت می‌کنند. هر ذره دارای یک مقدار ارزیابی^۱ است که با استفاده از تابع هدف به دست می‌آید و دارای یک بردار سرعت^۲ است که جهت حرکت آن را مشخص می‌کند.

PSO جستجوی محلی و سراسری را برای رسیدن به اثربخشی بیشتر ترکیب می‌کند. در این الگوریتم ابتدا جمعیتی از ذرات به صورت تصادفی تولید می‌شوند و سپس الگوریتم موقعیت ذرات را بر مبنای جهت فعلی ذره، بهترین جواب مشاهده شده آن ذره و بهترین جواب مشاهده شده در تمامی ذرات، به روز می‌کند تا به جستجوی جواب بهینه برسد. بهترین جواب مشاهده شده‌ی سراسری با عنوان g_{best} و بهترین جواب مشاهده شده ذره‌ی i نیز نام‌گذاری می‌شوند.

فرض کنید که در PSO اندازه جمعیت ذرات برابر با N_p باشد. $X_i^t = [m, \alpha, l]$ ، v_i^t و $p_{best}_i^t$ به ترتیب موقعیت (بردار متغیرهای تصمیم)، سرعت و بهترین جواب مشاهده شده‌ی ذره‌ی i در تکرار t ام را نشان می‌دهند. b_{up} و b_{lo} نیز به ترتیب بردار حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم هستند و g_{best}^t بهترین جواب مشاهده در سراسر ذرات تا تکرار t ام است. c_1 و c_2 فاکتورهای ادراک و یادگیری جمعی هستند که مجموع آنها معمولاً برابر ۴ در نظر گرفته می‌شود.^[۲۶] در نهایت w وزن اینرسی^۳ را نشان می‌دهد که مقدار آن در هر تکرار متفاوت است. مقدار وزن اینرسی در تکرار اول برابر با مقدار تعیین شده‌ی بین صفر و ۱ است و در هر تکرار بعدی به مقدار $w \times w_{damp}$ کاهش می‌یابد؛ w_{damp} مقداری مشخص و کمتر از ۱ است.

برای تولید جمعیت اولیه در PSO موقعیت هر ذره به صورت یک مقدار تصادفی از یک توزیع یکنواخت بین b_{up} و b_{lo} تولید می‌شود ($x_i^t \approx U(b_{lo}, b_{up})$) و p_{best}_i برای هر ذره برابر با موقعیت اولیه‌ی همان ذره قرار داده می‌شود ($p_{best}_i \rightarrow x_i$). مقدار g_{best} قبل از شروع فرایند برابر با بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود و به ازای هر ذره اگر $Z(p_{best}_i) \geq Z(g_{best})$ باشد g_{best} به روز می‌شود ($g_{best} \rightarrow p_{best}_i$). سرعت اولیه‌ی هر ذره برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود ($v_i = 0$). پس از تولید جمعیت اولیه، PSO وارد حلقه‌ی اصلی می‌شود که این حلقه تا زمان برقرار شدن شرایط نهایی ادامه می‌یابد. در هر تکرار با تولید مقادیر تصادفی $rand_p, rand_g \approx U(0, 1)$ سرعت ذره از طریق رابطه‌ی ۲۵ به روز می‌شود:

$$\begin{aligned} v_i^t &= w \cdot v_i^{t-1} + c_1 rand_p (p_{best}_i^{t-1} - x_i^{t-1}) \\ &+ c_2 rand_g (g_{best}^{t-1} - x_i^{t-1}) \end{aligned} \quad (25)$$

با داشتن سرعت، موقعیت ذره در هر تکرار به روز می‌شود ($x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$)

جدول ۳. مقادیر پارامترها در مثال عددی.

پارامتر	ϑ	a	β'	M'	ϕ
مقدار	۲	۲	۵	۵	۰,۱
پارامتر	C_e	V_{in}	V_{out}	A_{in}	A_{out}
مقدار	۱۰	۱۵	۵	۲۰	۳۰
پارامتر	$\lambda_{am \times 1} - \tau$				
مقدار	(۰, ۲, ۰, ۴۷۹۸, ۰, ۳۶۷۹, ۰, ۲۳۲۷, ۰, ۱۵۰۹, ۰, ۲۹۰۴, ۰, ۲۳۷۴)				
پارامتر	λ_{out}		C_1	λ_{in}	
مقدار	(۰, ۲, ۰, ۲۲, ۰, ۳, ۰, ۲۵, ۰, ۲, ۰, ۲, ۰, ۳۲)		۵	۰, ۰, ۲۱	

جدول ۴. مقدار بهینه.

مقادیر بهینه‌ی متغیر تصمیم			
l	α	m	متغیر تصمیم
۴۰	۰,۲۰۶۰	۳	مقدار بهینه
مقادیر بهینه‌ی تابع هدف			
سود چرخه	t_{in}	سود در واحد زمان	تابع هدف
۱۵۲۰۷۶۲۵۴۷	۱۰۱۳۸۴۴۷	۱۴۹/۹۹۹۵	مقدار بهینه

(ب) به تحلیل حساسیت روی شش پارامتر می‌پردازیم.

(ج) این زیربخش شامل دو مطالعه‌ی مقایسه‌ی است که هرکدام به دنبال بررسی و نمایش اثر: ۱. انجام نگهداری - تعمیرات؛ ۲. در نظر گرفتن طراحی اقتصادی - آماری.

۱.۵. مثال عددی

فرایند تولیدی را در نظر بگیرید که در آن وقوع چند انحراف با دلیل امکان پذیر است. متغیرهای تصادفی زمان تا رخداد هر یک از آنها مستقل و از توزیع وایبول پیروی می‌کنند. به منظور کنترل تعداد دفعات خرابی سیستم از دو ابزار نگهداری - تعمیرات و نمودار کنترل t استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای چارت کنترلی ذکر شده بر مبنای یک طرح اقتصادی - آماری تعیین می‌شود تا علاوه بر شاخص‌های کنترل کیفیت، هزینه‌ی تحمیل شده به سیستم نیز لحاظ شود. مقدار پارامترها در جدول ۳ نمایش داده می‌شود. [۱۵، ۲۳، ۳۰]

با توجه به پیچیدگی مدل این مسئله در نرم‌افزار MATLAB ۲۰۱۷ و با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) حل شده است و نتایج بهینه‌ی حاصل از حل آن به شرح جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس جواب‌های به دست آمده پیشنهاد می‌شود که پس از ۴۰ رویداد (1 نمایان گر تعداد رویدادهایی است که بین دو فعالیت نگهداری - تعمیرات اتفاق می‌افتد) عملیات نگهداری - تعمیرات در سطح ۳ اجرا شود. و همچنین خطای نوع اول در این مسئله مقدار ۰,۲۰۶۰ قرار داده شود تا با این مقادیر بهینه‌ی تابع هدف به بیشترین سود ممکن برسد.

۲.۵. تحلیل حساسیت

در این بخش، اثرات پارامترهای V_{out} , C_e , A_{out} , A_{in} , V_{in} , λ_{in} ذکر شده در

و اگر شرط $Z(x_i) \geq Z(pbest_i)$ برقرار باشد مقدار $pbest$ برای آن ذره به روز می‌شود ($pbest_i^t \rightarrow x_i^t$). پس از محاسبه‌ی ذره، مقدار آن با $gbest$ مقایسه می‌شود و در صورتی که $pbest$ کوچک‌تر باشد مقدار $gbest$ به روز می‌شود.

۱.۴. کاربرد PSO در حل مدل پیشنهادی

نمایش جواب یک فاکتور کلیدی در توسعه‌ی PSO است که می‌تواند رشتی از اعداد حقیقی و صحیح باشد. نمایش جواب برای مدل ارائه شده شامل رشته‌های سه‌بعدی است که هر بعد مربوط به یک متغیر تصمیم است. در مدل مذکور تعداد رویدادها بین دو بار انجام فعالیت‌های نگهداری - تعمیرات (1) و سطح فعالیت نگهداری - تعمیرات (m) اعداد صحیح هستند. از طرفی خرابی نوع اول (α) عدد حقیقی است. برای تولید مقدار اولیه‌ی متغیرهای تصمیم پیوسته یک مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت بین حد پایین و حد بالای این متغیرها تولید می‌شود. علاوه بر این برای تولید مقدار اولیه‌ی متغیرهای صحیح، یک مقدار تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ تولید می‌شود و با استفاده از آن مقدار متغیرهای l و m طبق روابط ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شود:

$$l = \min((l_{\min} + \text{floor}((l_{\max} - l_{\min} + 1) \times R_1)), l_{\max}) \quad (26)$$

$$m = \min((m_{\min} + \text{floor}((m_{\max} - m_{\min} + 1) \times R_2)), m_{\max}) \quad (27)$$

که در آن l_{\max} , l_{\min} , m_{\max} و m_{\min} به ترتیب حد پایین و بالای l و m هستند. همچنین R_1 و R_2 دو مقدار تصادفی هستند که از توزیع یکنواخت $U(0, 1)$ تبعیت می‌کند.

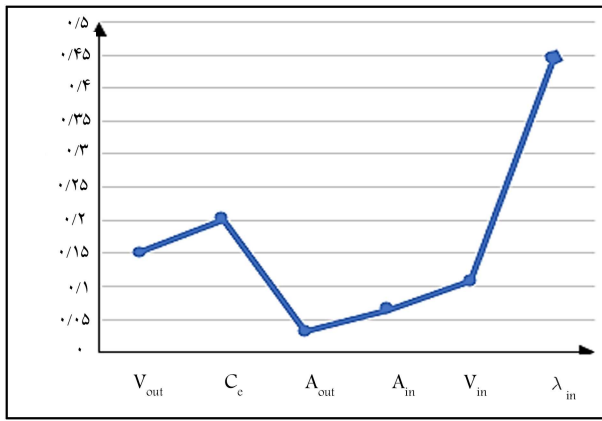
۵. کاربرد مدل

در این بخش، یک مثال عددی برای نشان دادن کاربرد مدل پیشنهادی ارائه شده است که در سه زیربخش الف تا ج تقسیم می‌شود:

الف) یک مثال عددی برای نشان دادن کاربرد پذیری مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. سپس، الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده و نتایج به دست آمده ثبت می‌شود.

جدول ۵. ایجاد مسئله توسط تاگوچی L_{27} .

شماره مسئله	V_{out}	C_e	A_{out}	A_{in}	V_{in}	λ_{in}
۱	۲۵	۱۰	۱۵	۵	۷۵	۰/۰۱۱
۲	۲۵	۱۰	۱۵	۵	۱۵۰	۰/۰۱۶
۳	۲۵	۱۰	۱۵	۵	۳۰۰	۰/۰۲۱
۴	۲۵	۲۰	۳۰	۱۰	۷۵	۰/۰۱۱
۵	۲۵	۲۰	۳۰	۱۰	۱۵۰	۰/۰۱۶
۶	۲۵	۲۰	۳۰	۱۰	۳۰۰	۰/۰۲۱
۷	۲۵	۴۰	۶۰	۲۰	۷۵	۰/۰۱۱
۸	۲۵	۴۰	۶۰	۲۰	۱۵۰	۰/۰۱۶
۹	۲۵	۴۰	۶۰	۲۰	۳۰۰	۰/۰۲۱
۱۰	۵۰	۱۰	۳۰	۲۰	۷۵	۰/۰۱۶
۱۱	۵۰	۱۰	۳۰	۲۰	۱۵۰	۰/۰۲۱
۱۲	۵۰	۱۰	۳۰	۲۰	۳۰۰	۰/۰۱۱
۱۳	۵۰	۲۰	۶۰	۵	۷۵	۰/۰۱۶
۱۴	۵۰	۲۰	۶۰	۵	۱۵۰	۰/۰۲۱
۱۵	۵۰	۲۰	۶۰	۵	۳۰۰	۰/۰۱۱
۱۶	۵۰	۴۰	۱۵	۱۰	۷۵	۰/۰۱۶
۱۷	۵۰	۴۰	۱۵	۱۰	۱۵۰	۰/۰۲۱
۱۸	۵۰	۴۰	۱۵	۱۰	۳۰۰	۰/۰۱۱
۱۹	۱۰۰	۱۰	۱۰	۶۰	۷۵	۰/۰۲۱
۲۰	۱۰۰	۱۰	۱۰	۶۰	۱۵۰	۰/۰۱۱
۲۱	۱۰۰	۱۰	۱۰	۶۰	۳۰۰	۰/۰۱۶
۲۲	۱۰۰	۲۰	۱۵	۲۰	۷۵	۰/۰۲۱
۲۳	۱۰۰	۲۰	۱۵	۲۰	۱۵۰	۰/۰۱۱
۲۴	۱۰۰	۲۰	۱۵	۲۰	۳۰۰	۰/۰۱۶
۲۵	۱۰۰	۴۰	۳۰	۵	۷۵	۰/۰۲۱
۲۶	۱۰۰	۴۰	۳۰	۵	۱۵۰	۰/۰۱۱
۲۷	۱۰۰	۴۰	۳۰	۵	۳۰۰	۰/۰۱۶



شکل ۳. نمایش گرافیکی اثر تغییر پارامترها بر بهبود سود در واحد زمان.

پارامتر شناخته می‌شود و هزینه‌ی از بین بردن انحرافات با دلیل (λ_{out}) کمترین میزان تأثیر را بر بهبود سود دارد.

۳.۵. مطالعه‌ی مقایسه‌ی

۱.۳.۵. اجرای نگهداری - تعمیرات

در این مطالعه‌ی مقایسه‌ی به منظور نمایش میزان تأثیر پذیری اجرا نگهداری - تعمیرات روی تابع هدف، مدل ارائه شده با مدل بدون در نظر گرفتن نگهداری - تعمیرات مطابق جدول ۷، در ۲۷ مسئله‌ی ارائه شده در جدول ۵ مقایسه می‌شود.

مطابق جدول ۷، برای ۲۷ مسئله‌ی مدل پیشنهادی در تابع هدف سود از مدل عدم اجرای pm عملکرد بهتری داشته است. در همین راستا، دامنه‌ی تغییرات بهبود سود برای ۲۷ مسئله، عددی بین $۱۰^{-۶} \times ۶/۹$ و $۱۰^{-۳} \times ۲/۶$ با میانگین $۱۰^{-۲} \times ۴/۴$ درصد بوده است که با توجه به اعداد در بدترین حالت اجرای pm برای طرفین قرارداد صرفه اقتصادی دارد.

اما نکته‌ی قابل توجه این است که این مقدار بهبود سود در طول چرخه افزایش چشمگیری داشته است. به طوری که دامنه‌ی بهبود بین ۷۰/۲۵۲ درصد تا ۱۴۱/۸۰۷۵ درصد و با میانگین ۱۰۸/۸۳۴۷ درصد بهبود است. در نتیجه اگر چه در واحد زمان بهبود اندک است اما در طول چرخه بهبود چشمگیری دارد.

بر اساس تجزیه و تحلیل جدول ۸ می‌توان دید که با ثابت ماندن H_{out} روی مقدار ۲۰ و با افزایش H_{in} از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰، مطابق انتظار، α یک روند کاهشی را دنبال می‌کند و بر اساس کاهش α مقدار $ATSi_n$ یک روند افزایشی و بهبود را طی کرده است. در نتیجه مقدار تابع هدف I روند افزایشی را دنبال می‌کند. بزرگترین مقدار بهبود مربوط به مسئله‌ی ۲۵ با میزان سود مدل پیشنهادی ۳۶۹۸۶۱/۷۶۰ بوده است در حالی که عدم اجرای pm باعث افزایش تعداد بار خرابی و در نتیجه افزایش هزینه‌های خرابی شده و سود تا ۳۱۴۴۵۲۵۶۸ کاهش می‌یابد.

۲.۳.۵. مطالعه‌ی مقایسه‌ی: در نظر گرفتن شاخص‌های آماری

به منظور نمایش میزان تأثیر پذیری در نظر گرفتن شاخص‌های آماری بر روی تابع هدف مدل ارائه شده با مدل اقتصادی مطابق جدول ۸ مقایسه می‌شود.

همچنین زمانی که H_{in} ثابت باقی‌ماند H_{out} روند کاهشی دارد. در نتیجه α بیشتر شده و مقدار $ATSi_n$ و مقدار بدتری را دنبال می‌کند و بنابراین مقدار تابع هدف I کمتر می‌شود علی‌رغم مقدار تابع سود در مدل‌های اقتصادی در قیاس با مدل اقتصادی - آماری تغییر محسوسی رخ نداده است. اما شاخص‌های آماری بهبود بهتری را نشان می‌دهد.

جدول ۵ بر روی تابع هدف بررسی می‌شود. برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته می‌شود که به عنوان مثال V_{out} شامل سه سطح ۲۵ و ۵۰ و ۱۰۰ است. که از یک طرح تاگوچی L_{27} مطابق با جدول ۵ برای تولید بیست و هفت نمونه مسئله استفاده می‌شود. قابل توجه است که مقدار سایر پارامترها در تمامی ۲۷ نمونه‌ی مسئله مطابق با جدول ۳ ثابت باقی مانده است.

با توجه به مقادیر پارامترهای جدول ۵، تابع هدف هر مسئله را محاسبه می‌کنیم و در ادامه به ازای هر سطح (۱،۲،۳) پارامترهای جدول ۵ میانگین تابع هدف را به دست آورده و در جدول ۶ ثبت می‌کنیم. به عنوان مثال، عدد ۲۴۹۴/۰ در جدول ۶ میانگین مقادیر تابع هدف در ردیف‌های ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۳، ۲، پارامتر C_e در سطح اول خود قرار گرفته است. سپس اختلاف بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف برای سه سطح هر پارامتر در سطر Δ محاسبه شده است. در نهایت میزان تأثیر پذیری پارامترهای مورد بررسی بر مبنای سطر Δ مشخص می‌شود و ترتیب تأثیرگذاری پارامترها روی تابع هدف مورد نظر در سطر رتبه‌بندی گزارش می‌شود.

طبق جدول ۶، زمانی که نرخ وقوع خرابی در حالت کنترل λ_{in} افزایش یابد سود نیز افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۳ نرخ وقوع خرابی در حالت کنترل (A_{in}) به عنوان مؤثرترین

جدول ۶. تأثیر پارامترها بر تابع هدف.

λ_{in}	V_{in}	A_{in}	A_{out}	C_e	V_{out}	سطح
۰٫۳۹۷	۰٫۳۹۷	۰٫۵۱۴۹	۰٫۴۰۲۲	۰٫۲۴۹۷	۰٫۲۶۴۴	۱
۰٫۲۷۲۸	۰٫۲۷۲۸	۰٫۴۳۲۹	۰٫۴۶۹۹	۰٫۳۸۴۸	۰٫۴۶۳۲	۲
۱٫۰۱۰۱	۰٫۲۰۴۹	۰٫۳۷۴۹	۰٫۴۵۰۶	۰٫۶۸۸۲	۰٫۵۹۵۱	۳
۰٫۹۷۰۴	۰٫۲۳۳۱	۰٫۱۳۹۹	۰٫۰۶۷۷	۰٫۴۳۸۶	۰٫۳۳۰۸	Δ
۱	۴	۵	۶	۲	۳	رتبه‌بندی

جدول ۷. مقایسه‌ی مدل پیشنهادی با مدل عدم اجرای نگهداری - تعمیرات.

درصد بهبود		مدل بدون اجرای pm			مدل پیشنهادی			مسئله	
سود در کل	مدت زمان تا اولین	سود در	مدت زمان تا اولین	سود در	مدت زمان تا اولین	سود در کل			
انحراف با دلیل	چرخه	واحد زمان	انحراف با دلیل	چرخه	واحد زمان	انحراف با دلیل	چرخه		
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 2/5$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۵۰۷۵۱۶۳۵۰۲۸	۷۴٫۹۹۹۹۵۰	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۸۶۴۰۵۶۷۴۳۸	۷۴٫۹۹۹۹۶۹	۱
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۷	$10^{-6} \times 8$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۲۰۷۷۹۷۲۱۲۵	۱۴۹٫۹۹۹۷۴۶	۲۹۷۴۰۸۸۴	۴۴۶۱۱۲۸۸۳۰	۱۴۹٫۹۹۹۸۶۶	۲
۱۴۱٫۸۰۱۳	۱۴۱٫۸۰۱۷	$10^{-2} \times 2/2$	۴۱۹۲۸۸۴	۱۲۵۷۸۶۱۳۳۵	۲۹۹٫۹۹۸۸۷	۱۰۱۳۸۴۴۷	۳۰۴۱۵۳۰۳۹۵	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۳
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲۱	$10^{-5} \times 5/7$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۵۰۷۵۱۶۳۹۶۷۲	۷۴٫۹۹۹۸۸۷	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۸۶۴۰۵۶۳۴۰۳	۷۴٫۹۹۹۹۳۰	۴
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۹	$10^{-2} \times 2$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۲۰۷۷۹۶۸۱۸۶	۱۴۹٫۹۹۹۴۱۳	۲۹۷۴۰۸۸۴	۴۴۶۱۱۰۲۴۶۷۲	۱۴۹٫۹۹۹۷۲۶	۵
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۲۲	$10^{-2} \times 4/2$	۴۱۹۲۸۸۴	۱۲۵۷۸۵۷۰۶۰	۲۹۹٫۹۹۷۸۵	۱۰۱۳۸۴۴۷	۳۰۴۱۵۲۶۱۱۹	۲۹۹٫۹۹۹۱۱۲	۶
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲۲	$10^{-2} \times 1/3$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۵۰۷۵۱۵۱۶۰۱	۷۴٫۹۹۹۶۷۸	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۸۶۴۰۵۵۵۳۳۲	۷۴٫۹۹۹۸۶۴	۷
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۷۳	$10^{-2} \times 4/2$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۲۰۷۷۹۵۹۸۱۵	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۱	۲۹۷۴۰۸۸۴	۴۴۶۱۱۱۶۳۰۴	۱۴۹٫۹۹۹۴۴۵	۸
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۳۹٫۶۵۶۶	$10^{-2} \times 8/6$	۴۱۹۲۸۸۴	۱۲۵۷۸۴۸۵۰۹	۲۹۹٫۹۹۵۸۱۵	۱۰۱۳۸۴۴۷	۳۰۴۱۵۱۷۵۶۹	۲۹۹٫۹۹۸۲۶	۹
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۹	$10^{-2} \times 2/3$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۱۰۳۸۹۸۳۷۰۲	۷۴٫۹۹۹۶۷۸	۲۹۷۴۰۸۸۴	۲۲۳۰۵۶۱۹۷۱	۷۴٫۹۹۹۸۴۹	۱۰
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۲۳	$10^{-2} \times 4/7$	۴۱۹۲۲۸۸۴	۶۲۸۹۲۷۹۸۹٫۱	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۰۱	۱۰۱۳۸۴۴۷	۱۵۲۰۷۶۲۵۴۸	۱۴۹٫۹۹۹۵۰۶	۱۱
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-6} \times 6/9$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۲۰۳۰۰۶۶۵۴۴۶	۲۹۹٫۹۹۹۹۴۷	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۳۴۵۶۲۲۸۰۴۰۹	۲۹۹٫۹۹۹۹۶۸	۱۲
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۷۵	$10^{-2} \times 4/9$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۱۰۳۸۹۷۸۵۶۲	۷۴٫۹۹۹۳۰۸۹	۲۹۷۴۰۸۸۴	۲۲۳۰۵۵۶۸۵۴	۷۴٫۹۹۹۶۷۹	۱۳
۷۰٫۲۵۱۹	۱۱۴٫۸۰۳۵	$10^{-2} \times 9/6$	۴۱۹۲۸۸۴	۶۲۸۹۲۷۴۸۷٫۱	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۱۰۱۳۸۴۴۷	۱۵۲۰۷۵۷۲۸۷	۱۴۹٫۹۹۹۸۹۸	۱۴
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 1/8$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۲۰۳۰۰۶۶۰۷۸۰	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۳۴۵۶۲۲۷۱۲۶۷	۲۹۹٫۹۹۹۹۲۸	۱۵
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۷۹	$10^{-2} \times 6/8$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۱۰۳۸۹۷۴۷۸۶	۷۴٫۹۹۹۸۶۴	۲۹۷۴۰۸۸۴	۲۲۳۰۵۵۳۰۷۷	۷۴٫۹۹۹۵۴۹	۱۶
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۴۳	$10^{-2} \times 1/3$	۴۱۹۲۸۸۴	۶۲۸۹۱۹۲۳۷٫۸	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۱۰۱۳۸۴۴۷	۱۵۲۰۷۵۳۸۰۲	۱۴۹٫۹۹۸۶۳۲	۱۷
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 2/6$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۲۰۳۰۰۶۵۶۳۹۱	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۳۴۵۶۲۲۷۱۲۶۴	۲۹۹٫۹۹۹۸۹۶	۱۸
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۳۹	$10^{-2} \times 1/1$	۴۱۹۲۸۸۴	۳۱۴۴۶۰۴۹۳	۷۴٫۹۹۹۸۶۴	۱۰۱۳۸۴۴۷	۷۶۰۳۷۷۵۸۳	۷۴٫۹۹۹۳۸۹	۱۹
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 1/9$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۱۰۱۵۰۳۲۹۷۶۹	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۱۷۲۸۱۱۳۶۳۸۰	۱۴۹٫۹۹۹۹۵	۲۰
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۶	$10^{-2} \times 7/8$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۴۱۵۵۹۴۶۹۷۰	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۲۹۷۴۰۸۸۴	۸۹۲۲۵۹۲۶۹	۲۹۹٫۹۹۹۸۰۵	۲۱
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۴۱	$10^{-5} \times 1/1$	۴۱۹۲۸۸۴	۳۱۴۴۶۰۰۸۹٫۷	۷۴٫۹۹۹۸۶۴	۱۰۱۳۸۴۴۷	۱۰۱۳۸۴۴۷٫۳	۷۴٫۹۹۹۳۶۹	۲۲
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 1/3$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۱۰۱۵۰۳۲۸۹۳۰	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۱۷۲۸۱۱۳۶۸۰	۱۴۹٫۹۹۹۹۵	۲۳
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۶	$10^{-5} \times 8/4$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۴۱۵۵۹۴۶۳۰۳	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۲۹۷۴۰۸۸۴	۸۹۲۲۵۹۲۶۹	۲۹۹٫۹۹۹۷۷۹	۲۴
۱۱۴٫۸۰۱۳	۱۱۴٫۸۰۷۵	$10^{-2} \times 2/6$	۴۱۹۲۸۸۴	۳۱۴۴۵۲۵۶۸	۷۴٫۹۹۹۸۶۴	۱۰۱۳۸۴۴۷	۷۶۰۳۶۹۸۶۱	۷۴٫۹۹۸۶۲۶	۲۵
۷۰٫۲۵۱۹	۷۰٫۲۵۲	$10^{-5} \times 5/3$	۶۷۶۶۸۸۹۸	۱۰۱۵۰۳۲۱۶۷۶	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۱۱۵۲۰۷۶۱۵	۱۷۲۸۱۱۲۹۱۱۱	۱۴۹٫۹۹۹۸۸۶	۲۶
۱۱۴٫۶۸۶۴	۱۱۴٫۶۸۶۸	$10^{-2} \times 1/7$	۱۳۸۵۳۱۷۴	۴۱۵۵۹۳۸۸۰۵	۲۹۹٫۹۹۹۰۰۷	۲۹۷۴۰۸۸۴	۸۹۲۲۵۷۸۹۵	۲۹۹٫۹۹۹۵۳۱	۲۷

جدول ۸. مقایسه‌ی مدل پیشنهادی با مدل اقتصادی.

ATS_{out}	ATS_{in}	I	m	α	l	H_{out}	H_{in}	
۱۰,۲۷	۷۸۷,۴۰	۱۴۹,۹۹۹۸۷۳	۳	۰,۱۲۷	۴۳	-	-	مدل اقتصادی
۱۰,۵۸	۱۱۲۳,۵۹	۱۴۹,۹۹۹۸۵۱	۲	۰,۰۸۹	۴۷	۲۰	۱۰۰۰	
۱۱,۲۶	۲۰۸۳,۳۳	۱۴۹,۹۹۹۸۰۵	۳	۰,۰۴۸	۴۴	۲۰	۲۰۰۰	
۱۵,۹۳	۳۰۷۶,۹۲	۱۴۹,۹۹۹۷۳۳	۳	۰,۰۳۲۵	۴۰	۲۰	۳۰۰۰	
۱۸,۶۲	۴۱۱۵,۲۲	۱۴۹,۹۹۹۶۶۱	۳	۰,۰۲۴۳	۳۹	۲۰	۴۰۰۰	
۱۹,۷۹	۵۴۰۵,۴۰	۱۴۹,۹۹۹۵۸۸	۴	۰,۰۱۸۵	۳۷	۲۰	۵۰۰۰	مدل اقتصادی - آماری
۹,۷۵	۵۹۸,۸۰	۱۴۹,۹۹۹۸۶۷	۳	۰,۱۶۷	۴۶	۱۰	۲۰۰	
۸,۲۸	۴۳۶,۶۸	۱۴۹,۹۹۹۸۵۶	۳	۰,۲۲۹	۴۸	۹	۲۰۰	
۷,۴۶	۲۶۹,۵۴	۱۴۹,۹۹۹۸۴۸	۳	۰,۳۷۱	۴۸	۸	۲۰۰	

زمان دارند. همچنین برای نمایش تأثیر پذیری مدل پیشنهادی دو مطالعه‌ی مقایسه‌ی با هدف زیر انجام شد.

در مطالعه‌ی مقایسه‌ی اول اهمیت اجرای فعالیت نگهداری - تعمیرات بر صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش سود مورد بررسی قرار گرفت نتایج حاصل از مقایسه نشان داد که اجرای فعالیت نگهداری - تعمیرات نسبت به عدم اجرای آن به طور میانگین ۱۰۸,۸۳۴۷ درصد بهبود حاصل می‌کند. نتایج حاصل از مطالعه‌ی مقایسه‌ی دوم نشان داد که اضافه کردن دو محدودیت آماری به مدل، علی‌رغم بهبود زیاد و چشمگیر مقادیر ATS_{in} و ATS_{out} ، تابع سود به مقدار خیلی کمی کاهش یافته است.

۶. نتیجه‌گیری

برای پر کردن خلاءهای موجود در ادبیات SPM، در این مطالعه طراحی اقتصادی - آماری نمودار کنترل t تحت یک فرایند تولید ناکامل در حضور چندین انحراف با دلیل مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، اجرای عملیات نگهداری - تعمیرات که در نرخ خرابی دستگاه متأثر بوده در نظر گرفته شد. در ادامه، بر روی شش پارامتر V_{out} و C_e ، A_{out} ، A_{in} ، V_{in} ، λ_{in} ، نتایج نشان داد که پارامتر نرخ وقوع خرابی در حالت کنترل λ_{in} بیشترین و پارامتر هزینه تولید محصول نامنطبق در حالت خارج از کنترل A_{out} کمترین اثر را بر سود در واحد

پانویس‌ها

1. preventive maintenance
2. fitness value
3. velocity
4. inertia weight

منابع (References)

1. Lee, P.H., Torng, C.C. and Liao, L.F., "An economic design of combined double sampling and variable sampling interval X control chart". *International Journal of Production Economics*, **138**, pp. 102-106 (2012).
2. Saniga, E.M., "Economic statistical control-chart designs with an application to \bar{X} and R charts" *Technometrics*, **31**, pp. 313-320 (1989).
3. Liu, L., Yu, M., Ma, Y. and et al. "Economic and economic-statistical designs of an X control chart for two-unit series systems with condition-based maintenance". *European Journal of Operational Research*, **226**, pp. 491-499 (2013).
4. Le, M.D. and Tan, C.M., "Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspection scheduling". *Reliability Engineering & System Safety*, **113**, pp. 21-29 (2013).
5. Chen, Y.S. and Yang, Y.M., "Economic design of x-control charts with Weibull in-control times when there are multiple assignable causes". *International Journal of Production Economics*, **77**, pp. 17-23 (2002).
6. Zhang, H.Y., Xie, M., Goh, T.N. and et al. "Economic design of time-between-events control chart system". *Computers & Industrial Engineering*, **60**, pp. 485-492 (2011).
7. Moghadam, M.B., Khadem, Y., Fani, S. and et al. "Effects of non-normality on economic and economic statistical designs of-control charts with multiple assignable causes and Weibull in-control times". *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, **47**, pp. 2055-2069 (2018).
8. Nenes, G., Tasiias, K.A. and Celano, G., "A general model for the economic-statistical design of adaptive control charts for processes subject to multiple assignable causes". *International Journal of Production Research*, **53**, pp. 2146-2164 (2015).
9. Tagaras, G., "An integrated cost model for the joint optimization of process control and maintenance". *Jour-*

- nal of the Operational Research Society, **39**, pp. 757-766 (1988).
10. Chiu, H.N. and Huang, B.S, "The economic design of x-control charts under a preventive maintenance policy". *International Journal of Quality & Reliability Management*, **13**, pp. 61-71 (1996).
 11. Ben-Daya, M. and Rahim, M.A, "Effect of maintenance on the economic design of x-control chart". *European Journal of Operational Research*, **120**, pp. 131-143 (2000).
 12. Linderman, K., McKone-Sweet, K.E. and Anderson, J.C, "An integrated systems approach to process control and maintenance". *European Journal of Operational Research*, **164**, pp. 324-340 (2005).
 13. Zhou, W.H. and Zhu, G.L, "Economic design of integrated model of control chart and maintenance management". *Mathematical and computer Modelling*, **47**, pp. 1389-1395 (2008).
 14. Xiang, Y, "Joint optimization of X^- control chart and preventive maintenance policies: A discrete-time Markov chain approach". *European Journal of Operational Research*, **229**, pp. 382-390 (2013).
 15. Salmasnia, A., Abdzadeh, B. and Namdar, M, "A joint design of production run length, maintenance policy and control chart with multiple assignable causes". *Journal of manufacturing systems*, **42**, pp. 44-56 (2017).
 16. Yin, H., Zhang, G., Zhu, H., and et al. "An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring". *Reliability Engineering & System Safety*, **133**, pp. 323-333 (2015).
 17. Salmasnia, A., Kaveie, M. and Namdar, M, "An integrated production and maintenance planning model under VP-T2 Hotelling chart". *Computers & Industrial Engineering*, **118**, pp. 89-103 (2018).
 18. Duncan, A.J, "The economic design of-charts when there is a multiplicity of assignable causes". *Journal of the American Statistical Association*, **66**, pp. 107-121 (1971).
 19. Nguyen, D.T., Dijoux, Y. and Fouladirad, M, "Analytical properties of an imperfect repair model and application in preventive maintenance scheduling". *European Journal of Operational Research*, **256**, pp. 439-453 (2017).
 20. Salmasnia, A., Soltany, F. and noroozi, M, "An economic-statistical model for production and maintenance planning under adaptive non-central chi-square control chart". *Journal of Industrial and Systems Engineering*, (2018).
 21. Zhang, C.W., Xie, M. and Goh, T.N, "Economic design of exponential charts for time between events monitoring". *International Journal of Production Research*, **43**, pp. 5019-5032 (2005).
 22. Zhou, X., Wu, C., Li, Y. and et al. "A preventive maintenance model for leased equipment subject to internal degradation and external shock damage". *Reliability Engineering & System Safety*, **154**, pp. 1-7 (2016).
 23. Zhang, C.W., Xie, M., Liu, J.Y. and et al. "A control chart for the Gamma distribution as a model of time between events". *International Journal of Production Research*, **45**, pp. 5649-5666 (2007).
 24. Khoo, M.B. and Xie, M, "A study of time-between-events control chart for the monitoring of regularly maintained systems". *Quality and Reliability Engineering International*, **25**, pp. 805-819 (2009).
 25. Lee, H. and Cha, J.H, "New stochastic models for preventive maintenance and maintenance optimization". *European Journal of Operational Research*, **255**, pp. 80-90 (2016).
 26. Xie, M., Goh, T.N. and Ranjan, P, "Some effective control procedures for reliability monitoring". *Reliability Engineering & System Safety*, **77**, pp. 143-150 (2002).
 27. Xie, M., Tang, X.Y. and Goh, T.N, "On economic design of cumulative count of conforming chart". *International Journal of Production Economics*, **72**, pp. 89-97 (2001).
 28. Kijima, M., Morimura, H. and Suzuki, Y, "Periodical replacement problem without assuming minimal repair". *European Journal of Operational Research*, **37**, pp. 194-203 (1988).
 29. Kijima, M., "Some results for repairable systems with general repair". *Journal of Applied probability*, **26**, pp. 89-102 (1989).
 30. Darghouth, M.N., Ait-Kadi, D. and Chelbi, A, "Joint optimization of design, warranty and price for products sold with maintenance service contracts". *Reliability Engineering & System Safety*, **165**, pp. 197-208 (2017).
 31. Wright, T.P, "Factors affecting the cost of airplanes". *Journal of the aeronautical sciences*, **3**, pp. 122-128 (1936).
 32. Talbi, E.G., *Metaheuristics: from design to implementation John Wiley & Sons*, **74** (2009).
 33. Ghodrattnama, A., Jolai, F. and Tavakkoli-Moghaddam, R, "Solving a new multi-objective multi-route flexible flow line problem by multi-objective particle swarm optimization and NSGA-II". *Journal of Manufacturing Systems*, **36**, pp. 189-202 (2015).
 34. Salmasnia, A., Hajhosseini, Z. and Namdar, M., "A joint determination of production cycle length, maintenance policy, and control chart parameters considering time value of money under stochastic shift size". *Scientia Iranica*, (2018).
 35. Perez, R.L. and Behdinan, K, "Particle swarm approach for structural design optimization". *Computers & Structures*, **85**, pp. 1579-1588 (2007).
 36. Eberhart, R. C., Shi, Y., and Kennedy, J, *Swarm Intelligence (Morgan Kaufmann series in evolutionary computation)*. Morgan Kaufmann Publishers. (2001).