Journal of Industrial Innovations

https://jii.araku.ac.ir

ISSN: 3092-7811

An Integrated Model of Quality Control, Maintenance and Inventory Considering Delays in Buffer Accumulation and Successive Inspections in a Two-Machine Series Production System

Shima Ghasemi [a], Fateme Rashidian [b*]

[a] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Qom University, Qom, Iran. shghasemi19sep93@gmail.com
[b] Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran. fatemerashidian@arakut.ac.ir

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Ghasemi Sh, Rashidian F. An Integrated Model of Quality Control, Maintenance and Inventory Considering Delays in Buffer Accumulation and Successive Inspections in a Two-Machine Series Production System. Journal of Industrial Innovations. 2026;4 (3):144-163.

https://doi.org/10.22034/jii.2026.736580

KEYWORDS

Buffer inventory;
Spare parts;
Maintenance planning;
Quality control.

ABSTRACT

In a two-machine serial production system comprising upstream and downstream machines, buffer and spare-parts inventories must be planned to prevent production interruptions during maintenance of the upstream machine. Accordingly, buffer accumulation is initiated at an optimal delayed time, allowing the downstream machine to continue operating with the accumulated inventory when an overhaul of the upstream machine becomes necessary.

In real-world manufacturing systems, process imperfections and unexpected disturbances may cause the production process to shift from an in-control to an out-of-control state. Therefore, successive inspections are conducted to detect changes in the upstream machine. Once a change is identified, a restoration action involving a spare part is implemented to return the machine to its in-control condition.

This study proposes an integrated framework for quality control, maintenance, buffer inventory, and spare-parts management in a two-machine serial production system, aiming to minimize the total cost over the production cycle. A numerical example from the automotive industry is solved using MATLAB and a particle swarm optimization (PSO) metaheuristic algorithm. Moreover, a comparative analysis is performed to examine the impact of delaying buffer accumulation. The results demonstrate that the proposed model achieves an average reduction of 19.41% in expected total cost compared with a similar model in which buffer accumulation starts without delay.

Extended Abstract

1. Introduction

In most organizations in a two-machine production system, controlling and investigating the buffer inventory and spare parts by preventing unnecessary maintenance reduces the costs of the production system and the organization. Furthermore, in a production system, the process may go out of control due to equipment failure, so quality control by successive inspections are necessary for better use of available resources and reduction of production costs.

Traditionally, buffer inventory, spare parts management, maintenance, and quality control have been investigated separately. Nevertheless, real-world manufacturing environments reveal strong interdependencies among these concepts. Lack of buffer inventory and critical spare parts during planned or unplanned maintenance can have a major impact on an organization efficiency.

* Corresponding author.
E-mail address: f_rashidian89@yahoo.com
DOI: https://doi.org/10.22034/jii.2026.736580
Received: May 17, 2026; Received in revised form: June 11, 2026; Accepted: June 13, 2026.
Article type: Research Paper

Therefore, to have a complete maintenance program, the level of availability of buffer stock and spare parts within a specified time interval is essential. Also, quality control directly affects both product quality and machine health. Therefore, integrating the concepts of maintenance policy, buffer inventory, spare parts, and quality control is essential to prevent production line stoppages, product quality, and reduce production costs.

2. Statement of the Problem

In many manufacturing systems, particularly two-machine series production systems with intermediate buffer, decision-making becomes complex due to the interaction among maintenance, buffer inventory, and quality control. Ignoring these interactions may lead to increased inventory costs, production of non-conforming items, stopping the production line, and higher maintenance costs.

The primary challenge addressed in this research is how to simultaneously determine quality control, maintenance planning, and inventory-related decisions within a unified framework. The objectives of the proposed model are twofold. The first objective is to prevent production line stoppage by buffer accumulation at optimal time and maintenance planning. The second objective is to minimize the expected total cost of production, including inspection cost, the expected cost of spare parts ordering, the expected production cost of non-conforming items, the expected cost of buffer inventory holding, and the expected restoration cost.

3. Methodology

This research develops a mathematical model for a two-machine series production system with intermediate buffer. The model simultaneously considers production rate decisions, buffer accumulation start time, restoration and overhaul activities scheduling under a successive inspection policy. Inspection times are modeled in a way that reflects their interaction with maintenance activities and quality control performance. The system performance deteriorates over time, which affects both production efficiency and the production of non-conforming items. Restoration and overhaul actions return the upstream machine condition to as-good-as new state.

The model is formulated as an optimization problem with the objective function of minimizing the expected total cost. An industrial example was given from Iran Khodro Crouse Company to evaluate the applicability and effectiveness of the proposed model. Also, a comparative study was conducted to investigate the Effect of delay in starting buffer accumulation.

4. Results

The results obtained from implementing the model in 18 stances generated using the design of experiment method and comparison between the proposed model and a model that starts buffer accumulation without delay and at time zero reveal several important findings.

The delay in starting the buffer accumulation in the proposed model led to a significant reduction in the expected cost of buffer holding. Furthermore, as number of inspections decreases, inspection cost, the expected costs of restoration and spare parts ordering also decreased.

Therefore, decreasing the number of inspections in the proposed model compared to without delay approach reduced all costs except for the expected production cost of non-conforming items. In the without delay approach, there are inspections from the beginning of the buffer accumulation to the end of production, which reduced the expected production cost of non-conforming items, Generally, the expected total cost was significantly reduced in the proposed model compared to the without delay model in starting buffer accumulation.

5. Conclusion

According to the results obtained from solving the model, we can understand the importance of using the model so that creating a buffer between two machines in series prevents the production line from stoppages.

Another of the advantages of this model is that successive inspections with the aim of detecting the upstream machine shifts lead to production line continuity and final product quality.

Considering buffer accumulation policy with delay and at optimal time is among the things that differentiate this model from other models. This policy leads to reduced costs of inspection, buffer inventory holding, restoration and spare parts ordering.

Considering the aforementioned concepts and their importance, in this research, a mathematical programming model was presented for an integrated model of quality control, maintenance, buffer inventory and spare parts under the delayed buffer in a two-machine series production system. For more efficiency, in future researches, models in which demand is uncertain and requires more than one spare part during process shift can be presented.

نوآوری‌های صنعتی
شاپا: ۷۸۱۱-۳۰۹۲

مدل یکپارچه کنترل کیفیت، نگهداری-تعمیرات، موجودی با در نظر گرفتن تأخیر در انباشت بافر و بازرسی‌های متوالی در یک سیستم تولید دو ماشینه سری

شیما قاسمی[الف]، فاطمه رشیدیان[ب*]

[الف] گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. shghasemi19sep93@gmail.com

[ب] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران. fatemerashidian@arakut.ac.ir

واژگان کلیدی

موجودی بافر؛
قطعات یدکی؛
برنامه‌ریزی نگهداری-تعمیرات؛
کنترل کیفیت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

چکیده

در یک سیستم تولید سری متشکل از دو ماشین بالادستی و پایین‌دستی، برنامه‌ریزی هم‌زمان موجودی بافر و قطعات یدکی نقش مهمی در جلوگیری از توقف خط تولید هنگام انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات ماشین بالادستی ایفا می‌کند. در این راستا، آغاز انباشت بافر در زمان بهینه و با تأخیر، امکان تداوم فعالیت ماشین پایین‌دستی را از طریق استفاده از موجودی بافر در زمان تعمیر اساسی ماشین بالادستی فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، با توجه به ماهیت ناقص فرآیندهای تولیدی در شرایط واقعی و احتمال خروج آن‌ها از وضعیت تحت کنترل در اثر بروز اختلالات، شناسایی تغییرات ماشین بالادستی از طریق بازرسی‌های متوالی ضروری است. پس از شناسایی تغییر، عملیات بازیابی با استفاده از قطعه یدکی انجام می‌شود تا ماشین مجدداً به وضعیت تحت کنترل بازگردد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف کمینه‌سازی هزینه کل طی چرخه تولید، یک رویکرد یکپارچه برای تصمیم‌گیری درباره کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات، موجودی بافر و قطعات یدکی در یک سیستم تولید دو ماشینه سری ارائه می‌دهد. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، یک مثال عددی مبتنی بر صنعت خودروسازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل شده و در ادامه، از طریق مطالعه‌ای تطبیقی، تأثیر تأخیر در آغاز انباشت بافر بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل مشابه فاقد تأخیر در شروع انباشت بافر، به‌طور متوسط هزینه کل مورد انتظار را ۱۹/۴۱ درصد بهبود می‌بخشد.

۱- مقدمه

در فضای رقابتی صنعت امروز، تولیدکنندگان در پی تدوین و به‌کارگیری سیاست‌های کارآمد تولید هستند تا هزینه‌های کل را در طول چرخه تولید به حداقل برسانند. بااین‌حال، در شرایط عملیاتی، احتمال خرابی تجهیزات و توقف موقت تولید وجود دارد؛ مسئله‌ای که ضرورت برنامه‌ریزی مناسب برای نگهداری و تعمیرات را به‌منظور پیشگیری از توقف‌های پیش‌بینی‌نشده و حفظ تداوم فرآیند تولید برجسته می‌سازد.

* نویسنده مسئول؛
آدرس پست الکترونیک: f_rashidian89@yahoo.com

با وجود اهمیت بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات، نادیده‌گرفتن برخی عوامل مرتبط می‌تواند به افزایش هزینه‌های کل سیستم منجر شود. موجودی قطعات یدکی از جمله این عوامل است؛ به‌طوری‌که کمبود قطعات موردنیاز، اجرای به‌موقع عملیات تعمیراتی را به تأخیر انداخته و قابلیت اطمینان یا دسترس‌پذیری سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، درحالی‌که نگهداری بیش‌ازحد این قطعات، هزینه‌های انبارداری و موجودی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، به‌منظور کاهش احتمال خرابی تجهیزات، معمولاً عملیات نگهداری پیشگیرانه در برنامه کاری ماشین‌آلات گنجانده می‌شود که اجرای آن ممکن است توقف موقت خط تولید را در پی داشته باشد. در چنین شرایطی، موجودی بافر به‌عنوان ابزاری برای کاهش اثر نوسانات عملیاتی و مواجهه با شرایط بحرانی به کار گرفته می‌شود. موجودی بافر یا کالای در جریان ساخت، به ارزش محصولات اطلاق می‌شود که فرآیند تولید آن‌ها آغاز شده، اما هنوز به مرحله تکمیل نرسیده است. در پژوهش حاضر، این موجودی به‌صورت محصولات نیمه‌ساخته ذخیره‌شده بین دو ماشین در یک سیستم تولید سری دوماشینه در نظر گرفته می‌شود. با وجود توقف یکی از ماشین‌ها، وجود بافر می‌تواند آثار ناشی از مدت‌زمان نگهداری و تعمیرات را بر عملکرد سیستم کاهش دهد. بر این اساس، به‌منظور ایجاد تعادل میان قابلیت اطمینان سیستم و هزینه‌های نگهداری موجودی، رویکرد بهینه‌سازی هم‌زمان برنامه نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی و بافر مورد توجه قرار می‌گیرد.

۲- مرور ادبیات

یکی از مراحل اساسی در انجام پژوهش‌های علمی، بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین و شناسایی خلأهای پژوهشی موجود در ادبیات موضوع است. بر همین اساس، در این فصل، پژوهش‌های مرتبط با بافر فاسدشدنی، مدیریت موجودی قطعات یدکی، نگهداری و تعمیرات و کنترل کیفیت بررسی می‌شوند. محورهای اصلی این مرور ادبیات عبارت‌اند از:

- ✓ مدل‌های تلفیقی موجودی بافر و نگهداری و تعمیرات
- ✓ مدل‌های تلفیقی موجودی قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات
- ✓ مدل‌های یکپارچه موجودی بافر، موجودی قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات
- ✓ مدل‌های تلفیقی کنترل کیفیت و نگهداری و تعمیرات

در سیستم‌های تولید سری دوماشینه، موجودی بافر شامل قطعات نیمه‌ساخته‌ای است که بین ماشین بالادستی و ماشین پایین‌دستی نگهداری می‌شوند. این موجودی توسط ماشین بالادستی تولید می‌شود تا در صورت بروز توقف‌های پیش‌بینی‌نشده، امکان تداوم فعالیت ماشین پایین‌دستی فراهم شود. ازآنجاکه انجام تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه می‌تواند موجب توقف موقت تجهیزات شود، تعیین ظرفیت مناسب بافر در طراحی خطوط تولید اهمیت زیادی دارد و بر عملکرد و نرخ تولید سیستم اثرگذار است. به همین دلیل، بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین بر بهینه‌سازی هم‌زمان موجودی بافر و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، ربریو و همکاران (۲۰۰۷) رویکردی برای بهینه‌سازی مشترک سیاست نگهداری و تعمیرات و اندازه بافر ورودی ارائه کردند [۱]. چلبی و همکاران (۲۰۰۴) نیز مدلی ریاضی توسعه دادند که در آن عملیات نگهداری پیشگیرانه به‌صورت دوره‌ای در خط تولید انجام می‌شود و مدت‌زمان تعمیرات اصلاحی و پیشگیرانه ماهیتی تصادفی دارد. در این مدل، برای کاهش اثر اختلالات ناشی از خرابی تجهیزات و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده و حفظ جریان پیوسته تولید با نرخ ثابت، از موجودی بافر استفاده می‌شود [۲]. زکوریا و همکاران (۲۰۰۸) سیاست بهینه نگهداری و تعمیرات و سطح مناسب موجودی بافر را در یک سیستم تولیدی بررسی کردند؛ به‌گونه‌ای که تقاضا در طول توقف ناشی از عملیات نگهداری و تعمیرات تأمین شود. در مطالعه آن‌ها، زمان انباشت بافر و اجرای عملیات نگهداری و تعمیرات تصادفی در نظر گرفته شده است [۳]. همچنین، هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف، رویکردی مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق ارائه کردند که هدف آن استخراج سیاست‌های مقرون‌به‌صرفه نگهداری و تعمیرات برای خطوط تولید سری دارای بافرهای میانی بود [۴].

مدیریت موجودی قطعات یدکی نیز به دلیل نیاز به تخصیص منابع قابل‌توجه در سازمان‌های صنعتی، از اهمیت ویژه‌ای

برخوردار است. در یک سیستم تولید سری دوماشینه، دسترسی به قطعات یدکی موردنیاز برای انجام عملیات نگهداری و تعمیرات ماشین بالادستی ضروری است. تصمیم‌گیری در این حوزه مستلزم ایجاد تعادل میان هزینه نگهداری قطعات در انبار و هزینه‌های ناشی از کمبود موجودی و تأمین‌نشدن به‌موقع قطعات است. ازاین‌رو، بهینه‌سازی هم‌زمان موجودی قطعات یدکی و سیاست‌های نگهداری و تعمیرات به یکی از موضوعات مورد توجه در پژوهش‌های پیشین تبدیل شده است. فرازون و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از اطلاعات وضعیت فنی تجهیزات حاصل از سامانه‌های نگهداری و تعمیرات هوشمند، روشی برای بهبود پیش‌بینی تقاضای قطعات یدکی و ارتقای برنامه‌ریزی زنجیره تأمین آن‌ها بررسی کردند [۵]. جیانگ و همکاران (۲۰۱۵) نیز مسئله بهینه‌سازی مشترک سیاست جایگزینی قطعات و سیاست‌های بازبینی دوره‌ای موجودی را در سیستم‌های چندواحدی با در نظر گرفتن خرابی قطعات یدکی مورد مطالعه قرار دادند [۶]. در ادامه این مسیر، هاو و همکاران (۲۰۲۳) به بهینه‌سازی هم‌زمان سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط و مدیریت موجودی قطعات یدکی پرداختند [۷].

دسترس‌پذیری سیستم‌های تولیدی تا حد زیادی به نحوه برنامه‌ریزی و اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات وابسته است. ازآنجاکه اجرای این فعالیت‌ها ممکن است به قطعات یدکی و موجودی بافر نیاز داشته باشد، هماهنگی میان برنامه نگهداری و تعمیرات و سیاست‌های تأمین این دو نوع موجودی اهمیت می‌یابد. برنامه‌ریزی نامناسب می‌تواند موجب اتلاف زمان در انتظار برای دسترسی به قطعات یدکی یا موجودی بافر هنگام تعمیر یا تعویض تجهیزات شود. در مقابل، نگهداری بیش‌ازحد موجودی، هزینه‌های انبارداری و نیاز به فضای ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که نحوه برداشت و تأمین اقلام انبار نیز می‌تواند بر عملکرد تولید و ارائه خدمات اثر بگذارد. این ملاحظات، زمینه‌ساز توسعه مدل‌های یکپارچه‌ای شده‌اند که موجودی بافر، موجودی قطعات یدکی و نگهداری و تعمیرات را به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرند. در این زمینه، گان و همکاران (۲۰۱۵) تعامل میان این سه مؤلفه را با هدف کمینه‌سازی هزینه مورد انتظار یک سیستم تولید سری دوماشینه بررسی کردند و برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک بهره گرفتند [۸]. کیسمولر و همکاران (۲۰۲۰) نیز خط تولیدی متشکل از دو ماشین مستعد خرابی را مطالعه کردند تا ظرفیت بهینه بافر و سطح مناسب موجودی قطعات یدکی تعیین شود [۹]. افزون بر این، گان و همکاران (۲۰۲۲) مدلی یکپارچه برای تصمیم‌گیری درباره سیاست‌های نگهداری و تعمیرات، موجودی بافر و مدیریت قطعات یدکی ارائه کردند [۱۰].

در محیط‌های واقعی تولید، فرض ثابت‌ماندن فرآیند در وضعیت تحت کنترل همواره برقرار نیست؛ زیرا عدم اطمینان عملکرد تجهیزات و وقوع اختلالات می‌تواند موجب خروج فرآیند از وضعیت کنترل‌شده و تولید محصولات نامنطبق شود. بنابراین، برای بازنمایی واقع‌بینانه‌تر شرایط تولید، شماری از پژوهشگران به تلفیق تصمیمات نگهداری و تعمیرات با کنترل کیفیت پرداخته‌اند. گیری و همکاران (۲۰۰۷) بازرسی‌های متوالی را در هر چرخه تولید برای ارزیابی وضعیت فرآیند در نظر گرفتند. در مدل آن‌ها، زمان انتقال فرآیند از وضعیت تحت کنترل به وضعیت خارج از کنترل از یک توزیع احتمالی با نرخ شکست افزایشی پیروی می‌کند. در صورت شناسایی وضعیت خارج از کنترل طی بازرسی، عملیات ترمیم انجام می‌شود و مسئله تحت دو سیاست بازرسی مدل‌سازی شده است [۱۱]. هادیان و همکاران (۲۰۲۱) نیز مدلی تصادفی برای تلفیق تصمیمات تولید، نگهداری و کنترل کیفیت در سیستم‌های تولیدی ناقص و غیرقابل‌اعتماد ارائه کردند. هدف آن‌ها یکپارچه‌سازی طراحی نمودار کنترل مبتنی بر بازرسی نمونه‌ای، برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات و تعیین سطح موجودی به‌منظور کمینه‌سازی هزینه کل بود [۱۲]. علاوه‌بر این مطالعات، پژوهش‌های ونگ و همکاران (۲۰۲۰)، چنگ و همکاران (۲۰۱۸)، شی و همکاران (۲۰۲۴) و وی و همکاران (۲۰۲۵) نیز به موضوعات مرتبط با این حوزه پرداخته‌اند [۱۳–۱۶].

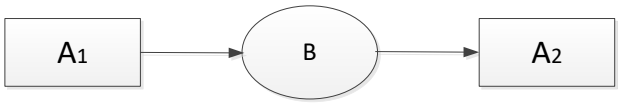
مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هر یک از پژوهش‌های یادشده، بخشی از ابعاد مهم مسئله، از جمله موجودی بافر، مدیریت قطعات یدکی، نگهداری و تعمیرات یا کنترل کیفیت را بررسی کرده‌اند؛ بااین‌حال، مطابق بررسی انجام‌شده در ادبیات مورد استناد این پژوهش، این مؤلفه‌ها به‌صورت هم‌زمان در یک چارچوب یکپارچه مورد توجه قرار نگرفته‌اند. ازاین‌رو، خلأ پژوهشی مورد نظر، توسعه مدلی است که بتواند تصمیمات مرتبط با کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات، موجودی بافر و قطعات یدکی را به‌طور هماهنگ در یک سیستم تولید سری دوماشینه بررسی کند. به‌منظور مقایسه ساختاریافته مطالعات پیشین و تبیین دقیق‌تر تفاوت آن‌ها با پژوهش حاضر، ویژگی‌های اصلی و ابعاد بررسی‌شده در مقالات مذکور به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱ خلاصه مرور ادبیات

مقالات	نگهداری-تعمیرات		موجودی		کنترل کیفیت
	اصلاحی	پیشگیرانه	قطعه یدکی	بافر	
ربریو و همکاران (۲۰۰۷)	✓	✓		✓	
چلبی و همکاران (۲۰۰۴)	✓	✓		✓	
زکوریا و همکاران (۲۰۰۸)		✓		✓	
هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓		✓	
فرازون و همکاران (۲۰۱۴)	✓	✓	✓		
جیانگ و همکاران (۲۰۱۵)		✓	✓		
هاو و همکاران (۲۰۲۳)	✓	✓	✓		
گان و همکاران (۲۰۱۵)	✓	✓	✓	✓	
کیسمولر و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	✓	✓	
گان و همکاران (۲۰۲۲)	✓	✓	✓	✓	
گیری و همکاران (۲۰۰۷)	✓	✓			✓
هادیان و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓			✓
ونگ و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓			✓
چنگ و همکاران (۲۰۱۸)	✓	✓			✓
شی و همکاران (۲۰۲۴)	✓	✓			✓
وی و همکاران (۲۰۲۵)	✓	✓			✓

۳- مدل سازی و فرمول‌بندی

در یک سیستم تولید دو ماشینه سری، برنامه‌ریزی موجودی بافر و قطعات یدکی باید به‌گونه‌ای انجام شود تا از اتلاف وقت برای دسترسی ماشین اول به قطعات‌یدکی هنگام خرابی و دسترسی ماشین دوم به موجودی بافر، هنگام تعمیر ماشین اول تا حد امکان جلوگیری شود. به‌عنوان‌مثال، ماشین اول پس از شروع تولید با تأخیر و در زمان بهینه شروع به انباشت بافر می‌کند تا در زمان عملیات نگهداری پیشگیرانه، ماشین دوم برای جلوگیری از اختلال در خط مونتاژ، از موجودی بافر استفاده نماید. موجودی بافر و قطعات یدکی دو عامل مهم مرتبط با فعالیت نگهداری-تعمیرات هستند و ممکن است هر دو بر هزینه سیستم تولید تأثیر زیادی بگذارند. شکل ۱ سیستم تولید دو ماشینه سری یکی به‌عنوان ماشین بالادستی و دیگری به‌عنوان ماشین پایین‌دستی را با بافر واسط نمایش می‌دهد.

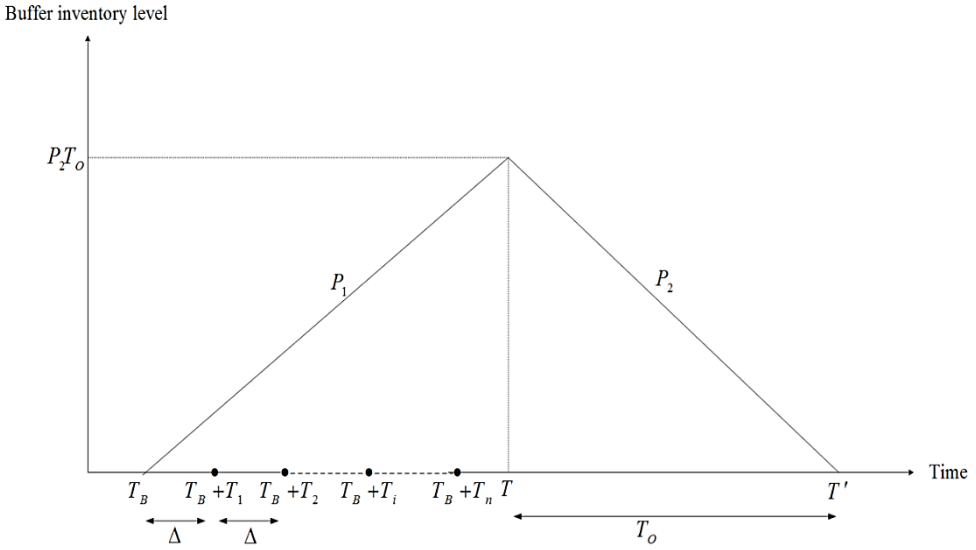


شکل ۱ سیستم تولید موردبررسی

ماشین A_1 برای رفع تقاضای ماشین A_2 قبل از زمان انباشت بافر با نرخ P_1' و در زمان انباشت بافر تا انتهای سیکل تولیدی با نرخ $P_1 > P_1'$ محصول تولید می‌کند که در این پژوهش اصطلاحاً به زمان قبل از انباشت بافر و زمان انباشت بافر تا انتهای سیکل تولیدی به ترتیب زمان بافر با تأخیر و زمان بعد از بافر با تأخیر گفته می‌شوند. همچنین در طول یک سیکل تولیدی ماشینA_2 با نرخ ثابت P_2 محصولات منطبق را مصرف می‌کند. زمانی که عملیات نگهداری-تعمیرات اعم از اقدامات اصلاحی بر روی ماشینA_1 انجام می‌شود، خط تولید متوقف نمی‌شود اما ماشینA_1 باید پس ازD واحد تولید اقلام منطبق و نامنطبق یا انتهای طول سیکل تولیدی، هرکدام زودتر رخ دهد؛ برای انجام عملیات نگهداری پیشگیرانه متوقف خواهد شد که در این پژوهش اقدامات اصلاحی و عملیات نگهداری پیشگیرانه به ترتیب عملیات بازسازی و تعمیر اساسی نام‌گذاری می‌شوند.

در این زمان ماشین A_2 جهت استمرار خط تولید از موجودی منطبق بافر استفاده می‌نماید. مدل پیشنهادی یک مدل مقدار

تولید اقتصادی(EMQ[1]) را در نظر می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر در مدل پیشنهادی سیستم تولید همیشه در حالت تحت‌کنترل باقی نمی‌ماند و ممکن است به حالت خارج از کنترل برود. بنابراین، موجودی بافر با مدت‌زمان صفر و در فاصله‌های زمانی ثابت بازرسی کامل می‌شوند. در هر بازرسی، اگر سیستم در حالت خارج از کنترل کشف شود، عملیات بازسازی روی ماشین A_1 انجام می‌شود؛ در غیر این صورت هیچ‌گونه فعالیتی به‌جز عملیات تعمیر اساسی در انتهای سیکل تولید، انجام نمی‌شود. در شکل ۲ مدل مقدار تولید اقتصادی با بازرسی‌ها در زمان‌های $T_1, T_2, \dots, T_n$ به نمایش گذاشته‌شده است.



شکل ۲ مدل مقدار تولید اقتصادی با بازرسی‌ها

۳-۱- فرضیات مدل‌سازی

- ماشین اول در حالت تحت‌کنترل شروع به تولید می‌کند و ممکن است در هر زمان تصادفی به حالت خارج از کنترل برود.
- برای هر بار عملیات بازسازی فقط به یک قطعه‌یدکی نیاز می‌باشد.
- زمان تحویل سفارش قطعات‌یدکی و عملیات‌ترمیم قابل‌اغماض فرض شده است.
- پس از عملیات بازسازی و تعمیر اساسی سیستم به حالت اولیه بازمی‌گردد.
- موجودی بافر و قطعات‌یدکی در شروع فرآیند تولید، صفر می‌باشد.
- در زمان شروع انباشت بافر (T_B)، عملیات بازسازی انجام می‌شود و نیز یک قطعه یدکی مصرف می‌شود. بنابراین، سیستم تولید در حالت اولیه قرار می‌گیرد.
- کمبود مجاز نمی‌باشد.
- ماشین دوم همواره با نرخ ثابت کار می‌کند و هرگز متوقف نخواهد شد.

۳-۲- اندیس‌های مدل

اندیس‌های مربوط به زمان‌های بازرسی i, j

۳-۳- پارامترهای فرآیند

متغیر تصادفی زمان تغییر فرآیند t

تابع توزیع زمانی که فرآیند به حال خارج از کنترل می‌رود $f(.), F(.)$

[1] Economic Manufacturing Quantity

$\bar{F}(.) = 1 - F(.)$	$\bar{F}(.)$
مدت‌زمان تأخیر در کشف شیفت	τ
مدت‌زمان مورد انتظار که فرآیند در حالت تحت کنترل است	$E(T_{in})$
مدت‌زمان مورد انتظار که فرآیند در حالت خارج کنترل است	$E(T_{out})$
زمان i ام بازرسی	T_i
مدت‌زمان عملیات تعمیر اساسی	T_O
نرخ تولید ماشین اول در زمان بافر با تأخیر	$P_1{}'$
نرخ تولید ماشین اول در زمان بعد از بافر با تأخیر	P_1
نرخ مصرف ماشین دوم	P_2
احتمال بازسازی در بازرسی‌ام	p_j
تعداد مورد انتظار بازسازی	$E(N_{rst})$
ظرفیت تولید ماشین اول در هر چرخه تولید	D
احتمال تولید اقلام نامنطبق زمانی که سیستم تحت کنترل است	θ_1
احتمال تولید اقلام نامنطبق زمانی که سیستم خارج از کنترل است	$\theta_2(> \theta_1)$

۳-٤- پارامترهای هزینه

هزینه هر بار بازرسی	V_0
هزینه هر بار سفارش دهی قطعه یدکی	C'
هزینه نگهداری هر واحد موجودی بافر در واحد زمان	h_B
هزینه هر واحد تولید اقلام نامنطبق	C_{nc}
تابع خطی هزینه بازسازی	$\Re(\tau) = \alpha_0 + \alpha_1\tau \alpha_0 > 0, \alpha_1 \geq 0$ $\Re(\tau) = \alpha_0 + \alpha_1\tau$
هزینه راه‌اندازی سرویس در هر چرخه تولید	C_S
هزینه بازرسی در هر چرخه تولید	C_I
هزینه مورد انتظار سفارش قطعات یدکی در هر چرخه تولید	$E(C_O)$
هزینه مورد انتظار نگهداری بافر در هر چرخه تولید	$E(C_{BI})$
هزینه مورد انتظار تولید اقلام نامنطبق در هر چرخه تولید	$E(C_{NC})$
هزینه مورد انتظار بازسازی در هر چرخه تولید	$E(C_{rst})$
هزینه کل مورد انتظار در هر چرخه تولید	ETC
هزینه ثابت تعمیر اساسی	$C_{Overhaul}$

۳-۵- متغیرهای تصمیم

طول چرخه تولید	T
زمان شروع انباشت بافر	T_B
فاصله بین دو بازرسی متوالی	Δ
تعداد بازرسی‌های انجام‌شده در هر چرخه تولید	$n \geq 1$

۳-٦- فرمول‌ها و روابط ریاضی

در مدل پیشنهادی، زمان تغییر فرآیند از حالت تحت کنترل به حالت خارج کنترل از توزیع وایبول با نرخ شکست افزایشی (IFR[1]) پیروی می‌کند.

$$f(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}e^{-\lambda t^{\beta}}t, \lambda > 0, \beta \geq 1 \quad (۱)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^{\beta}} \quad (۲)$$

۳-٦-۱- فرمول‌ها و روابط ریاضی

سناریو اول: متوسط زمان تحت کنترل بودن فرآیند تحت سناریو اول در بازه$(0, T_B)$، اگر بدانیم در آن زمان فرآیند خارج از کنترل می‌رود؛ از تقسیم امید ریاضی مدت‌زمانی که سیستم در حالت تحت کنترل است بر تابع چگالی احتمال زمان شیفت فرآیند، به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$E(T_{In_1}|0 < t < T_B) = \frac{\int_0^{T_B} tf(t)dt}{\int_0^{T_B} f(t)dt} \quad (۳)$$

همچنین متوسط زمان خارج از کنترل بودن فرآیند تحت سناریو اول در بازه $(0, T_B)$، اگر بدانیم در آن زمان فرآیند خارج از کنترل می‌رود؛ از تقسیم امید ریاضی مدت‌زمانی که سیستم در حالت خارج از کنترل است بر تابع چگالی احتمال زمان شیفت فرآیند، مطابق فرمول زیر به دست می‌آید.

$$E(T_{Out_1}|0 < t < T_B) = \frac{\int_0^{T_B} (T_B - t)f(t)dt}{\int_0^{T_B} f(t)dt} \quad (۴)$$

سناریو دوم: متوسط زمان تحت کنترل بودن فرآیند تحت سناریو دوم در بازه زمانی $(0, T_B)$، اگر بدانیم در آن زمان فرآیند خارج از کنترل نمی‌رود؛ برابر با کل بازه زمانی است.

$$E(T_{In_2}|t > T_B) = T_B \quad (۵)$$

و همچنین متوسط زمان خارج از کنترل بودن فرآیند تحت سناریو دوم در زمان $(0, T_B)$، اگر بدانیم در آن زمان فرآیند خارج از کنترل نمی‌رود؛ برابر با صفر است.

$$E(T_{Out_2}|t > T_B) = 0 \quad (۶)$$

احتمال رخداد هر سناریو مطابق توزیع تجمعی وایبول به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$ps_1 = 1 - e^{-\lambda T_B{}^{\beta}} \quad (۷)$$

$$ps_2 = 1 - ps_1 \quad (۸)$$

با توجه به محاسبه زمان تحت کنترل بودن و خارج از کنترل بودن تحت دو سناربو و احتمال رخداد آن‌ها، متوسط زمان تحت کنترل بودن و خارج کنترل بودن در زمان $(0, T_B)$ به‌صورت زیر نوشته می‌شود

$$E(T_{In}) = p_{s1}T_{In1} + p_{s2}T_{In2} \quad (۹)$$

$$E(T_{Out}) = p_{s1}T_{Out1} + p_{s2}T_{Out2} \quad (۱۰)$$

۳-٦-۲- نرخ تولید ماشین A_1 در زمان بافر با تأخیر

مطابق رابطه (۱۱)، نرخ تولید ماشین A_1 در زمان$(0, T_B)$ باید طوری محاسبه شود که مجموع مقدار محصولات منطبق

[1] Increasing Failure Rate

تولیدشده در حالت تحت کنترل بودن و خارج از کنترل بودن فرآیند، تقاضای ماشین A_2 را در زمان شروع تولید فرآیند تا شروع انباشت بافر فراهم نماید.

$$P_2T_B = P_1^{'}(1-\theta_1)T_{In} + P_1^{'}(1-\theta_2)T_{Out} \quad (۱۱)$$

که در رابطه بالا،$(P_1^{'}(1-\theta_1)T_{In} + P_1^{'}(1-\theta_2)T_{Out})$ و P_2T_B به ترتیب نشان‌دهنده مجموع مقدار محصولات تولیدشده در حالت تحت کنترل بودن و خارج از کنترل بودن فرآیند و تقاضای ماشینA_2 از زمان شروع تولید فرآیند تا شروع انباشت بافر هستند. بدین ترتیب، نرخ تولید ماشین اول در بازه زمانی $(0, T_B)$ به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$P_1^{'} = \frac{P_2T_B}{(1-\theta_1)T_{In} + (1-\theta_2)T_{Out}} \quad (۱۲)$$

۳-٦-۳- هزینه بازرسی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این مطالعه فرآیند تولید ناقص فرض شده است و ممکن است سیستم به حالت خارج کنترل برود. بنابراین، کنترل کیفیت به‌وسیله بازرسی‌های متوالی پس از شروع انباشت بافر در زمان (T_B, T) مفید می‌باشد و هزینه بازرسی در طول یک چرخه تولید از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$C_I = C_S + nV_0 \quad (۱۳)$$

و در رابطه زیر نحوه محاسبه تعداد واحدهای بازرسی در طول یک چرخه تولید نشان داده‌شده است.

$$n = \left\lfloor \frac{T - T_B}{\Delta} \right\rfloor \quad (۱۴)$$

۳-٦-٤- هزینه مورد انتظار سفارش قطعات یدکی

در هر بار بازرسی، در صورت نیاز به عملیات‌ترمیم، یک قطعه یدکی سفارش داده می‌شود. هزینه مورد انتظار سفارش قطعات یدکی در طول یک چرخه تولید مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E(C_O) = C^{'}[1 + (E(N_{R\,ST})] \quad (۱۵)$$

که در این رابطه $C^{'}$ هزینه ثابت هر بار سفارش دهی قطعات یدکی می‌باشد و $E(N_{R\,ST})$ امید ریاضی تعداد موردنیاز عملیات بازسازی می‌باشد که بر اساس پژوهش تسنگ (۱۹۹۶)، از طریق رابطه زیر قابل‌محاسبه است.

$$\begin{aligned} &p_0 = 1 \\ &p_1 = F(T_1) \\ &p_2 = F(T_2) - F(T_1) + p_1F(T_2 - T_1) \\ &\vdots \\ &p_j = \sum_{i=0}^{j-1} p_i\{F(T_j - T_i) - F(T_{j-1} - T_i)\} \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که در رابطه (۱۶) احتمال اینکه فرآیند تولید در زمان $T_j, j = 1,2,\dots,n$ ، نیاز به ترمیم داشته باشد باp_j نشان داده شده است و درنهایت$E(N_{R\,ST})$ مطابق با فرمول زیر خواهد شد.

$$E(N_{R\,ST}) = \sum_{j=0}^{n} P_j \quad (۱۷)$$

۳-٦-۵- هزینه مورد انتظار تولید اقلام نامنطبق

در هر بازرسی، اگر سیستم حالت خارج از کنترل را کشف کند؛ تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در اولین بازرسی، از مجموع

تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در زمانی که فرآیند تحت کنترل است و تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده درزمانی که فرآیند خارج از کنترل است، به دست می‌آید؛ در غیر این صورت، تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در اولین بازرسی، با تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در حالت تحت کنترل برابر است. بدین ترتیب تعداد اقلام نامنطبق در زمان $0, T_1$ به‌صورت رابطه زیر خواهد بود.

$$N_1 = \begin{cases} P_1\theta_1\tau_0 + P_1\theta_2(T_1 - \tau_0) & if\ T_0 < \tau_j \le T \\ P_1\theta_1 T_1 & if\ otherwise \end{cases} \quad (۱۸)$$

که در این رابطه، τ_j نشان‌دهنده زمان تصادفی رخداد اولین شیفت از حالت تحت کنترل به حالت خارج از کنترل می‌باشد در صورتی که‌ترمیم قبلی در زمان $T_j, j = 1,2, \dots, i-1$ انجام‌شده است. بنابراین برای محاسبه متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در زمان $0, T_1$ با انتگرال‌گیری از رابطه (۱۸) در بازه زمانی که فرآیند تحت کنترل و خارج از کنترل است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E(N_1) = \int_0^{T_1} \{P_1\theta_1\tau_0 + P_1\theta_2(T_1 - \tau_0)\}\, dF(\tau_0) + \int_{T_1}^{\infty} P_1\theta_1 T_1\, dF(\tau_0) \quad (۱۹)$$

مشابه رابطه (۱۸) تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در دومین بازرسی، مطابق رابطه زیر خواهد بود.

$$N_2 = \begin{cases} P_1\theta_1(\tau_j - T_{1-j}) + P_1\theta_2(T_2 - T_j - \tau_j) & if\ T_1 - T_j < \tau_j \le T_2 - T_j \\ P_1\theta_1(T_2 - T_1) & if\ \tau_j > T_2 - T_1 \quad j = 0,1 \end{cases} \quad (۲۰)$$

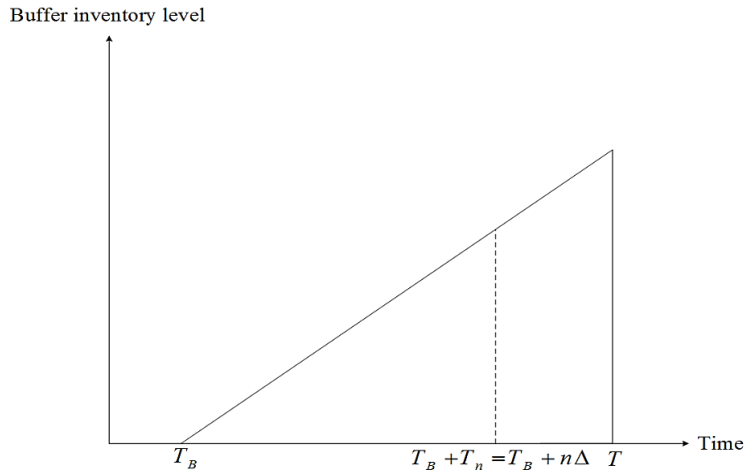
همچنین مشابه رابطه (۱۹) برای محاسبه متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در دومین بازرسی T_1, T_2 با انتگرال‌گیری از تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در دومین بازرسی در بازه زمانی که فرآیند تحت کنترل و خارج از کنترل است، به دست می‌آید.

$$E(N_2) = \sum_{j=0}^{1} P_j \int_{T_1 - T_j}^{T_2 - T_j} \{P_1\theta_1(\tau_j - T_{1-j}) + P_1\theta_2(T_2 - T_j - \tau_j)\}\, dF(\tau_j) + \sum_{j=0}^{1} P_j \int_{T_2 - T_j}^{\infty} P_1\theta_1\tau_0\,(T_2 - T_1) dF(\tau_j) \quad (۲۱)$$

با توجه به توضیحات بالا، متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در بازه زمانی $[T_{i-1}, T_i]$ از طریق رابطه (۲۲) قابل‌محاسبه خواهد بود.

$$E(N_i) = \sum_{j=0}^{i-1} P_j \int_{T_{i-1} - T_j}^{T_i - T_j} \{p_1\theta_1(\tau_j - T_{i-1-j}) + p_1\theta_2(T_i - T_j - \tau_j)\} dF(\tau_j) + \sum_{j=0}^{i-1} P_j \{p_1\theta_1(T_i - T_{i-1})\bar{F}(T_i - T_j)\} \quad (۲۲)$$

مطابق رابطه (۱۴)، تعداد واحدهای بازرسی (n) در بازه زمانی (T_B, T) ، یک مقدار صحیح می‌باشد. بنابراین با توجه به شکل ۳ زمان باقی‌مانده تا زمان T را در نظر می‌گیریم و محاسبات مرتبط را نیز در بازه زمانی (T_n, T) انجام می‌دهیم.



شکل ۳ زمان باقی‌مانده از آخرین بازرسی تا انتهای چرخه تولید

بنابراین متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در بازه زمانی T_n, T، به‌صورت زیر قابل‌محاسبه است.

$$E(N_{Last}) = \sum_{j=0}^{n} P_j \int_{T_n - T_j}^{T-T_B-T_j} \{P_1\theta_1(\tau_j - T_{n-j}) + P_1\theta_2(T - T_B - T_j - \tau_j)\} dF(\tau_j) + \sum_{j=0}^{n} P_j \{P_1\theta_1(T - T_B - T_n)\bar{F}(T - T_B - T_j)\} \quad (۲۳)$$

هزینه ثابت تولید هر واحد اقلام نامنطبق با علامت (C_{nc}) نشان داده می‌شود و تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در زمان $(0, T_B)$ از رابطه $P_1'\theta_1 T_{In} + P_1'\theta_2 T_{Out}$ به دست می‌آید که در این رابطه $P_1'\theta_1 T_{In}$ و $P_1'\theta_2 T_{Out}$ به ترتیب بیانگر تعداد نامنطبق تولیدشده در زمان تحت کنترل و تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در زمان خارج از کنترل هستند؛ بنابراین متوسط هزینه تولید اقلام نامنطبق در زمان $(0, T_B)$ از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E(C_{NC_0}) = C_{nc}[P_1'T_{In}\theta_1 + P_1'T_{Out}\theta_2] \quad (۲۴)$$

همچنین متوسط هزینه اقلام نامنطبق تولیدشده در زمان (T_B, T) از طریق رابطه $\sum_{i=1}^{n} EN_i + EN_{Last}$ به دست می‌آید.

در رابطه (۲۵)، $\sum_{i=1}^{n} EN_i$ و EN_{Last} به ترتیب نشان‌دهنده مجموع تعداد اقلام نامنطبق در بازه زمانی (T_B, T_n) و تعداد اقلام نامنطبق در بازه زمانی (T_n, T) هستند؛ بنابراین متوسط هزینه تولید اقلام نامنطبق در زمان (T_B, T) به‌صورت زیر خواهد بود.

$$E(C_{NC_1}) = C_{nc}\left[\sum_{i=1}^{n} EN_i + EN_{Last}\right] \quad (۲۵)$$

سرانجام، متوسط هزینه تولید اقلام نامنطبق در هر چرخه تولید، از مجموع متوسط هزینه‌های تولید اقلام نامنطبق در فاصله‌های زمانی $(0, T_B)$ و (T_B, T) به دست می‌آید.

$$E(C_{NC}) = E(C_{NC_0}) + E(C_{NC_1}) \quad (۲۶)$$

۳-۶-۶- نرخ تولید ماشین A_1 در زمان بعد از بافر با تأخیر

مطابق رابطه (۲۷)، نرخ تولید ماشین A_1 در زمان (T_B, T)، باید طوری محاسبه شود که مجموع مقدار محصولات منطبق تولیدشده که از کسر کردن مقدار محصولات تولیدشده از محصولات نامنطبق تولیدشده به دست می‌آید؛ تقاضای ماشین A_2 را در بازه زمانی که ماشین A_1 به دلیل عملیات تعمیر اساسی متوقف‌شده است و همچنین درزمانی که ماشین A_1 تا انتهای تولید شروع به انباشت بافر می‌نماید، فراهم کند.

$$T_O P_2 + P_2(T - T_B) = P_1\Delta - E(N_1) + P_1\Delta - E(N_2) + \cdots + P_1\Delta - E(N_n) + P_1(T - T_B - n\Delta) - E(N_{Last})$$

$$T_O P_2 + P_2(T - T_B) = \sum_{i=1}^{n}\{P_1\Delta - E(N_i)\} + P_1(T - T_B - n\Delta) - E(N_{Last}) \quad (۲۷)$$

$$T_O P_2 + P_2(T - T_B) = nP_1\Delta + P_1(T - T_B - n\Delta) - \left[\sum_{i=1}^{n} E(N_i) - E(N_{Last})\right]$$

که در رابطه (۲۷)، $P_1\Delta$ مقدار محصولات تولیدشده، $T_O P$ تقاضای ماشین A_2 در زمان عملیات تعمیر اساسی و $P_2(T - T_B)$ تقاضای ماشین A_2 در زمان شروع انباشت بافر تا انتهای تولید را نشان می‌دهد.

برای محاسبه روابط ریاضی بالا و به دست آوردن نرخ تولید، می‌بایست به‌صورت زیر نرخ تولید را از متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده $(\sum_{i=1}^{n} EN_i + EN_{Last})$ فاکتور بگیریم.

$$A_1 + A_2 = \sum_{i=1}^{n}\left\{\sum_{j=0}^{i-1} P_j\left[\int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j}\{\theta_1(\tau_j - T_{i-1-j}) + \theta_2(T_i - T_j - \tau_j)\}dF(\tau_j) + \theta_1(T_i - T_{i-1})\bar{F}(T_i - T_j)\right]\right\} + \sum_{j=0}^{n} P_j\left[\int_{T_n-T_j}^{T-T_B-T_j}\{\theta_1(\tau_j - T_{n-j}) + \theta_2(T - T_B - T_j - \tau_j)\}f(\tau_j)d\tau_j + \theta_1(T - T_B - T_n)\bar{F}(T - T_B - T_j)\right] \quad (۲۸)$$

با ساده‌سازی روابط ریاضی بالا، نرخ تولید ماشین A_1 در زمان (T_B, T) از طریق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T_O P_2 + P_2(T - T_B) = nP_1\Delta + P_1(T - T_B - n\Delta) - P_1(A_1 + A_2)$$

$$P_1 = \frac{T_O P_2 + P_2(T - T_B)}{(T - T_B) - (A1 + A2)} \quad (۲۹)$$

۳-۶-۷- هزینه مورد انتظار عملیات بازسازی

در هر بازرسی، اگر سیستم حالت خارج از کنترل را کشف کند؛ عملیات بازسازی انجام می‌شود. بنابراین در صورت نیاز به عملیات بازسازی در اولین بازرسی، برای محاسبه متوسط هزینه عملیات بازسازی در زمان $0, T_1$، از ضرب تابع خطی هزینه عملیات بازسازی$(\Re)$ در زمان خارج از کنترل بودن فرآیند به‌صورت زیر در بازه زمانی $0, T_1$ انتگرال می‌گیریم.

$$E(C_{RST}) = \int_0^{T_1}\{\Re(T_1 - \tau_0)\}\, dF(\tau_0) \quad (۳۰)$$

همچنین مشابه رابطه بالا برای محاسبه هزینه مورد انتظار عملیات بازسازی در زمان T_1, T_2، از ضرب تابع خطی هزینه عملیات بازسازی$(\Re)$ در زمان خارج از کنترل بودن فرآیند به‌صورت زیر در بازه زمانی T_1, T_2انتگرال می‌گیریم.

$$E(C_{RST}) = \sum_{j=0}^{1} P_j \int_{T_1-T_j}^{T_2-T_j} \Re\left(T_2 - T_j - \tau_j\right) dF(\tau_j) \quad (۳۱)$$

با توجه به توضیحات بالا، هزینه مورد انتظار عملیات بازسازی در بازه زمانی $(T_{i-1}, T_i]$ از طریق فرمول زیر قابل‌محاسبه خواهد بود.

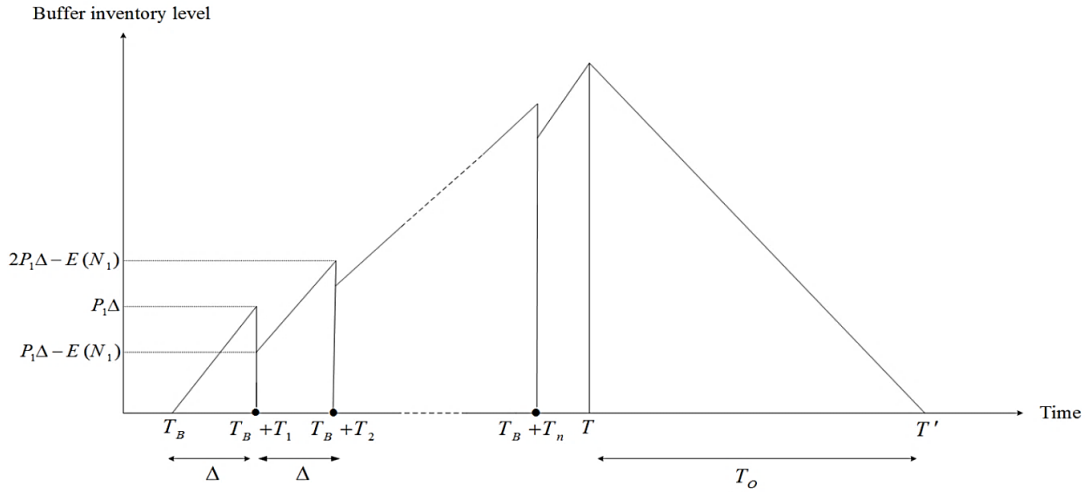
$$E(C_{R\,ST}) = \sum_{j=0}^{i-1} P_j \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} \Re\left(T_i - T_j - \tau_j\right) dF(\tau_j) \qquad (۳۲)$$

مطابق رابطه (۳۲) متوسط تعداد اقلام نامنطبق تولیدشده در زمان (T_B, T_n) به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$E(C_{R\,ST}) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0}^{i-1} P_j \int_{T_{i-1}-T_j}^{T_i-T_j} \Re\left(T_i - T_j - \tau_j\right) dF(\tau_j) \qquad (۳۳)$$

۳-۶-۸- هزینه مورد انتظار نگهداری بافر

برای به دست آوردن متوسط هزینه نگهداری موجودی بافر در بازه زمانی $(0, n\Delta)$ باید مساحت زیر منحنی موجودی بافر را در بازه زمانی $(0, n\Delta)$ مطابق شکل ۴ محاسبه نماییم.



شکل ۴ منحنی موجودی بافر

بنابراین، مساحت‌های مثلث‌های کوچک زیر منحنی موجودی مطابق معادله زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 + S_3 + \cdots + S_i + \cdots + S_n \\ S &= \frac{1}{2}\Delta[P_1\Delta] \\ &+ \frac{1}{2}\Delta[\{P_1\Delta - E(N_1)\} + P_1\Delta - E(N_1) + P_1\Delta] \\ &+ \frac{1}{2}\Delta[\{2P_1\Delta - E(N_1) - E(N_2)\} + 2P_1\Delta - E(N_1) \\ &\qquad - E(N_2) + P_1\Delta] \\ &+ \ldots + \frac{1}{2}\Delta\left[(2i-1)P_1\Delta - 2\sum_{j=1}^{i-1} E(N_j)\right] \\ &\qquad + \cdots \frac{1}{2}\Delta\left[(2n-1)P_1\Delta \right. \\ &\qquad \left. - 2\sum_{j=1}^{n-1} E(N_j)\right] \end{aligned} \qquad (۳۴)$$

که درنهایت هزینه مورد انتظار نگهداری موجودی بافر در بازه $(0, n\Delta)$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E(C_{BI_0}) = \frac{h_B \Delta}{2}\left[\sum_{i=1}^{n}\left\{(2i-1)P_1\Delta - 2\sum_{j=1}^{i-1}E(N_j)\right\}\right] \quad (۳۵)$$

همچنین برای محاسبه هزینه مورد انتظار نگهداری موجودی بافر در زمان $(n\Delta, T)$، به‌صورت زیر مساحت مثلث کوچک در بازه زمانی $(n\Delta, T)$، با هزینه نگهداری هر واحد موجودی بافر در واحد زمان ضرب می‌شود.

$$E(C_{BI_1}) = \frac{h_B}{2}\left[(T - T_B - n\Delta)\left\{(n\Delta P_1 - \sum_{i=1}^{n}E(N_i)) + n\Delta P_1 - \sum_{i=1}^{n}E(N_i) + P_1(T - T_B - n\Delta)\right\}\right] \quad (۳۶)$$

سرانجام، هزینه مورد انتظار نگهداری موجودی بافر در هرچرخه تولید، از مجموع متوسط هزینه‌های نگهداری در فاصله‌های زمانی $(0, n\Delta)$ و $(n\Delta, T)$ به دست می‌آید.

$$E(C_{BI}) = E(C_{BI_0}) + E(C_{BI_1}) \quad (۳۷)$$

۳-۶-۹- تابع هدف و محدودیت‌ها

$$Min\ ETC = \frac{[C_I + E(C_O) + E(C_{NC}) + E(C_{BI}) + E(C_{RST}) + C_{Overhaul}]}{T + T_O} \quad (۳۸)$$

$$P_1' T_B + P_1(T - T_B) \le D \quad (۳۹)$$

$$T > 0, T_B > 0, \Delta > 0 \quad (۴۰)$$

همان‌طور که در رابطه (۳۸) مشخص است، تابع هدف حداقل کردن هزینه‌های مورد انتظار برای هر چرخه تولید در واحد زمان است که در آن $C_{Overhaul}$ هزینه ثابت تعمیر اساسی می‌باشد. محدودیت (۳۹) تضمین‌کننده این است که ماشین A_1 پس از تولید اقلامی با اندازه D (محصولات منطبق یا نامنطبق) در انتهای چرخه تولید برای عملیات تعمیر اساسی متوقف می‌شود. بنابراین، مجموع اقلام تولید شده در فاصله‌های زمانی $(0, T_B)$ و (T_B, T) می‌بایست کوچکتر یا مساوی اندازه تولید D باشند. همچنین محدودیت (۴۰) نیز حدود متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

٤- حل مدل

برای نشان دادن صحت مدل ارائه‌شده، یک مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار متلب و به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO[1])، حل‌شده است. برای نشان دادن کاربرد مدل پیشنهادی، یک مثال عددی از صنعت خودروسازی ایران مربوط به شرکت کروز ایران‌خودرو ارائه‌شده است. در این مثال فرض شده است دریکی از خطوط تولید گیربکس شرکت کروز، دو ماشین فرز به‌صورت سری قرارگرفته‌اند که ماشین اول مجهز به تیغه‌های برش الماسه است. تیغه ماشین فرز اول در حین تولید قطعه برای مصرف ماشین فرز دوم و انباشت بافر ممکن است کند شود و نیاز به تعویض داشته باشد تا کیفیت محصول نهایی حفظ گردد. بنابراین بازرسی‌های متوالی بافاصله زمانی ثابت صورت می‌گیرد تا در صورت شیفت فرآیند تولید و نیاز به بازسازی، تعویض قطعه یا همان تیغه برش الماسه انجام شود. همچنین، در زمان توقف برنامه‌ریزی‌شده یا پس از تولید ۱۰۰۰ قطعه، اپراتور نسبت به تعویض فیلتر مدار سیال خنک کاری ماشین فرز اول اقدام می‌نماید. این فرآیند تعویض حدود ۴ دقیقه به طول می‌انجامد که در این زمان برای جلوگیری از توقف خط تولید، ماشین فرز دوم برای استمرار تولید از بافر تولیدشده توسط ماشین فرز اول استفاده می‌نماید.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، زمان رخداد شیفت فرآیند تولید از حالت تحت کنترل به حالت خارج از کنترل در ماشین فرز

[1] Particle Swarm Optimization

اول، از یک توزیع وایبول با پارامترهای $\beta \geq 1$ و $\lambda > 0$ پیروی می‌کند. مقادیر پارامترهای مربوط به مثال صنعتی ذکرشده در جدول ۲ خلاصه‌شده است.

جدول ۲ مقادیر پارامترها در مثال عددی

پارامتر	β	λ	C'	C_S	V_0	C_{nc}	h_B
مقدار	۲	۰.۰۵	۸۰	۱۵۰	۲۵	۱.۵	۰.۰۷
پارامتر	θ_1	θ_2	α_0	α_1	T_O	D	P_2
مقدار	۰.۰۵	۰.۹۵	۱۰۰	۱۵	۴	۹۰۰	۹

مثال صنعتی مذکور با استفاده از نرم‌افزار و به‌کارگیری الگوریتم حل‌شده است و نتایج مربوط به متغیرهای تصمیم‌گیری ازجمله طول چرخه تولید ماشین فرز اول، شروع انباشت بافر و فاصله بین دو بازرسی متوالی به‌صورت زیر ارائه‌شده است:

$$\{T, T_B, \Delta\} = \{41.75, 11.27, 1.39\}, ETC^* = 53.45$$

در این بخش به‌منظور اثربخشی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از آن توسط چندین مثال موردبررسی قرار می‌گیرد. در این راستا طراحی آزمایش(DOE [1]) به‌عنوان ابزار شناخته‌شده جهت تغییرات هدفمند در پارامترهای مدل، مورداستفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده‌شده است، هجده نمونه تولیدشده با استفاده از روش DOE برای مطالعه مقایسه‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۳ مثال‌های تولیدشده با استفاده از روش DOE

مثال	V_0	h_B	C'	C_{nc}	مثال	V_0	h_B	C'	C_{nc}
۱	۲۵	۰.۰۵	۷۰	۱.۵	۱۰	۳۰	۰.۰۵	۸۵	۲
۲	۲۵	۰.۰۷	۸۰	۱.۸	۱۱	۳۰	۰.۰۷	۷۰	۱.۵
۳	۲۵	۰.۱۰	۸۵	۲	۱۲	۳۰	۰.۱۰	۸۰	۱.۸
۴	۲۵	۰.۰۵	۷۰	۱.۸	۱۳	۳۰	۰.۰۵	۸۰	۲
۵	۲۵	۰.۰۷	۸۰	۲	۱۴	۳۰	۰.۰۷	۸۵	۱.۵
۶	۲۵	۰.۱۰	۸۵	۱.۵	۱۵	۳۰	۰.۱۰	۷۰	۱.۸
۷	۲۵	۰.۰۵	۸۰	۱.۵	۱۶	۳۰	۰.۰۵	۸۵	۱.۸
۸	۲۵	۰.۰۷	۸۵	۱.۸	۱۷	۳۰	۰.۰۷	۷۰	۲
۹	۲۵	۰.۱۰	۷۰	۲	۱۸	۳۰	۰.۱۰	۸۰	۱.۵

در این قسمت ضرورت و اهمیت تأخیر در شروع انباشت بافر با یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل پیشنهادی و مدلی که انباشت بافر بدون تأخیر و در زمان صفر شروع می‌شود، نشان داده‌شده است. در این مقایسه برای هر یک از پارامترهای V_0، h_B، C' و C_{nc} مقادیر مختلف جدول ۳ درنظرگرفته می‌شود و بقیه پارامترها ثابت می‌ماند. به‌منظور تأثیر این چهار پارامتر و اثربخشی مدل ارائه‌شده، مقدار هزینه‌های مورد انتظار برای هر چرخه تولید در واحد زمان در هر دو مدل بررسی‌شده است. نتایج حاصل از مقایسه عملکرد پیشنهادی با مدل بدون تأخیر در شروع انباشت بافر که در جدول ۴ ارائه‌شده است، حاکی از تأثیر تأخیر در شروع انباشت بافر در کاهش هزینه‌ها دارد. با کاهش تعداد واحدهای بازرسی در مدل پیشنهادی نسبت به رویکرد بدون تأخیر، تمامی هزینه‌ها شامل هزینه بازرسی، هزینه مورد انتظار نگهداری بافر، هزینه مورد انتظار بازسازی و هزینه مورد انتظار سفارش قطعات یدکی کاهش می‌دهد. بنابراین همه هزینه‌ها را به‌جز هزینه مورد انتظار تولید اقلام نامنطبق را کاهش می‌دهد. در رویکرد بدون تأخیر در شروع انباشت بافر، از زمان ابتدا تا انتهای تولید بازرسی وجود دارد که این امر موجب کاهش هزینه تولید اقلام نامنطبق می‌شود اما متوسط هزینه کل به‌صورت چشمگیری در مدل پیشنهادی نسبت به مدل بدون تأخیر کاهش‌یافته است. درنهایت، متوسط هزینه کل بین ۱۱.۹۶ تا ۲۷.۷۳ درصد با میانگین ۱۹.۴۱ درصد بهبود یافته است.

[1] Design Of Experiment

جدول ۴ ترم‌های هزینه برای مدل پیشنهادی و رویکرد بدون تأخیر

مثال	مدل	$\frac{E(C_O)}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{RST})}{T+T_O}$	$\frac{C_I}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{NC})}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{BI})}{T+T_O}$	ETC
	مدل پیشنهادی	۱۰.۵۳	۱۳.۵۸	۱۵.۴۸	۱۲.۲۴	۴.۹۶	۵۶.۷۹
۱	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۱۲	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۶.۷۸	۸.۳۵	۶۶.۴۸
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۷.۰۶
	مدل پیشنهادی	۱۰.۹۱	۱۴.۷۳	۱۵.۵۱	۱۵.۰۱	۸.۷۱	۶۴.۸۷
۲	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۳۴	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۸.۶۴	۱۲.۴۲	۷۲.۶۳
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۱.۹۶
	مدل پیشنهادی	۱۰.۸۸	۱۳.۶۱	۱۵.۵۱	۱۷.۶۰	۱۱.۱۱	۶۸.۷۱
۳	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۴۵	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۹.۷۶	۱۸.۷۹	۸۰.۲۳
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۶.۷۷
	مدل پیشنهادی	۱۳.۹۱	۱۲.۹۹	۱۶.۱۱	۱۵.۶۸	۵.۲۱	۶۳.۹۰
۴	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۳۵	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۸.۶۴	۸.۸۷	۷۵.۱۰
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۷.۵۳
	مدل پیشنهادی	۱۴.۱۱	۱۳.۵۸	۱۵.۴۸	۱۷.۶۳	۷.۸۱	۶۸.۶۱
۵	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۵۷	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۹.۷۶	۱۳.۱۵	۸۰.۷۱
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۷.۶۴
	مدل پیشنهادی	۱۲.۱۹	۱۳.۳۷	۱۲.۲۲	۱۸.۶۶	۷.۸۸	۶۴.۳۳
۶	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۶۹	۱۹.۹۰	۱۸.۳۳	۶.۷۸	۱۶.۷۰	۸۱.۳۹
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۶.۵۲
	مدل پیشنهادی	۱۵.۶۱	۱۴.۳۷	۱۲.۷۸	۱۷.۴۷	۴.۹۴	۶۵.۱۸
۷	رویکرد بدون تأخیر	۲۳.۵۱	۲۱.۱۲	۱۷.۲۲	۷.۶۳	۹.۴۲	۷۸.۹۰
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۱.۰۵
	مدل پیشنهادی	۱۶.۰۹	۱۴.۱۴	۱۳.۳۳	۱۷.۷۹	۶.۲۹	۶۷.۶۳
۸	رویکرد بدون تأخیر	۲۳.۹۴	۲۱.۱۲	۱۷.۲۲	۸.۱۳	۱۱.۷۲	۸۲.۱۵
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۱.۴۷
	مدل پیشنهادی	۱۵.۸۸	۱۴.۲۰	۱۳.۸۹	۱۸.۶۳	۹.۹۳	۷۲.۵۳
۹	رویکرد بدون تأخیر	۲۲.۵۵	۲۰.۴۹	۱۷.۷۸	۹.۲۱	۱۷.۷۷	۸۷.۸۰
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۱.۰۵
	مدل پیشنهادی	۱۰.۷۲	۱۵.۷۷	۱۵.۶۱	۱۶.۶۸	۵.۴۹	۶۴.۲۷
۱۰	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۳۴	۲۱.۴۸	۱۹.۷۲	۹.۲۴	۹.۰۴	۷۲.۸۲
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۳.۳۰
	مدل پیشنهادی	۹.۸۳	۱۵.۱۸	۱۳.۱۳	۱۸.۷۱	۶.۷۴	۶۳.۸۰
۱۱	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۰۰	۲۱.۴۶	۱۹.۷۲	۷.۶۴	۱۳.۴۰	۷۵.۲۲
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۷.۹۰
	مدل پیشنهادی	۱۰.۰۹	۱۵.۱۹	۱۳.۱۳	۱۹.۹۴	۸.۵۷	۶۷.۱۲
۱۲	رویکرد بدون تأخیر	۱۳.۳۴	۱۹.۹۰	۲۱.۳۳	۸.۱۳	۱۶.۷۰	۷۹.۴۰
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۸.۳۰
	مدل پیشنهادی	۱۳.۹۰	۱۵.۶۵	۱۴.۶۷	۱۷.۲۴	۴.۷۷	۶۶.۲۴
۱۳	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۴۲	۲۳.۲۶	۱۸.۰۰	۸.۸۰	۸.۴۳	۷۷.۹۰
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۷.۶۰
	مدل پیشنهادی	۱۲.۳۰	۱۴.۴۶	۱۳.۳۳	۱۹.۰۳	۶.۰۷	۶۵.۱۹
۱۴	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۶۹	۱۹.۹۰	۲۱.۳۳	۷.۲۰	۱۲.۴۲	۸۰.۵۴
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۳.۵۵

مثال	مدل	$\frac{E(C_O)}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{RST})}{T+T_O}$	$\frac{C_I}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{NC})}{T+T_O}$	$\frac{E(C_{BI})}{T+T_O}$	ETC
۱۵	مدل پیشنهادی	۱۳.۲۰	۱۴.۹۸	۱۴.۶۷	۱۹.۵۹	۱۰.۲۹	۷۲.۷۳
	رویکرد بدون تأخیر	۱۹.۲۷	۲۱.۷۹	۱۹.۳۳	۹.۱۸	۱۸.۸۸	۸۸.۴۵
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۱.۶۱
۱۶	مدل پیشنهادی	۱۶.۸۷	۱۵.۳۶	۱۵.۳۳	۱۷.۳۶	۵.۴۸	۷۰.۴۰
	رویکرد بدون تأخیر	۲۳.۵۸	۲۲.۵۰	۱۸.۶۷	۹.۲۲	۹.۴۶	۸۳.۵۲
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۸.۶۴
۱۷	مدل پیشنهادی	۱۵.۴۵	۱۵.۰۴	۱۴.۶۷	۱۸.۴۵	۶.۴۳	۷۰.۰۴
	رویکرد بدون تأخیر	۲۲.۱۶	۲۲.۵۰	۱۸.۶۷	۸.۷۴	۱۱.۷۷	۸۳.۸۴
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۱۹.۷۰
۱۸	مدل پیشنهادی	۱۴.۵۵	۱۳.۴۵	۱۴.۰۰	۱۹.۶۶	۸.۴۲	۷۰.۰۸
	رویکرد بدون تأخیر	۲۳.۲۲	۲۲.۵۰	۱۸.۶۷	۷.۲۵	۱۷.۸۶	۸۹.۵۱
	صرفه‌جویی هزینه (٪)						۲۷.۷۳
میانگین درصد صرفه‌جویی متوسط هزینه کل (٪): ۱۹.۴۱							

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، مدلی یکپارچه با هدف بهینه‌سازی هزینه‌های سیستم تولیدی ارائه شد که به‌طور هم‌زمان مؤلفه‌های کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات، مدیریت موجودی بافر و تأمین قطعات یدکی را با در نظر گرفتن سیاست تأخیر در آغاز انباشت بافر مورد بررسی قرار می‌دهد. سیستم تولیدی مدنظر از دو ماشین تشکیل شده است که به‌صورت سری فعالیت می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که خروجی ماشین اول به‌عنوان ورودی ماشین دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چنین ساختاری، هرگونه اختلال در عملکرد ماشین بالادستی می‌تواند بر تداوم فعالیت ماشین پایین‌دستی و عملکرد کلی خط تولید اثرگذار باشد. ازاین‌رو، هماهنگی میان تصمیمات مربوط به کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات و مدیریت موجودی، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های عملیاتی و جلوگیری از توقف‌های ناخواسته ایفا می‌کند.

یکی از ویژگی‌های اصلی مدل پیشنهادی، استفاده از بازرسی‌های متوالی برای شناسایی تغییرات وضعیت عملکرد ماشین بالادستی و اتخاذ اقدامات اصلاحی متناسب با شرایط سیستم است. در صورت شناسایی خروج فرآیند از وضعیت تحت کنترل، اقدامات لازم برای بازیابی شرایط مطلوب، از جمله استفاده از قطعه یدکی و بازگرداندن ماشین به وضعیت تحت کنترل، انجام می‌شود. این سازوکار با هدف کاهش پیامدهای ناشی از اختلالات فرآیند و حفظ شرایط مناسب تولید در نظر گرفته شده است. علاوه‌بر این، هنگامی که ماشین اول به انجام تعمیرات اساسی نیاز دارد و فعالیت آن برای مدتی متوقف می‌شود، ماشین دوم می‌تواند با استفاده از موجودی بافر انباشته‌شده در مراحل پیشین به فعالیت خود ادامه دهد. بدین ترتیب، موجودی بافر به‌عنوان ابزاری برای کاهش وابستگی عملکرد ماشین پایین‌دستی به وضعیت عملیاتی ماشین بالادستی عمل می‌کند و امکان کاهش توقف خط تولید را فراهم می‌سازد.

از دیگر ویژگی‌های متمایزکننده این مدل، در نظر گرفتن بازرسی‌های متوالی با فواصل زمانی ثابت برای بررسی وضعیت بافر و انباشت بافرهای منطبق با الزامات کیفی است. این موضوع موجب می‌شود که تصمیمات مربوط به انباشت بافر صرفاً بر اساس نیاز به تأمین موجودی اتخاذ نشوند، بلکه وضعیت کیفی محصولات تولیدشده نیز در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شود. همچنین، در مدل پیشنهادی، انباشت بافر از ابتدای چرخه تولید آغاز نمی‌شود، بلکه شروع آن با تأخیر و در زمان بهینه تعیین‌شده صورت می‌گیرد. هدف از اتخاذ این سیاست، ایجاد تعادل میان مزایای عملیاتی موجودی بافر و هزینه‌های مرتبط با نگهداری آن است. به بیان دیگر، اگرچه وجود بافر می‌تواند از توقف ماشین پایین‌دستی هنگام تعمیرات ماشین اول جلوگیری کند، انباشت زودهنگام آن ممکن است هزینه‌های نگهداری موجودی را افزایش دهد. بنابراین، تعیین زمان مناسب برای آغاز انباشت بافر، یکی از تصمیمات کلیدی در چارچوب مدل پیشنهادی محسوب می‌شود.

در راستای دستیابی به هدف اصلی پژوهش، یعنی کمینه‌سازی متوسط هزینه کل سیستم تولیدی در واحد زمان، روابط و محدودیت‌های مرتبط با کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات، موجودی بافر و قطعات یدکی در قالب یک مدل ریاضی یکپارچه تدوین شدند. در ادامه، به‌منظور بررسی قابلیت کاربرد مدل و ارزیابی عملکرد آن در شرایط عملیاتی، یک مثال عددی با استفاده از اطلاعات مرتبط با شرکت کروز ایران‌خودرو ارائه شد. در این مثال، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) محاسبه شدند. استفاده از این الگوریتم امکان جست‌وجوی راه‌حل‌های مناسب برای مسئله بهینه‌سازی و تعیین مقادیر متغیرهای تصمیم با هدف کاهش هزینه‌های سیستم را فراهم کرد.

برای ارزیابی اثربخشی سیاست تأخیر در آغاز انباشت بافر، نتایج مدل پیشنهادی با نتایج یک رویکرد مشابه که در آن انباشت بافر بدون تأخیر آغاز می‌شود، مقایسه شد. این مقایسه در تمامی مثال‌های تولیدشده بر اساس روش طراحی آزمایش انجام گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که مدل پیشنهادی در تمام مثال‌های بررسی‌شده، عملکرد هزینه‌ای بهتری نسبت به رویکرد فاقد تأخیر در آغاز انباشت بافر داشته است. همچنین، بررسی اجزای مختلف هزینه نشان داد که تمامی مؤلفه‌های هزینه خط تولید، به‌استثنای هزینه ناشی از تولید اقلام نامنطبق، در مدل پیشنهادی کمتر از مقادیر متناظر در رویکرد بدون تأخیر بوده‌اند. این نتیجه نشان می‌دهد که به‌کارگیری سیاست تأخیر در انباشت بافر، اگرچه لزوماً موجب کاهش تمام اجزای هزینه نمی‌شود، می‌تواند از طریق بهبود هماهنگی میان زمان انباشت موجودی و نیازهای عملیاتی سیستم، هزینه کل مورد انتظار را کاهش دهد.

در مجموع، نتایج حاصل از مقایسه دو رویکرد نشان داد که اعمال تأخیر بهینه در شروع انباشت بافر، به‌طور متوسط موجب صرفه‌جویی ۱۹/۴۱ درصدی در متوسط هزینه کل سیستم تولیدی شده است. این میزان صرفه‌جویی، اهمیت تعیین زمان مناسب انباشت بافر را در کنار تصمیمات مربوط به کنترل کیفیت، نگهداری و تعمیرات و مدیریت قطعات یدکی برجسته می‌کند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که اتخاذ تصمیمات یکپارچه در این حوزه‌ها، در مقایسه با برنامه‌ریزی جداگانه هر یک از مؤلفه‌ها، ظرفیت مناسبی برای بهبود عملکرد هزینه‌ای سیستم تولیدی فراهم می‌آورد.

با توجه به نتایج حاصل و محدودیت‌های مدل حاضر، چند مسیر برای توسعه تحقیقات آینده قابل بررسی است. نخست، می‌توان مدل را به شرایطی تعمیم داد که در آن تقاضای محصولات قطعی نیست و تغییرات تقاضا بر تصمیمات مربوط به تولید، موجودی بافر و تأمین قطعات یدکی اثر می‌گذارند. در چنین شرایطی، در نظر گرفتن ماهیت نامطمئن تقاضا می‌تواند به تدوین سیاست‌های انعطاف‌پذیرتر برای مدیریت موجودی و برنامه‌ریزی تولید کمک کند. دوم، می‌توان شرایطی را بررسی کرد که در آن خرابی تجهیزات به تعویض بیش از یک نوع قطعه یدکی نیاز دارد. در این حالت، تنوع قطعات موردنیاز و وابستگی میان سیاست‌های تأمین آن‌ها می‌تواند پیچیدگی تصمیمات مربوط به موجودی و نگهداری و تعمیرات را افزایش دهد. توسعه مدل در این دو جهت می‌تواند دامنه کاربرد آن را گسترش دهد و امکان بررسی دقیق‌تر تعامل میان عوامل عملیاتی و هزینه‌ای را در سیستم‌های تولیدی فراهم سازد.

منابع

[1] Ribeiro MA, Silveira JL, Qassim RY. Joint optimization of maintenance and buffer size in a manufacturing system. European Journal of Operational Research. 2007; 176(1): 405-413. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.007

[2] Chelbi A, Ait-Kadi D. Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance. European journal of operational research. 2004; 156(3): 712-718. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00254-6

[3] Zequeira RI, Valdes JE, Berenguer C. Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability. International Journal of Production Economics. 2008; 111(2): 686-696. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.037

[4] Huang J, Chang Q, Arinez J. Deep Reinforcement Learning based Preventive Maintenance Policy for Serial Production Lines. Expert System Appl. 2020; 160: 113701. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113701

[5] Frazzon EM, Israel E, Albrecht A, Pereira CE, Hellingrath B. Spare parts supply chains' operational planning using technical condition information from intelligent maintenance systems. Annual Reviews in Control. 2014; 38(1): 147-154. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.03.014

[6] Jiang Y, Chen M, Zhou D. Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory. Journal of Manufacturing Systems. 2015; 35: 191-205. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.01.002

[7] Hao S, Zheng J, Yang J. Deep reinforce learning for joint optimization of condition-based maintenance and spare ordering. Inf Sci. 2023; 634: 85-100. https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.03.064

[8] Gan S, Zhang Z, Zhou Y, Shi J. Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system. Applied Mathematical Modelling. 2015; 39(19): 6032-6042. https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.035

[9] Kiesmüller GP, Sachs FE. Spare parts or buffer? How to design a transfer line with unreliable machines. Eur J Oper Res. 2020; 284(1):121-134. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.12.005

[10] Gan S, Zhang X, Chen L. Maintenance optimization of a production system considering defect prevention and spare parts ordering. J Risk Reliab, 2022; 235(5). https://doi.org/10.1177/1748006X211029152

[11] Giri BC, Dohi T. Inspection scheduling for imperfect production processes under free repair warranty contract. Eur J Oper Res. 2007; 183:238–252. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.062

[12] Hadian SM, Farughi H, Rasay H. Joint planning of maintenance, buffer stock and quality control for unreliable, imperfect manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering. 2021; 157: 107304. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107304

[13] Wang L, Lu Z, Ren Y. Joint production control and maintenance policy for a serial system with quality deterioration and stochastic demand. Reliability Engineering & System Safety. 2020; 199: 106918. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106918

[14] Cheng GQ, Zhou BH, Li L. Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems. Reliability Engineering & System Safety. 2018; 175: 251-264. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.025

[15] L Shi, X Lv, Y He, Z He. Optimising production, maintenance, and quality control for imperfect manufacturing systems considering timely replenishment. International Journal of Production Research. 2024; 62(10): 3504-3525. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2241563

[16] X Wei, Y Wang, Y He, Z Liu, Z He. Integrated production, maintenance and quality control for complex manufacturing systems considering imperfect maintenance and dynamic inspection. Reliability Engineering & System Safety. 2025; 259. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110896

[17] Tseng P. Growth behavior of a class of merit functions for the nonlinear complementarity problem. J Optim Theory Apple. 1996; 89:17-37. https://doi.org/10.1007/BF02192639