

بهینه‌سازی همزمان سیاست‌های نگهداری و تعمیرات و برنامه‌ریزی تولید در سیستم‌های چند مؤلفه‌ای با فرض مجاز بودن کمبود

ام‌البنین یوسفی^۱

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، oyousefi@mut-es.ac.ir

مرجان مهری قهفرخی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، marjanmehri.94@gmail.com

چکیده

امروزه با توجه به پیشرفت صنعت، تولیدکنندگان با چالش‌های بسیاری روبه‌رو هستند از جمله اینکه سیستم‌های تولیدی پیچیده و چندمؤلفه‌ای شده‌اند و اجزاء آن‌ها به تدریج با گذشت زمان و کارکرد، دچار استهلاک و خرابی می‌شوند. بنابراین، در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی همزمان نگهداری و تعمیرات (نت) بر پایه قابلیت اطمینان پیشگیرانه و برنامه‌ریزی تولید، برای یک سیستم چند مؤلفه‌ای با در نظر گرفتن ذخیره احتیاطی و کمبود به صورت پس‌افت تقاضا، تحت سیاست نت پیشگیرانه و اصلاحی توسعه داده شده است. هدف مدل پیشنهادی، کمینه‌کردن نرخ میانگین هزینه‌ها و تعیین مقدار بهینه تولید، کمبود و آستانه نت پیشگیرانه است. در نهایت به عنوان روش حل رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده و اعتبار و کارایی مدل از طریق پیاده‌سازی در یک مثال عددی و تحلیل حساسیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مدل پیشنهادی، باعث کاهش هزینه‌های کل سیستم می‌گردد و این کاهش، منجر به بهبود عملکرد سیستم و در نهایت افزایش میزان سود شرکت‌های تولیدی خواهد شد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های چند مؤلفه‌ای، نگهداری و تعمیرات، برنامه‌ریزی تولید، کمبود موجودی

^۱ نویسنده مسئول

joint optimization of maintenance and repair policies and production planning in multi-component systems assuming that shortages are allowed

Ommolbanin Yousefi, (corresponding author), oyousefi@mut-es.ac.ir

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

Marjan Mehri Ghahfarokhi, marjanmehri.94@gmail.com

M.Sc. degree, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Nowadays, due to globalization and intense competition, manufacturers face numerous challenges in maintaining their competitive advantages. They strive not only to reduce costs but also to increase system profitability. In production systems, due to increasing wear over time and machine aging (such as corrosion, deterioration, and breakage), many components experience failures. Therefore, the simultaneous optimization of maintenance and production planning has always been a subject of interest for many researchers. The production process involves various factors, including production and demand rates, shortage cost rates, and the planned time horizon, which significantly impact maintenance decision-making and vice versa. Moreover, the multi-component and complex nature of production systems cannot be overlooked. Thus, in this research, a simultaneous optimization model for maintenance and production planning of multi-component systems has been developed, considering safety stock and shortages, under the preventive and corrective maintenance policy. The system produces a single type of product to meet constant demand within a finite time horizon. After each production cycle, inspections are conducted to determine the condition of components, and maintenance is performed if necessary. Since component degradation does not lead to immediate system stoppage but negatively affects performance, a criterion called structural importance has been utilized for component prioritization. Additionally, this study assumes that both preventive and corrective maintenance are carried out completely and are based on preventive reliability and structural dependency of components. Inventory shortages are allowed and are considered as backorders. The objective of the model is to minimize the average cost rate, including: setup costs inspection costs, preventive and corrective maintenance costs, inventory holding costs, safety stock holding costs, replenishment costs and shortage costs. The model determines the optimal values of decision variables, including optimal production quantity, shortage amount, and preventive maintenance threshold. Finally, the optimization solution method based on Montello simulation was implemented and the validity and efficiency of the model were analyzed through the implementation of a numerical example and analysis of the title. The results indicate that the proposed model reduces the total system costs and improves the system performance and ultimately increases the profits of manufacturing companies.

Keywords: multi-component systems, maintenance and repairs, production planning, inventory shortage

Introduction

These days, due to the advancement of industry and intense competition, manufacturers face numerous challenges. They strive to improve production performance while maximizing profits and reducing the total system costs. In this regard, two critical activities in production processes can be highlighted: production planning and maintenance planning, both of which are of great importance to many industrial units.

The goal of production planning is to achieve optimal performance by forecasting, planning, and scheduling production activities while considering constraints such as materials, equipment, costs, and more. Additionally, in the past, production planning and inventory models often assumed that machine failures would never occur during production execution. However, due to increasing wear over time and the aging of machines (e.g., corrosion, material fatigue, decay, and breakage), many production systems experience failures. System failures may occur randomly, leading to production disruptions. Therefore, this assumption is no longer widely accepted, as machine failures have a significant impact on production processes.

To enhance system reliability and ensure production continuity, an appropriate maintenance management policy must be selected, including activities such as inspection, repair, replacement, etc., to guarantee production capacity, product quality, and lifecycle costs while providing a long-term business strategy.

Overall, the production process consists of factors such as production and demand rates, shortage cost rates, and planned scheduling horizons, which significantly influence maintenance decision-making and vice versa. Implementing maintenance measures can improve component reliability but requires time, reducing overall production system availability. To address this challenge, preventive maintenance thresholds must be optimized to ensure maintenance activities are appropriately executed.

Moreover, to minimize production disruptions, preventive maintenance activities should be performed at the end of a production cycle. Additionally, the limited time between consecutive production cycles must be utilized effectively for inspecting components and

executing maintenance actions. Ultimately, proper production planning and timely execution of maintenance activities will result in reduced system costs.

Methodology

This study is the result of extending the model of Chang and colleagues, considering their research as the foundational study. In addition to the preventive maintenance threshold and production batch size, the optimal shortage amount has also been included as a decision variable. In this study, shortage is assumed to be backlogged demand. Furthermore, to address demand fluctuations, a safety stock has been incorporated.

Also in this research, preventive and corrective maintenance are considered. One type of PM is Predetermined Maintenance Actions, which is the same as scheduled inspections during the production cycle or after its completion, and has been used in this study.

Ultimately, the objective function of the foundational study's cost model has been minimized by incorporating new costs, including safety stock maintenance, its replenishment, and shortage costs as backlogged demand, alongside setup costs, inspection costs, inventory holding costs, preventive maintenance costs, and corrective maintenance costs. The final model is thus presented.

Results

In the final model of this study, the failure process of components is first modeled, followed by the modeling of the maintenance and repair process and then the production process of components in sequence. Ultimately, the average cost rate per unit of time is calculated. Given the complex structure of the system and the dependencies between components, obtaining the average cost rate through algebraic analysis is extremely difficult. Therefore, a simulation method has been used to calculate the average cost rate.

The study results indicate that implementing the strategies proposed in this research leads to a reduction in production system costs. Finally, a sensitivity analysis of the model is conducted by varying demand, corrective and preventive maintenance costs, and examining their impact

on the average cost rate.

Conclusion

This study examines the simultaneous optimization of maintenance and production planning for multi-component production systems while considering safety stock. Additionally, the reliability of each component is assessed for preventive maintenance decision-making.

The total cost model includes setup costs, inspection costs, preventive and corrective maintenance costs, inventory holding costs, safety stock maintenance costs, its replenishment costs, and shortage costs. Since analytically computing the average cost rate is complex, the Monte Carlo simulation method has been employed. This algorithm minimizes the total system cost by determining three decision variables: production batch size, preventive maintenance threshold, and optimal shortage amount.

To validate the model, a numerical example is provided. A comparison of this study's results with the foundational research [6] indicates that incorporating the strategies proposed in this paper leads to a one-third reduction in the costs of multi-component and complex systems compared to the previous approach. This cost reduction enhances system performance and ultimately increases the profitability of manufacturing companies.

For future research, several assumptions can be considered to make the model more realistic. These include situations where failures occur before reaching an inspection point, causing system stoppage, or where components are not fully restored after repairs and may undergo partial or incomplete maintenance. Additionally, the demand rate can be modeled probabilistically.

۱. مقدمه

امروزه به دلیل پیشرفته شدن صنعت و رقابت های شدید، تولیدکنندگان با چالش های بسیاری روبه رو هستند. آن ها در تلاش اند تا برای بهبود عملکرد تولید ضمن به حداکثر رساندن سود، هزینه های کل سیستم را کاهش دهند، [۱] در همین راستا می توان به دو فعالیت حیاتی در فرآیندهای تولید اشاره کرد: یکی برنامه ریزی و کنترل تولید و دیگری برنامه ریزی نگهداری و تعمیرات (نت) که مورد توجه بسیاری از واحدهای صنعتی است. [۲]

هدف برنامه ریزی تولید دستیابی به عملکرد مطلوب با پیش بینی، برنامه ریزی و زمان بندی فعالیت های تولید ضمن در نظر گرفتن محدودیت های مواد، تجهیزات، هزینه ها و غیره است. [۱] تصمیم گیری در خصوص خرید یا ساخت قطعات از جمله مواردی است که سیستم ها با آن مواجه هستند. بر این اساس مدل های موجودی به دو نوع مدل خرید و تولید تقسیم می شوند. ساده ترین مدل قطعی موجودی، مدل سفارش اقتصادی^۱ است که توسط ویلسون^۲ مطرح گردید. مدل دیگر، مدل تولید اقتصادی^۳ است که تحت عنوان مدل دریافت تدریجی نیز شناخته می شود و در آن فرض می شود که یک سیستم تولیدی با نرخ مشخص اقدام به تولید کالا نموده است. بخشی از اقلام تولید شده به محض تولید مصرف شده و بخش دیگر به سطح موجودی های انبار افزوده می شود. با توجه به محدود بودن فضای انبار و نرخ مثبت افزایش سطح موجودی ها، بدیهی است که تولید بعد از انباشته شدن مقدار مشخصی موجودی متوقف شده و در ادامه دوره از موجودی انبار جهت برآورده کردن تقاضا استفاده می شود. [۳] سیستم هایی که دارای مدل تولید اقتصادی هستند، برای برآوردن سفارشات و احتیاجات مشتریان خود با توجه به خروجی ها و نوع سفارش، سیاست های تولیدی مختلفی را به کار می گیرند. از جمله پرکاربردترین آن ها می توان به سیستم های تولیدی ساخت ذخیره ای اشاره کرد. مزیت اصلی این سیستم کمتر بودن زمان تحویل سفارش به مشتری، نسبت به سایر سیستم های تولیدی است. به عبارتی در بخشی از دوره تولید، هیچ گونه تولیدی صورت نمی گیرد تا زمانی که موجودی درون انبار به حد مشخصی برسد و از آن زمان به بعد، مجدداً تولید از سر گرفته می شود. [۴] هم چنین، در سیستم های تولیدی برای کاهش کمبودهای احتمالی ناشی از عدم قطعیت در نرخ مصرف و یا زمان تحویل

متغیر در زمان انتظار جهت دریافت کالا، میزان اضافه موجودی انبار به عنوان موجودی یا ذخیره اطمینان، نگهداری می شود. [۵]

در گذشته در مدل های برنامه ریزی تولید و موجودی، یک پیش فرض متداول وجود داشت که خرابی ماشین در طول اجرای تولید هرگز اتفاق نخواهد افتاد. با این حال، به دلیل سایش فزاینده از طریق گذشت زمان و افزایش عمر ماشین (به عنوان مثال، خوردگی، خستگی مواد، پوسیدن و شکستگی)، بسیاری از سیستم های تولیدی دچار خرابی می شوند. [۶] بنابراین اجزاء سیستم در معرض خرابی هستند و فرآیند خرابی آن ها مستقل از یکدیگر می باشد. وضعیت سلامت آن ها شامل دو وضعیت سالم و خراب است. مطمئناً توقف هر یک از این اجزاء منجر به کاهش ظرفیت تولید و افزایش هزینه ها سیستم خواهد شد. [۷] پس امروزه این پیش فرض دیگر متداول نیست چرا که خرابی دستگاه تأثیر زیادی بر روند تولید خواهد داشت. [۶] برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم و اطمینان از تداوم فرایند تولید، باید یک سیاست مدیریت نت مناسب که شامل فعالیت هایی مانند بازرسی، تعمیر، تعویض و غیره است، انتخاب شود تا با ارائه استراتژی کسب و کار در دراز مدت، ظرفیت تولید، کیفیت محصول و هزینه های چرخه عمر را تضمین کند. [۸] در بسیاری از شرایط عملی، فرسودگی قطعات منجر به توقف فوری سیستم نمی شود، اما تأثیر منفی بر عملکرد آنها دارد. [۹] به طور کلی نگهداری و تعمیرات شامل اقدامات پیشگیرانه^۴ (پیشگیری از وقوع خرابی) و اصلاحی^۵ (تعمیرات پس از وقوع خرابی) است که برای حفظ یک سیستم یا بازگرداندن آن به شرایط عملیاتی انجام می شود. [۱۰] اقدامات نگهداری پیشگیرانه طبق معیارهای تعیین شده ی زمان، میزان استفاده یا شرایط، انجام می شوند و هدف آنها کاهش احتمال خرابی یا تخریب عملکردی یک قطعه است. اقدامات نت پیشگیرانه را می توان به نگهداری از پیش تعیین شده^۶، نگهداری مبتنی بر شرایط^۷ و نگهداری فرصت طلبانه^۸، گروه بندی کرد. نگهداری از پیش تعیین شده، در لحظات زمانی گسسته که از پیش تعیین شده، انجام می شود. پس منظور از این فعالیت نت از قبل تعریف شده، همان بازرسی های زمان بندی شده هستند که در طول سیکل تولید یا پس از اتمام آن، انجام می گردند. [۱۱] البته بیشتر تحقیقات، سیستم تولید را به عنوان یک سیستم تک جزئی

در نظر می‌گیرند. اما چون امروزه ساختار سیستم‌های تولیدی با تعداد زیاد اجزای مختلف پیچیده‌تر شده است، سیستم‌های چند جزئی به‌وجود آمده است که به طور کلی، در این سیستم‌ها وابستگی‌های متقابلی مانند وابستگی‌های تصادفی^۹، اقتصادی^{۱۰} و ساختاری^{۱۱} بین اجزاء وجود دارد. [۶] با توجه به این وابستگی‌ها، مدل‌های نت بسیار پیچیده‌تر می‌شوند. [۱۲] هنگام در نظر گرفتن وابستگی ساختاری (که نشان می‌دهد اجزای سیستم از نظر ساختاری یک بخش یکپارچه را تشکیل می‌دهند)، انتخاب یک جزء برای نت پیشگیرانه نه تنها به شرایط یا قابلیت اطمینان آن بلکه به محل این جزء در سیستم (یا اهمیت جزء) نیز بستگی دارد. برای مواجهه با این موضوع، برنبا^{۱۲} اهمیت ساختاری را معرفی کرد. [۱۳] به تدریج، اهمیت ساختاری گسترش یافته و برخی معیارهای اندازه‌گیری اهمیت دیگری نیز معرفی شده است. [۱۴] به‌خاطر وجود این فعل و انفعالات، استراتژی‌های نت پیشنهادی برای سیستم‌های تک جزئی به سختی اعمال شده و حتی برای سیستم‌های چند جزئی غیرممکن خواهد بود. لذا مطالعاتی در مورد ترکیب تعاملات بین مؤلفه‌ها در تصمیم‌گیری نت سیستم‌های چند جزئی انجام شده است که بیشتر آن‌ها بر روی وابستگی اقتصادی تمرکز دارند. [۱۲] همچنین فرضیه مبنا در اکثر داده‌های خرابی براساس مستقل و هم توزیع بودن این داده‌هاست. مستقل و هم‌توزیع بودن داده‌های خرابی از ویژگی‌های فرآیندهای بازنوکنی است. یعنی فعالیت‌های نت روی اجزاء سیستم بطور کامل انجام شده و پس از تکمیل عملیات نت، جزءها به حالت نو بازمی‌گردند. [۱۵]

در مجموع می‌توان گفت فرآیند تولید شامل عواملی مانند نرخ تولید و تقاضا، نرخ هزینه کمبود و افق زمانی برنامه ریزی شده است که تاثیر زیادی در تصمیم‌گیری نت دارد و بالعکس. انجام اقدامات نت می‌تواند وضعیت قابلیت اطمینان قطعات را بهبود بخشد، اما این اقدامات زمان‌بر بوده و دسترسی کل سیستم تولید را کاهش می‌دهد. برای رویارویی با این معضل، باید آستانه نت پیشگیرانه بهینه شود تا فعالیت‌های نت به طور مناسب انجام شود. علاوه بر این، برای کاهش وقفه در فرآیند تولید، فعالیت‌های نت پیشگیرانه زمانی انجام می‌شود که یک دوره تولید به پایان برسد. هم‌چنین باید از زمان محدود بین دو دوره تولید متوالی برای بازرسی قطعات و انجام اقدامات نت نهایت استفاده را برد. [۶]

در ادامه پژوهش حاضر ابتدا مرور پیشینه پژوهش بیان شده و در ادامه بعد از بیان فرضیات و پارامترها و متغیرها، مدل ریاضی پیشنهادی معرفی و سپس روش حل، روابط و رویکرد شبیه سازی تشریح گردیده و در پایان نیز مدل با مثال عددی حل و تحلیل حساسیت انجام و نتیجه‌گیری از پژوهش ارائه شده است.

۲. پیشینه پژوهش

همانگونه که اشاره شد بهینه‌سازی همزمان نت و برنامه‌ریزی تولید در سیستم‌های چند جزئی، یکی از موضوعات مهم پژوهش‌ها بوده و بیشتر آن‌ها به حداقل رساندن کل هزینه‌های مورد انتظار در سیستم تولیدی توجه دارند. پال و همکاران،^{۱۳} [۱۶] یک مدل برنامه‌ریزی تولید و موجودی را با وجود تقاضای تصادفی برای محصولات توسعه دادند که در آن پس از اجرای منظم تولید، نت پیشگیرانه با زمان تصادفی انجام می‌شود و در نهایت، یک تابع هزینه مورد انتظار در رابطه با هزینه موجودی، هزینه تولید واحد، هزینه نگهداری پیشگیرانه و هزینه کمبود به صورت تحلیلی به حداقل می‌رسد. طباطبایی و علیمحمدی،^{۱۴} [۱۷] مدل تولید اقتصادی در حالت اتخاذ سیاست نت پیشگیرانه با در نظر گرفتن فرضیاتی از قبیل مجاز بودن کمبود، در نظر گرفتن موجودی در جریان ساخت و ... بررسی و با کمینه کردن هزینه‌های کل سیستم، مدل جدیدی برای تعیین اندازه دسته تولید طراحی کردند. کی‌زر و همکاران،^{۱۵} [۱۸] بهینه سازی مشترک نت پیشگیرانه و برنامه ریزی قطعات یدکی را برای سیستم‌های چند جزئی در نظر گرفته‌اند. آن‌ها مدل خود را به عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف فرموله کرده و هزینه متوسط بلندمدت در واحد زمان را به حداقل رساندند. هم‌چنین، نگوین و همکاران،^{۱۶} [۱۰] یک استراتژی مشترک نت پیشگویانه و موجودی برای سیستم‌های چند جزئی با ساختار پیچیده پیشنهاد دادند. چنگ و همکاران،^{۱۷} [۶] در همان سال یک مدل بهینه‌سازی مشترک از تولید و نت پیشگیرانه را برای یک سیستم تولید چند جزئی ارائه دادند که محصولات را برای تأمین تقاضا در یک افق زمانی محدود تولید می‌کند. هدف آن بهینه‌سازی مشترک دو متغیر تصمیم‌گیری، یعنی اندازه کل دسته تولید و حداقل آستانه نگهداری پیشگیرانه، برای حداقل کردن هزینه کل است. چنگ و

همکاران، [۱۹] یک مشکل یکپارچه از اندازه قطعه تولید، کنترل کیفیت و نت پیشگیرانه را برای یک سیستم تولید ناقص در نظر گرفته و یک مدل ریاضی تصادفی با یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی را مدلسازی کردند. بابایی مراد و همکاران،^{۱۸} [۲۰] یک مدل بهینه برنامه‌ریزی تولید و نت پیشگیرانه را برای واحد تولیدی تک ماشین به صورت گرفتن تقاضا به صورت احتمالی و مواجهه با کمبود به صورت پس‌افت تقاضا توسعه دادند. چنگ و لی،^{۱۹} [۲۱] یک مدل مشترک از تولید، کنترل کیفیت و نت پیشگیرانه را برای یک سیستم تولید چند مرحله‌ای سری-موازی ارائه کردند که در آن مسئله یکپارچه به عنوان یک مدل ریاضی تصادفی محدود فرموله شده است به طوری که به صورت همزمان طول دوره تولید، آستانه کنترل کیفیت و آستانه نت را تعیین کرده و هزینه کل را به حداقل می‌رساند. تیان و همکاران،^{۲۰} [۲۲] یک سیستم تولید با خرابی دو مرحله‌ای، شامل مرحله شروع فرآیند خرابی و مرحله انتشار و تکثیر خرابی را به همراه نت پیشگیرانه در سیستم‌های تک مؤلفه‌ای با مجاز بودن کمبود به صورت فروش از دست رفته در نظر گرفته و از طریق فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف بهینه‌سازی کرده است. ژنگ و همکاران^{۲۱} [۲۳]، به بررسی مسئله بهینه‌سازی یکپارچه تولید و نگهداری برای یک ماشین رو به زوال، با در نظر گرفتن بازده تصادفی و تأخیرهای نگهداری می‌پردازد. این مقاله مسئله را در چارچوب فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف برای به حداقل رساندن هزینه‌ها در یک افق نامحدود فرموله می‌کند. ژنگ و همکاران [۲۴]، یک مدل کنترل یکپارچه از فرآیند نگهداری و تولید را با در نظر گرفتن تأثیر متقابل بین تولید و زوال در یک سیستم تک ماشین به پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها با استفاده از داده‌های پایش وضعیت، اثربخشی تصمیم‌گیری را افزایش داده و یک چارچوب جامع مبتنی بر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف با افق نامحدود را توسعه داده‌اند که در به حداکثر رساندن سود در مقایسه با رویکردهای سنتی نگهداری و تعمیرات تاثیرگذار بوده است. لی و همکاران^{۲۲} [۲۵]، به چالش ایجاد تعادل بین تقاضای مشتری، کیفیت محصول و سلامت تجهیزات در سیستم‌های تولیدی مدرن می‌پردازند و یک مدل استراتژی مشترک ارائه می‌دهند که تولید، کیفیت و نگهداری را با

تمرکز بر تقاضای پویای مشتری تحت تأثیر عملکرد تحویل در سیستم‌های تولیدی، ادغام می‌کند. این استراتژی به عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف فرموله شده است. خلاصه‌ای از مرور ادبیات در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱. شکاف تحقیقاتی

تحقیق حاضر حاصل توسعه مدل چنگ و همکاران با در نظر گرفتن پژوهش [۶] به عنوان پژوهش پایه است که علاوه بر آستانه نت پیشگیرانه و اندازه دسته تولید، مقدار بهینه کمبود هم به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است و مقدار نهایی آن با توجه به مدل تعیین می‌گردد. همانطور که از جدول ۱ پیداست، اکثر پژوهش‌ها برای سیستم‌های تک مؤلفه‌ای مدلسازی و تعریف شده‌اند، در حالیکه در دنیای امروز به هیچ عنوان بحث پیچیده شدن و چند مؤلفه‌ای شدن سیستم‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت. امری که در پژوهش حاضر به تفصیل به آن پرداخته شده است. به علاوه، در تحقیق حاضر کمبود به صورت پس‌افت تقاضا، فرض شده است، این در حالی است که در اکثر تحقیقات کمبود یا در نظر گرفته نشده یا به صورت فروش از دست رفته لحاظ شده است و در نظر گرفتن کمبود به عنوان یکی از موارد مهم در واقعیت، برای تحقیقات آتی در این مقاله‌ها پیشنهاد شده است. هم چنین، مطالعات کمتری برای بررسی وجود ذخیره احتیاطی در سیستم‌های تولیدی، در نظر گرفته شده است؛ در حالیکه اهمیت وجود ذخیره احتیاطی در سیستم‌های تولیدی برای مقابله با تغییرات تقاضا، امری بدیهی و به وضوح قابل مشاهده است. از دیگر موارد مهم، در نظر گرفتن سیاست نت پیشگیرانه و اصلاحی به طور همزمان است. این امر به‌ویژه در سیستم‌های چندمؤلفه‌ای باعث بهینه شدن زمان‌بندی تعمیرات و کاهش هزینه‌ها می‌گردد.

در نهایت در این پژوهش تابع هدف هزینه‌های مقاله پایه با افزودن هزینه‌های جدید شامل هزینه نگهداری ذخیره احتیاطی، بازپرسازی آن و کمبود به صورت پس‌افت تقاضا علاوه بر هزینه راه‌اندازی، بازرسی، نگهداری موجودی در انبار، نت پیشگیرانه و نت اصلاحی، کمینه شده و مدل نهایی ارائه گردیده است.

Type of inventory shortage	backorders	Lost sales	solution method	Maintenance policy		Production policy		Multi-component system	Names of authors (year)
				PM	CM	EPQ	EOQ		
		•	Analytical modeling	•		•			Pal (۲۰۱۳)
	•		Solving a mathematical model by taking derivatives	•		•			Tabatabaei and Alimohamadi (۲۰۱۳)
Inventory shortages are not allowed			Markov decision process	•			•	•	Keizer (۲۰۱۶)
Inventory shortages are not allowed			Monte Carlo simulation	•	•		•	•	Nguyen (۲۰۱۷)
•			Connection simulation and genetic algorithm	•		•		•	Cheng (۲۰۱۷)
•			Response Surface Methodology and Monte Carlo Simulation	•	•	•			Cheng (۲۰۱۸)
•	•		Random simulation	•		•			Babaeimorad (۲۰۱۹)
•			Monte Carlo and simulation Genetic algorithm	•	•	•		•	Cheng and Li (۲۰۲۰)
•			Markov decision process	•	•	•			Tian (۲۰۲۳)
•			Semi Markov decision process	•		•			Zhang (۲۰۲۴)
Inventory shortages are not allowed			Markov decision process	•	•	•			Zhang (۲۰۲۵)
Inventory shortages are not allowed			Markov decision process	•		•			Li (۲۰۲۵)
•	•		Monte Carlo simulation	•	•	•		•	The present research

۳. روش شناسی پژوهش

در این بخش پارامترها، متغیرهای تصمیم مدل و مدل سازی ریاضی مسئله پژوهش بیان می شود.

۳.۱. تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل

اندیس ها و پارامترهای مدل عبارتند از:

i : اندیس شمارنده جزءهای سیستم ($i=1,2,3,...,N$)

P : نرخ تولید سیستم

D : نرخ تقاضا (ثابت)

S : نرخ ذخیره احتیاطی

T_h : افق زمانی (محدود)

N : تعداد کل اجزاء سیستم تولید

N_p : تعداد کل سیکل‌های تولید در طول افق زمانی

α_i, β_i : پارامترهای مقیاس و شکل فرآیند گاما برای جزء i ام

λ : نرخ بازپرسازی ذخیره احتیاطی

IB_i : اندازه اهمیت ساختاری جزء i ام

ξ_i : آستانه نت پیشگیرانه (PM) جزء i ام

$X_i(t)$: سطح استهلاک جزء i ام در زمان t

R_i^n : قابلیت اطمینان شرطی پیشبینانه جزء i ام در پایان n امین دورهی تولید

$C_{pm}^{(i)}, C_{cm}^{(i)}$: هزینه نت اصلاحی و پیشگیرانه جزء i ام

$T_{pm}^{(i)}, T_{cm}^{(i)}$: زمان نت اصلاحی و پیشگیرانه جزء i ام

C_{in} : هزینه بازرسی سیستم تولید

C_f : بخش ثابت هزینه نت

C_h : هزینه نگهداری موجودی

C_{pss} : هزینه بازپرسازی هر واحد ذخیره احتیاطی

C_{sh} : هزینه کمبود به صورت پس افت تقاضا

C_{setup} : هزینه راه‌اندازی سیستم تولید

متغیرهای تصمیم مدل عبارتند از:

Q : مقدار اقتصادی تولید

K : متغیر مؤثر در محاسبه آستانه نت پیشگیرانه (PM)

b : مقدار بهینه کمبود

۳.۲. مدل‌سازی ریاضی

در این قسمت مدل‌سازی فرآیند خرابی و تولید اجزاء و مدل‌سازی هزینه‌های سیستم بیان می‌گردد.

۳.۲.۱. مدل‌سازی فرآیند خرابی اجزاء

در این پژوهش یک سیستم تولید شامل N جزء مستقل فرض شده که یک نوع محصول با نرخ P در افق زمانی محدود $[0, T_h]$ با نرخ تقاضا ثابت و برابر D و $P > D$ تولید می‌کند. سطح موجودی اولیه صفر می‌باشد. سیستم تولیدی دسته‌هایی به اندازه Q را برای هر دوره T ، تولید می‌کند. تولید بیشتر از تقاضا، برای استفاده در زمان از کارافتادن سیستم، ذخیره می‌شود. اجزاء در یک سیستم پیچیده با ارتباط داخلی، مانند سیستم‌های سری، سیستم‌های موازی، سیستم‌های سری-موازی و سیستم‌های k -out-of- n قرار دارند. در این پژوهش از فرآیند گاما برای مدل‌سازی رفتار استهلاکی استفاده شده که برای مدل‌سازی پدیده‌های استهلاکی متفاوت مانند فرسایش و کهنگی جزءهای ساختاری، استفاده می‌شود. [۲۶] برای $1 \leq i \leq N$ فرض می‌شود $t \geq 0$ به سطح استهلاک جزء i ام در زمان t اختصاص داشته باشد. بنابر تعریف فرآیند گاما، در غیاب PM ، فرآیند تصادفی $X_i(t)$ ، پیوسته‌ی زمانی و افزایشی یکنواخت با $X_i(0) = 0$ است. افزایش $X_i(t)$ بین t_1 و t_2 مانند $X_i(t_2) - X_i(t_1)$ ، متغیری تصادفی است که از تابع چگالی احتمال گاما با پارامتر شکل $(shape)$ $\alpha_i(t_2 - t_1)$ و پارامتر مقیاس $(scale)$ β_i می‌باشد:

$$f_{t_2-t_1}^{(i)}(x) = \frac{\beta_i^{\alpha_i(t_2-t_1)} x^{\alpha_i(t_2-t_1)-1}}{\Gamma(\alpha_i(t_2-t_1))} e^{-\beta_i x}, x \geq 0 \quad (1)$$

[۲۵]

و تابع گاما به صورت $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty u^{\alpha-1} e^{-u} du, \alpha > 0$ می‌باشد. فرض می‌شود L_i معرف آستانه خرابی جزء i باشد. اگر $X_i(t) \geq L_i$ شود، گفته می‌شود که جزء i خراب است.

۳.۲.۲. مدل‌سازی فرآیند نگهداری و تعمیرات اجزاء

برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید و کاهش هزینه‌ها در پایان هر دورهی تولید، بازرسی و نت پیشگیرانه (اگر ضروری باشد) انجام می‌شود. سیستم تولیدی، دسته‌ای به اندازه Q (نخستین متغیر تصمیم مدل) را تولید می‌کند و سپس جهت بازرسی، تولید متوقف می‌شود. عملیات بازرسی، آنی، غیر مخرب و کامل است و موجب هزینه‌ی C_{in} می‌شود. بازرسی می‌تواند شرایط هر جزء، یعنی سطح استهلاک $X_i(t)$ را که برای محاسبه قابلیت اطمینان جزء i ام مفید است، در پایان n امین دورهی تولید آشکار کند. از این رو با توجه به اندازه دسته‌ی Q

فرض شود $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ به بردار حالت سیستم اختصاص داشته باشد و y_i متغیر باینری توصیف کننده‌ی حالت جزء i است پس اگر جزء i در شرایط نرمال باشد $y_i = 1$ است و اگر شرایط نرمال نداشته باشد $y_i = 0$ است. علاوه بر این با اختصاص تابع باینری $\Phi(y)$ ، تابع حالت سیستم، اگر سیستم در حال کار کردن باشد $\Phi(y) = 1$ و اگر سیستم نتواند کار کند $\Phi(y) = 0$ است. هنگامی که حالت جزء ثابت شود یعنی 0_i یا 1_i باشد، 2^{N-1} بردار حالت ممکن از سیستم یعنی $(0_i, y)$ وجود دارد. اندازه اهمیت ساختاری جزء، اثر خرابی جزء روی عملکرد سیستم را بازتاب می‌دهد. با درک بیشتر IB_i نسبت تعداد بردارهای حالت بحرانی برای جزء i که با $\eta_\Phi(i)$ مشخص شده طبق زیر فرمول‌سازی شده است:

$$\eta_\Phi(i) = \sum_{(0_i, y)} [\Phi(1_i, y) - \Phi(0_i, y)] \quad (3)$$

$$= \sum_{(0_i, y)} \left[\Phi(y_1, \dots, y_{i-1}, 1, y_{i+1}, \dots, y_n) - \Phi(y_1, \dots, y_{i-1}, 0, y_{i+1}, \dots, y_n) \right] \quad [13]$$

و متعاقباً IB_i به وسیله رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$IB_i = \frac{\eta_\Phi(i)}{2^{(N-1)}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

[13]

برای مثال، یک سیستم ۷ جزئی در شکل ۱ ارائه شده است. جزءهایی که به صورت تنها در سیستم قرار دارند (مانند جزء ۴) نسبت به اجزائی که به صورت مجموعه‌ای قرار دارند (مانند مجموعه اجزاء ۱ و ۲ و ۳) و همچنین جزءهای تنها در هر مجموعه (مانند جزء ۳ در مجموعه اجزاء ۱ و ۲ و ۳) نسبت به سایر اجزاء مجموعه خود، از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، زیرا اگر جزءهای تنها مانند جزء ۴ خراب شوند، کل سیستم خراب شده و فرآیند تولید متوقف می‌شود و همچنین اگر جزء ۳ خراب شود، کل سیستم به مسیری که از جزء ۱ و ۲ می‌گذرد وابسته می‌شود و چون این مسیر دارای دو جزء سری می‌باشد، آسیب‌پذیرتر است، بنابراین خرابی جزء ۳ باعث افزایش ریسک خرابی کلی سیستم می‌شود و این جزء مهم‌تر است. طبق ساختار سیستم، جزء ۴ که به صورت تنها در سیستم قرار دارد، دارای اهمیت بیشتری نسبت به سایر اجزاء می‌باشد. جزء ۳ مهم‌تر از جزء ۱ یا ۲ و به همین ترتیب جزء ۵ مهم‌تر از جزءهای ۶ یا ۷ است. بنابر معادله زیر، اندازه‌های اهمیت ساختاری این ۷ جزء به این صورت می‌باشند:

طول دوره‌ی تولید $t_p = \frac{Q}{P}$ است. فرض می‌شود $R_i^n(t_p | x_i)$ قابلیت اطمینان شرطی پیشبینانه جزء i ام در پایان n امین دوره‌ی تولید است که سطح استهلاک آن x_i و $x_i < L_i$ می‌باشد. قابلیت اطمینان $R_i^{n+1}(t_p | x_i)$ ، احتمال شرطی این است که جزء i ام، هنوز در حالت کارکرد در پایان $n+1$ امین دوره‌ی تولید باشد، پس داریم:

$$\begin{aligned} R_i^{(n+1)}(t_p | x_i) &= \Pr[X_i(t_{n+1}) < L_i | X_i(t_n) = x_i] \\ &= \Pr[X_i(t_n) + X_i(t_p) < L_i | X_i(t_n) = x_i] \\ &= \Pr[X_i(t_p) < L_i - x_i] = \int_0^{L_i - x_i} f_{t_p}^{(i)}(t) dt \quad (2) \\ &= 1 - \int_{L_i - x_i}^{\infty} f_{t_p}^{(i)}(t) dt = 1 - \frac{\Gamma(\alpha_i t_p, \beta_i (L_i - x_i))}{\Gamma(\alpha_i t_p)} \end{aligned}$$

جایی که $\Gamma(\alpha, \beta) = \int_x^{\infty} u^{\alpha-1} e^{-u} du, \alpha > 0, \beta \geq 0$ است.

در پایان هر دوره تولید، می‌توان از نتایج بازرسی برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان شرطی همه‌ی جزءها به غیر از جزئی که خراب شده، استفاده کرد. اگر قابلیت اطمینان جزئی کمتر از آستانه‌ی PM (دومین متغیر تصمیم مدل) باشد، آن جزء برای نت پیشگیرانه انتخاب می‌شود. در همان زمان روی جزءهای خراب نت اصلاحی انجام می‌شود. بنابراین هزینه‌ی CM ، $C_{cm}^{(i)}$ جزء i ام، بیشتر از هزینه PM آن، $C_{pm}^{(i)}$ است. هنگامی که زمان بین دو دوره‌ی تولید متوالی (یعنی زمان برای بازرسی PM) محدود باشد، باید جزءهای مناسب برای نت پیشگیرانه انتخاب شوند. بنابراین آستانه‌ی PM برخی جزءها بیشتر از دیگر اجزاء است و به برخی جزءها باید بیشتر توجه شود. برای بهینه‌سازی نت، جستجوی مقدار بهینه آستانه نگهداری هر جزء، به ویژه برای سیستم‌های پیچیده در مقیاس بزرگ، بسیار دشوار است. در این حالت، اندازه‌گیری اهمیت ساختار می‌تواند کمک کند تا اجزاء در سیستم رتبه‌بندی شود و بنابراین با ترکیب اندازه‌گیری اهمیت و سایر پارامترها، تعداد کل پارامترهای تصمیم‌گیری کاهش یابد. در این پژوهش، وابستگی بین اجزاء سیستم از نوع ساختاری در نظر گرفته شده و از معیار "اندازه برنابم" [۱۳]، برای رتبه‌بندی اهمیت جزء در سیستم استفاده می‌شود. اندازه‌گیری برنابم به ساختار سیستم و موقعیت جزء در سیستم بستگی دارد و بصورت زیر تعریف می‌شود:

۳.۲.۳. مدلسازی فرآیند تولید اجزاء

سیستم تولیدی در هر بار سیکل تولید دسته‌هایی به اندازه Q را تولید می‌کند و سپس بازرسی و فعالیت‌های نت انجام می‌شود. سیستم تولیدی مورد استفاده در این پژوهش اجرای سیاست بدون از سرگیری^{۲۴} که در پژوهش گرونولت و همکاران^{۲۵} [۲۷] بیان شده، می‌باشد؛ در واقع سیکل تولید جدید تنها زمانی که فعالیت‌های نت تکمیل گردد یا موجودی تمام شود (هر کدام دیرتر رخ دهد)، آغاز می‌گردد. سیکل تولید زمان بین دو نقطه شروع تولید است که شامل زمان‌های تولید، نت، مصرف موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی و کمبود می‌باشد. سطح موجودی ممکن، در یک سیکل تولید در شکل ۲ و ۳ و ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۲ سیستم تولید تا پایان n امین سیکل تولید عمل می‌کند و سپس عملیات بازرسی و نت انجام می‌شود. عملیات نت قبل از تمام شدن موجودی در انبار پایان می‌یابد. سیکل تولید جدید زمانی که کل موجودی‌ها مصرف شود، آغاز می‌شود. در شکل ۳ قبل از این که عملیات نت پایان یابد موجودی در انبار تمام شده و از ذخیره احتیاطی استفاده می‌شود. در شکل ۴ قبل از این که عملیات نت پایان یابد، موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی تمام می‌شود و در نتیجه کمبود رخ می‌دهد.

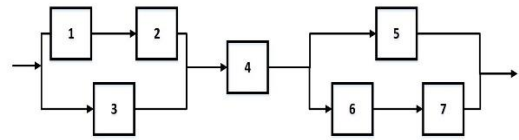
۳.۲.۴. مدلسازی هزینه‌های سیستم

فرض می‌شود که سیستم تولیدی شامل N جزء مستقل است که یک نوع از محصول را برای پاسخ به تقاضای ثابت در افق زمانی محدود تولید می‌کند. پس از گذشت هر t_p زمان تولید، برای برآورد شرایط سیستم و محاسبه‌ی قابلیت اطمینان هر جزء، بازرسی انجام می‌شود. اندازه‌ی دسته‌ی تولید را می‌توان به صورت $Q = P \times t_p$ نوشت. فرض شود N_p به تعداد کل سیکل‌های تولید در بازه‌ی زمانی $[0, T_h]$ اختصاص یابد به طوریکه سیکل تولید، شامل زمان اجرای تولید و زمان از کار افتادن سیستم باشد. هم چنین به منظور مقابله با تغییرات تقاضا در مدت زمان تحویل (به دلیل نوسان‌های پیش‌بینی نشده در مجموعه عوامل تقاضا، سفارش‌دهی، تولید و یا تامین) در سیستم، ذخیره احتیاطی نگهداری می‌شود. [۲۸] فرض می‌شود C_n^{total} هزینه کلی بوجود آمده در سیکل تولید n ام را نشان دهد، بنابراین:

$$IB_1 = IB_2 = IB_6 = IB_7 = \frac{5}{64} = 0.087125 \quad (۵)$$

$$IB_3 = IB_5 = \frac{15}{64} = 0.234375 \quad (۶)$$

$$IB_4 = \frac{25}{64} = 0.375 \quad (۷)$$



شکل ۱. ساختار سیستم هفت جزئی

همانطور که ذکر شد، هنگام تصمیم‌گیری در مورد PM ، جزء‌های "مهم" برای نت پیشگیرانه، دارای اولویت هستند. در پایان، قابلیت اطمینان پیش‌بینانه R_i^n و اندازه‌ی اهمیت ساختاری IB_i جزء i ام به صورت همزمان، برای قانون تصمیم‌گیری PM ، فرض شدند. در نتیجه، برای آستانه‌ی PM جزء i ام داریم:

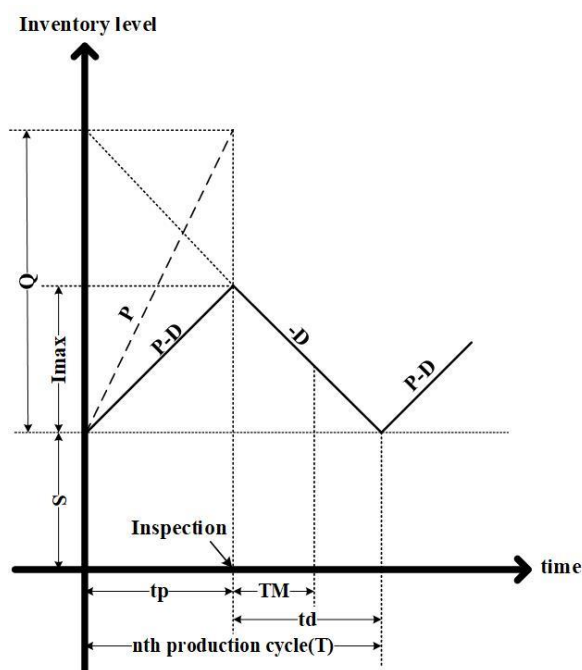
$$\xi_i = K \cdot IB_i \quad (۸)$$

به طوریکه پارامتر K ، $\left(0 \leq K \leq \frac{1}{\min_{1 \leq i \leq N} \{IB_i\}}\right)$ متغیر تصمیمی است که با اندازه دسته تولیدی Q نیاز به بهینه‌شدن دارد. آستانه PM هر جزء به وسیله جستجوی پارامتر بهینه K^* ، می‌تواند بهینه‌سازی شود. در پایان دوره‌ی تولید n ام، اگر جزء i ام خراب نباشد و قابلیت اطمینان پیش‌بینانه‌اش کمتر از ξ_i باشد $\left(R_n^{(i)} < \xi_i\right)$ ، نت پیشگیرانه انجام خواهد شد. در همه فعالیت‌های نت، سیاست نت کامل انجام می‌شود. در این پژوهش برای مقابله با تغییرات پیش‌بینی نشده تقاضا در مدت زمان تحویل در سیستم ذخیره احتیاطی نگهداری می‌شود. نگهداری ذخیره احتیاطی برای محصولات نهایی در سیستم‌های تولیدی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. پس از استفاده از موجودی در انبار، از ذخیره احتیاطی برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتری استفاده می‌شود. هم چنین هنگامی که مدت زمان انجام فعالیت‌های نت بیشتر از مدت زمان مصرف موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی باشد، کمبود (سومین متغیر تصمیم مدل) اتفاق می‌افتد. کمبود به صورت پس افت تقاضا در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که عملیات تولید مجدداً آغاز گردد ابتدا کمبود برطرف شده، سپس کل ذخیره احتیاطی مصرف شده بازسازی می‌گردد. در ادامه روال عادی تولید طی می‌شود تا زمانی که سیکل تولید به پایان برسد.

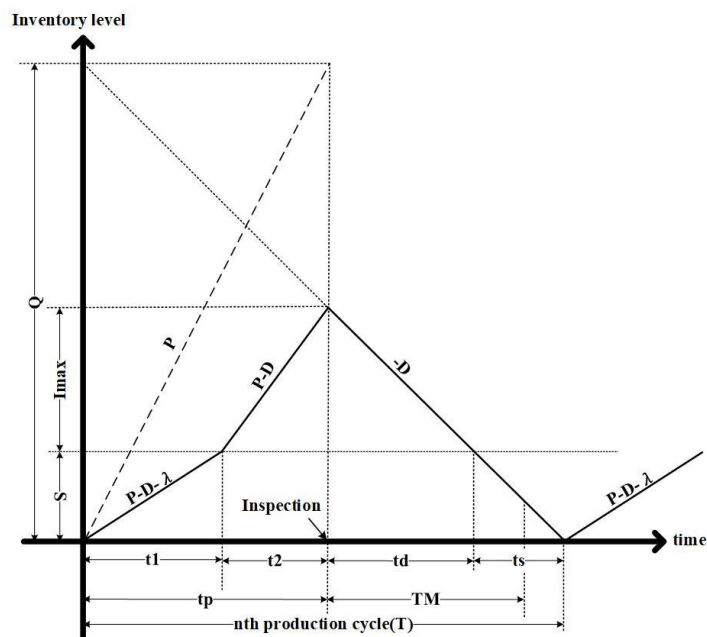
تأخیر در تأمین محصول در نظر گرفته شده است. در واقع این هزینه‌ها همان سودهایی هستند که سیستم می‌توانست به‌دست بیاورد اما به دلیل کمبود تبدیل به هزینه شدند، یعنی همان هزینه‌های پنهان اقتصادی.

$$C_n^{total} = \left[C_{setup} + C_{in} + C_n^{PM} + C_n^{CM} + C_n^{IH} + C_n^{SS} + C_n^{PSS} + C_n^{SH} \right] \quad (9)$$

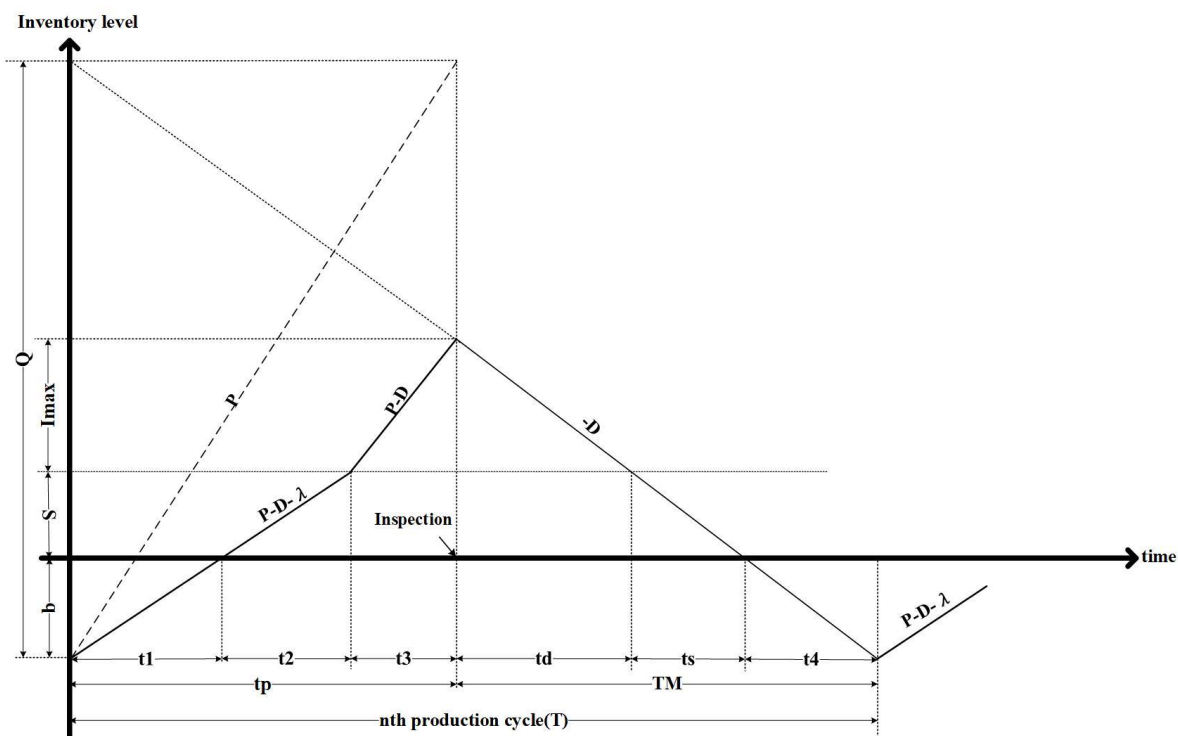
هزینه کمبود به صورت پس‌افت تقاضا در نظر گرفته می‌شود. این هزینه برای نشان دادن ضرر در ارزش پول سازنده به دلیل



شکل ۲. نمودار تغییرات سطح موجودی در حالتی که مدت زمان نت کمتر از مصرف موجودی در انبار باشد



شکل ۳. نمودار تغییرات سطح موجودی در حالتی که مدت زمان نت کمتر از مصرف موجودی در انبار بعلاوه مصرف احتیاطی باشد



شکل ۴. نمودار تغییرات سطح موجودی در حالتی که مدت زمان نت بیشتر از مدت زمان مصرف موجودی در انبار بعلاوه ذخیره احتیاطی باشد

۴. مطالعه کاربردی و یافته‌ها

در این بخش از پژوهش روابط بین هزینه‌ها محاسبه و رویکرد شبیه‌سازی مدل پژوهش بیان می‌شود.

۴.۱. محاسبه روابط هزینه‌ها

همچنین ممکن است که برخی جزءهای سیستم خراب شده باشند و عملکرد مورد انتظار را ارائه ندهند ولی در دسته‌ی جزءهای "مهم" نبوده‌اند و منجر به توقف سیستم در طول سیکل تولید نشده‌اند. از این رو در پایان دوره‌ی تولید روی مؤلفه‌های موجود در این مجموعه، نت اصلاحی انجام خواهد گرفت. هزینه CM متحمل شده در مورد اول به‌وسیله رابطه زیر فرمول نویسی می‌شود:

$$C_n^{CM} = \left(\sum_{i \in V_n} C_{cm}^i + C_f \right) \cdot I_{\{V_n' = \emptyset \mid V_n \neq \emptyset\}} \quad (12)$$

زمان نت کلی شامل زمان PM ، $T_n^{PM} = \sum_{i \in V_n'} T_{pm}^{(i)}$ و زمان CM ، $T_n^{CM} = \sum_{i \in V_n} T_{cm}^{(i)}$ است. از آنجا که عملیات نت پیشگیرانه و اصلاحی به طور هم‌زمان انجام می‌شود پس برای بدست آوردن زمان نت کلی داریم:

$$T_M = \max \{ T_n^{CM}, T_n^{PM} \} \quad (13)$$

یعنی زمان نت کلی برابر می‌شود با: مجموع زمان‌هایی که روی اجزاء مجموعه V_n' نت پیشگیرانه و مجموع زمان‌هایی که روی مجموعه جزءهای خراب نت اصلاحی انجام شود، هرکدام که بیشتر باشد.

سیستم در طول زمان دوره تولید خراب نمی‌شود و در پایان اجرای تولید برای تخمین قابلیت اطمینان هر جزء خراب نشده، مورد بازرسی قرار می‌گیرد. هزینه PM کلی، شامل هزینه ثابت راه اندازی نت C_f و هزینه نت اجزائی که قابلیت اطمینان آن‌ها کمتر از آستانه PM است، می‌باشد. فرض شود V_n به مجموعه همه جزءهای خراب در پایان دوره تولید n ام و V_n' به مجموعه جزءهایی که نیاز به نت پیشگیرانه داشته‌اند، اختصاص یابد یعنی:

$$V_n' = \{i \mid R_n^i < \xi_i, i \in V_{sys} / V_n\} \quad (10)$$

به طوریکه R_n^i قابلیت اطمینان جزء i ، ξ_i آستانه PM جزء i ، V_{sys} به مجموعه همه جزءهای سیستم تولید و V_n / V_{sys} به همه اجزاء سیستم به غیر از جزءهای خراب اختصاص داشته باشد، پس هزینه PM کلی (C_n^{PM}) به صورت زیر فرمول نویسی می‌شود:

$$C_n^{PM} = \left(\sum_{i \in V_n'} C_{pm}^i + C_f \right) \cdot I_{\{V_n' \neq \emptyset\}} \quad (11)$$

مدت زمان عملیات نت از مدت زمان مصرف موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی بیشتر بوده و کمبود به وجود می‌آید. بعد از پایان عملیات نت و شروع مجدد عملیات تولید محصول تولید شده هم به مصرف مشتری می‌رسد (با نرخ D)، هم میزان کمبود را جبران می‌کند (با نرخ $P-D-\lambda$)، هم میزان ذخیره احتیاطی را تا رسیدن به سطح S بازسازی می‌کند (با نرخ λ) و مابقی وارد انبار می‌شود (با نرخ $P-D-\lambda$). پس هزینه‌ها برابر است با:

$$C_{n(III)}^{IH} + C_{n(III)}^{SS} + C_{n(III)}^{PSS} + C_{n(III)}^{SH} \\ = C_h \cdot \left[\left(\frac{P(P-D)}{2D} \right) \left(\frac{Q}{P} - \frac{S+b}{P-D-\lambda} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{S}{2} \right) \left(\frac{S(P-\lambda)}{D(P-D-\lambda)} + \left(\frac{2P}{D} \right) \left(\frac{Q}{P} - \frac{S+b}{P-D-\lambda} \right) \right) \right] \\ + C_{pss} \cdot S + C_{sh} \cdot \left(\frac{b^2(P-\lambda)}{2D(P-D-\lambda)} \right) \quad (16)$$

بنابر موارد گفته شده متوسط نرخ هزینه در واحد زمان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C(Q, K, b) = \frac{1}{T_h} \sum_{n=1}^{N_p} C_n^{total} \\ = \frac{1}{T_h} \sum_{n=1}^{N_p} \left\{ \begin{aligned} &C_{setup} + C_{in} + C_n^{PM} + C_n^{CM} \\ &+ (C_{n(I)}^{IH} + C_{n(I)}^{SS}) \\ &+ (C_{n(II)}^{IH} + C_{n(II)}^{SS} + C_{n(II)}^{PSS}) \\ &+ \left(C_{n(III)}^{IH} + C_{n(III)}^{SS} \right) \\ &+ \left(C_{n(III)}^{PSS} + C_{n(III)}^{SH} \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

۴.۲. رویکرد شبیه‌سازی

با توجه به ساختار پیچیده سیستم و وابستگی بین اجزاء، بدست آوردن نرخ متوسط هزینه به صورت تجزیه و تحلیل جبری بسیار دشوار می‌باشد، بنابراین از روش شبیه‌سازی برای محاسبه نرخ متوسط هزینه استفاده می‌شود. این روش نخست پارامترهای اولیه را تعریف کرده، سپس برای اجزاء سیستم، انجام انواع نت‌ها تصمیم‌گیری می‌شود و در نهایت نرخ متوسط هزینه در واحد زمان

به علاوه برای هزینه‌های مربوط به ذخیره احتیاطی و کمبود داریم: سطح موجودی ذخیره احتیاطی S در نظر گرفته شده که در فاصله زمانی بین دو سیکل تولید در صورت لزوم مورد استفاده قرار می‌گیرد و با نرخ λ ذخیره می‌شود. بر این اساس جهت محاسبه هزینه‌های ذخیره احتیاطی و هزینه‌های کمبود سه حالت ممکن است رخ بدهد:

الف) مدت زمان نت کوتاه‌تر از مدت زمان مصرف موجودی در انبار باشد ($T_M \leq t_d$): در این حالت پس از گذشت زمان t_p بازرسی انجام می‌شود و همه جزءهای خراب به همراه همه جزءهایی که آستانه خرابی آن‌ها کمتر از آستانه PM باشد، تعمیر می‌گردند. هزینه نگهداری موجودی در انبار و نگهداری ذخیره احتیاطی برابر است با:

$$C_{n(I)}^{IH} + C_{n(I)}^{SS} = C_h \cdot \left(\frac{Q^2(P-D)}{2PD} + \frac{SQ}{D} \right) \quad (14)$$

ب) مدت زمان نت بین مدت زمان مصرف موجودی در انبار و مجموع مدت زمان مصرف موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی باشد ($t_d < T_M \leq t_d + t_s$): در این حالت، بعد از اتمام موجودی در انبار از ذخیره احتیاطی استفاده می‌شود به طوریکه بعد از اتمام عملیات نت اگر ذخیره احتیاطی باقی مانده باشد مصرف شده و سپس تولید آغاز می‌شود. بعد از شروع مجدد عملیات تولید محصول تولید شده هم به مصرف مشتری می‌رسد (با نرخ D)، هم میزان ذخیره احتیاطی را تا رسیدن به سطح S بازسازی می‌کند (با نرخ λ) و مابقی وارد انبار می‌شود (با نرخ $P-D-\lambda$). هزینه نگهداری موجودی در انبار و نگهداری ذخیره احتیاطی و تولید مقدار مصرف شده آن برابر است با:

$$C_{n(II)}^{IH} + C_{n(II)}^{SS} + C_{n(II)}^{PSS} \\ = C_h \cdot \left[\left(\frac{P(P-D)}{2D} \right) \left(\frac{Q}{P} - \frac{S}{P-D-\lambda} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{S}{2} \right) \left(\frac{S(P-\lambda)}{D(P-D-\lambda)} + \left(\frac{2P}{D} \right) \left(\frac{Q}{P} - \frac{S}{P-D-\lambda} \right) \right) \right] \\ + C_{pss} \cdot S \quad (15)$$

ج) مدت زمان نت بیش‌تر از مجموع مدت زمان مصرف موجودی در انبار و ذخیره احتیاطی باشد ($t_d + t_s < T_M$): در این حالت هم به‌طور کلی سیستم مانند دو قسمت قبل رفتار می‌کند ولی

شرطی برای جزءهای غیرخراب طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

اکنون قابلیت اطمینان پیش‌بینانه شرطی با آستانه PM مقایسه می‌شود. جزءهایی که قابلیت اطمینان آنها کمتر از آستانه PM باشد برای نت پیشگیرانه انتخاب می‌شوند. مجموعه این اجزا طبق (۱۰) به وسیله V'_n نشان داده می‌شود.

بعد از عملیات نت پیشگیرانه سطح خرابی و مجموعه PM به روز رسانی شود:

$$x_i = 0 \quad (i \in V_{sys} / V_{failed}) \quad , \quad V'_n = \phi \quad (22)$$

- روی اجزا خراب در مجموعه V_{failed} عملیات نت اصلاحی انجام می‌شود، بعد از CM سطح خرابی و مجموعه اجزا خراب به روز رسانی می‌شود:

$$x_i = 0 \quad (i \in V_{failed}) \quad , \quad V_{failed} = \phi \quad (23)$$

- هزینه بازرسی و نت برابر است با:

$$C_{in} + C_{n(I)}^{PM} + C_{n(I)}^{CM} = C_{in} + C_f + \sum_{i \in V'_n} C_{pm}^{(i)} + \sum_{i \in V_{failed}} C_{cm}^{(i)} \quad (24)$$

- مدت زمان نت ماکسیم مدت زمان PM و CM می‌باشد:

$$T_M = \max \left\{ \sum_{i \in V_{failed}} T_{cm}^{(i)} , \sum_{i \in V'_n} T_{pm}^{(i)} \right\} \quad (25)$$

مقایسه T_M و t_d و t_s :

- محاسبه زمان t_d :

$$t_d = \left(\frac{P-D}{D} \right) \left(\frac{Q}{P} \right) \quad (26)$$

الف) اگر $T_M \leq t_d$ طبق (۱۴) هزینه‌ها محاسبه شده و $T_1 = t_d$.

- محاسبه زمان‌های t_s و t_d :

$$t_s = \left(\frac{S}{D} \right) \quad \text{و} \quad t_d = \left(\frac{P-D}{D} \right) \left(\frac{Q}{P} - \frac{S}{P-D-\lambda} \right) \quad (27)$$

ب) اگر $t_d < T_M \leq t_d + t_s$ باشد، طبق (۱۵) هزینه‌ها محاسبه شده و $T_1 = t_d + t_s$.

ج) اگر $t_d + t_s < T_M$ باشد، رابطه (۱۶) برای هزینه‌ها استفاده شده و $T_1 = T_M$.

در سیکل تولید m محاسبه می‌گردد. برای دوره پایداری روش، تکرار تا آن جایی انجام می‌شود که سیستم به وضعیت پایدار برسد و تغییرات آن دیگر به طور قابل توجهی نوسان نداشته باشد. همچنین برای تحلیل آماری و اعتبار سنجی مدل از روش تحلیل حساسیت در ادامه استفاده شده است. شرح روش شبیه سازی در گام‌های زیر بیان شده است:

گام ۱: تعیین پارامترهای اولیه

پارامترهای مربوط به هر جزء: $\alpha_i, \beta_i, IB_i, N$

پارامترهای سیستم تولید:

$$P, D, \lambda, T_h, C_{setup}, C_h, C_{pss}, C_{sh}$$

پارامترهای نت: $C_{in}, C_f, C_e, C_{pm}^{(i)}, C_{cm}^{(i)}, T_{pm}^{(i)}, T_{cm}^{(i)}$

متغیرهای تصمیم و شبیه سازی: K, Q, b, ε

گام ۲: شبیه سازی فرآیند خرابی هر جزء

۱-۲ آغاز کردن با $\tau = 0$

۲-۲ برای زمان نمونه ε ، برای هر جزء افزایش تصادفی سطح خرابی تولید شود یعنی:

$$\Delta x_i(\varepsilon) = \text{random}(\text{'gamma'}, \alpha_i \varepsilon, \beta_i) \quad (18)$$

سپس سطح خرابی هر جزء و مجموعه اجزاء خراب به روز رسانی می‌شود:

$$x_i = x_i + \Delta x_i \quad (19)$$

$$\tau = \tau + \varepsilon \quad (20)$$

$$\{V_{failed} = V_{failed} \cup i | \text{خراب}\} \quad (21)$$

- اگر $\tau < Q/P$ ، بازگشت به گام ۲-۲ و در غیر این صورت رفتن به گام ۳.

- اگر هیچ جزئی خراب نشود و $\tau < Q/P$ باشد رفتن به گام ۲-۲ و در غیر این صورت اگر $\tau = Q/P$ رفتن به گام ۳.

گام ۳: انجام تصمیمات PM و CM و محاسبه هزینه‌های کلی رخ داده در n امین سیکل تولید

- سطح خرابی جزء i را در نظر گرفته:

$$x_i \quad (i \in V_{sys} / V_{failed})$$

پس هزینه کل برابر است با:

$$C_n^{total} = \left(C_{setup} + C_{in} + C_n^{PM} + C_n^{CM} + C_n^{IH} + C_n^{SS} + C_n^{PSS} + C_n^{SH} \right) \quad (28)$$

• $n = n + 1$ و اگر $T_{total} < T_h$ باشد بازگشت به گام ۲، در غیر این صورت رفتن به گام ۴.

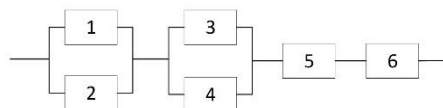
گام ۴: محاسبه نرخ متوسط هزینه در واحد زمان در سیکل تولید n

$$C(Q, K, b) = \frac{1}{T_h} \sum_{m=1}^{N_p} C_m^{total} \quad (29)$$

۵. مثال عددی و تحلیل حساسیت

در این بخش برای بررسی این که استراتژی این پژوهش چگونه در سیستم‌های پیچیده به کار برده شده، از مثال عددی استفاده می‌شود و نتایج تفسیر می‌شود. سپس با تحلیل حساسیت تاثیر پارامترهای مختلف مسئله بر تابع هدف و اعتبار سنجی مدل بررسی می‌گردد.

برای مثال عددی، طبق مثال عددی عنوان شده در پژوهش [۶]، یک ابزار تولید خوشه‌ای برای تولید ویفر در صنعت نیمه‌هادی‌ها که از یک سلول ربات و چندین اتاق پردازش مختلف تشکیل شده است، در نظر گرفته می‌شود. نحوه قرار گیری اجزاء این سیستم طبق شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. ساختار یک سیستم شش جزئی

اهمیت اجزاء طبق رابطه IB_i محاسبه می‌شود. رفتار خرابی هر جزء از تولید گام با پارامتر شکل α_i و پارامتر مقیاس β_i و مدت زمان نت پیشگیرانه و اصلاحی به صورت تصادفی و از توزیع نمایی با پارامترهای $\mu_{cm}^{(i)}$ ، $\mu_{pm}^{(i)}$ پیروی می‌کنند که مقادیر این پارامترها در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، در جدول ۳ سایر هزینه‌ها آورده شده است.

نرخ تولید، نرخ تقاضا و نرخ تولید ذخیره احتیاطی به ترتیب ۲۴، ۲۰ و ۲ واحد در روز، افق زمانی ۲ ساله و سطح ذخیره احتیاطی ۲ واحد محصول در نظر گرفته شده است. برای یافتن سیاست بهینه هم‌زمان تولید و نت از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم افزار

متلب *R2018b* استفاده شده است. نتایج پیاده سازی این الگوریتم و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسئله پژوهش برای ۱۰۰ تکرار و پس از پایدار شدن مدل در جدول ۴ به دست آمده است. طبق این جدول مقدار بهینه تولید محصول ۷۰۸ واحد محصول در افق زمانی ۲ ساله و مقدار بهینه کمبود طبق شرایط مثال ۷۴ واحد محصول به دست آمده است. همچنین مقدار بهینه متغیر مؤثر در محاسبه آستانه نت پیشگیرانه برابر با ۴/۴۵ می‌باشد. با توجه به مقادیر بهینه این متغیرهای تصمیم، مقدار بهینه تابع هدف برابر با ۶۰/۱۸ واحد هزینه محاسبه گردیده است. همچنین آستانه نت پیشگیرانه هر جزء برابر است با:

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = 0.42 \quad \xi_5 = \xi_6 = 1.25$$

جدول ۲. پارامترهای اجزاء

$\mu_{cm}^{(i)}$	$\mu_{pm}^{(i)}$	$C_{cm}^{(i)}$	$C_{pm}^{(i)}$	IB_i	β_i	α_i	component
1	2	440	280	0.0938	0.9	1.1	1
1	2	440	280	0.0938	0.9	1.1	2
0.67	1	380	240	0.0938	1.3	1.2	3
0.67	1	380	240	0.0938	1.3	1.2	4
0.5	1	550	320	0.2813	1.2	0.7	5
0.4	0.67	680	520	0.2813	1.1	0.8	6

جدول ۳. هزینه‌های سیستم تولید

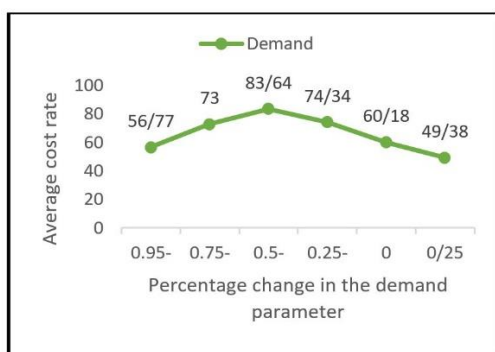
C_{setup}	C_{in}	C_f	C_h	C_{pss}	C_{sh}
50	30	60	0.5	15	50

جدول ۴. مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم

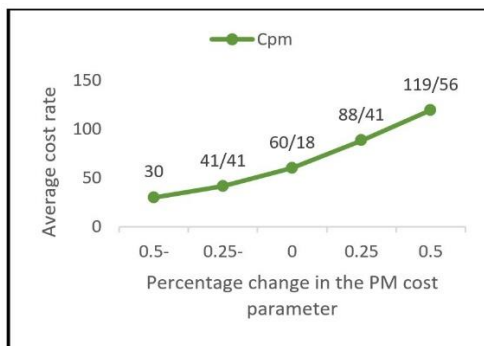
b^*	K^*	Q^*	$C_{(Q,k,b)}^*$
74	4.45	708	60.18

برای تحلیل حساسیت تاثیر تغییر پارامترهای مسئله بر روی نرخ میانگین هزینه‌ها بررسی می‌شود. بدین منظور، یکی از پارامترها از ۵۰٪ تا ۵۰٪+ مقدار خود تغییر می‌کند در حالیکه بقیه پارامترها ثابت هستند و نتایج این تغییرات روی نرخ میانگین هزینه‌های سیستم بررسی و مقایسه می‌شود. یعنی پارامتر مورد نظر از نصف مقدار اولیه خود (۵۰٪-) تا میزان ۱/۵ برابر مقدار اولیه (۵۰٪+) تغییر می‌کند (البته پارامتر تقاضا از ۹۵٪- تا ۲۵٪+ مقدار اولیه خود تغییر می‌کند یعنی از ۱ واحد تا ۲۵ واحد). پارامترهایی که به منظور تغییرات انتخاب می‌شوند، دارای عدم قطعیت هستند و مقادیر آن‌ها با توجه به عوامل بیرونی تعیین می‌شود که عبارتند از تقاضا، هزینه نت‌های اصلاحی و پیشگیرانه.

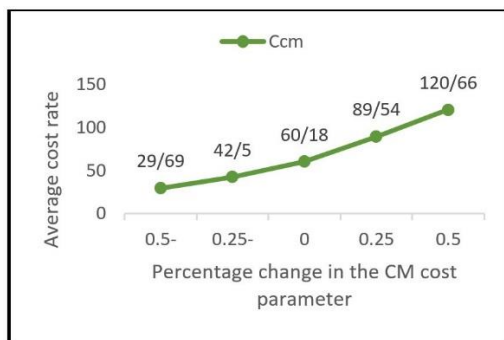
این نمودار تندتر می‌باشد. این بدان معناست که هزینه‌های PM بخش اصلی کل هزینه‌ها هستند و انتخاب استراتژی‌های نت پیشگیرانه مستقیماً بر هزینه‌های سیستم تولیدی اثر می‌گذارد، زیرا انتخاب این استراتژی‌ها نه تنها بر خود هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه اثر دارند بلکه بر قابلیت اطمینان پیش‌بینانه سیستم نیز اثرگذار هستند و تاثیر زیادی بر عملکرد سیستم دارد. بنابراین مدیران سیستم‌های تولیدی نه تنها بر برنامه‌ریزی تولید بلکه در مورد تصمیم‌گیری بر انجام فعالیت‌های نت به‌ویژه نت پیشگیرانه نیز باید تمرکز داشته باشند. انتخاب سیاست تولید و نگهداری مناسب می‌تواند هزینه‌های سیستم را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.



شکل ۶. نمودار تاثیر تغییرات پارامتر تقاضا روی نرخ میانگین هزینه



شکل ۷. نمودار تاثیر تغییرات پارامتر هزینه نت پیشگیرانه روی نرخ متوسط هزینه



شکل ۸. نمودار تاثیر تغییرات پارامتر هزینه نت اصلاحی روی نرخ متوسط هزینه

طبق شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که $C(Q, K, b)$ نسبت به تغییرات تقاضا حساس بوده به طوری که نمودار تغییرات پارامتر تقاضا روی نرخ میانگین هزینه به صورت سهمی رسم می‌شود و این بدان معناست که با تغییر تقاضا تا مقدار $D=10$ (یعنی ۵۰٪- مقدار اولیه) نرخ متوسط هزینه افزایش می‌یابد. بعد از آن با تغییر تقاضا تا مقدار ۲۵ واحد در روز (یعنی ۲۵٪+ مقدار اولیه)، نرخ متوسط هزینه کاهش می‌یابد. این بدان معناست که همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود در زمانی که تقاضا به نصف مقدار اولیه خود می‌رسد، بیشترین هزینه به سیستم وارد می‌شود. در این نقطه سیستم بیشترین ناکارآمدی را تجربه می‌کند زیرا سیستم موجودی کافی ندارد و چون تقاضا کم شده، اندازه دسته تولید کوچک شده و در نتیجه فاصله بین تولیدها زیاد شده و حتی با تقاضای کم، موجودی و ذخیره اطمینان تمام شده و کمبود رخ داده است و بنابراین نرخ هزینه به بیشترین مقدار خود رسیده است. این نقطه می‌تواند به عنوان هشدار برای سطح بحرانی تقاضا در نظر گرفته شود. مجدد از این نقطه به بعد یا قبل با افزایش و کاهش تقاضا هزینه‌ها کاهش می‌یابد زیرا سیستم خود را برای تقاضای بالا یا پایین آماده کرده و از نیروی انسانی و منابع بهتر استفاده می‌شود و هزینه‌های سیستم از جمله هزینه کمبود کاهش می‌یابد. پس با توجه به نمودار رسم شده و تغییرات قابل توجه هزینه‌ها با تغییر تقاضا، نتیجه‌گیری می‌شود که تابع هدف مسئله تحقیق نسبت به تغییرات تقاضا حساس می‌باشد.

بر اساس نمودار رسم شده در شکل ۷ از آنجا که با نصف شدن پارامتر هزینه نت پیشگیرانه، تابع نرخ متوسط هزینه از مقدار ۶۰/۱۸ به ۳۰ نزول پیدا کرده و تقریباً نصف شده است و همچنین با ۱/۵ برابر شدن آن هم به مقدار ۱۱۹/۵۶ رسیده و حدوداً ۲ برابر شده، پس تابع نرخ متوسط هزینه نسبت به هزینه نت پیشگیرانه بسیار حساس است و با تغییر این پارامتر، تغییرات محسوسی در آن مشاهده می‌شود.

بر اساس شکل ۸ از آنجا که با نصف شدن پارامتر هزینه نت اصلاحی، تابع نرخ متوسط هزینه از مقدار ۶۰/۱۸ به ۳۷/۶۹ نزول پیدا کرده و ۰/۳۷ درصد کاهش داشته است و همچنین با ۱/۵ برابر شدن آن هم به مقدار ۹۰/۶۶ رسیده و حدوداً ۱/۵ برابر شده، پس تابع نرخ متوسط هزینه نسبت به هزینه نت اصلاحی حساس است.

از مقایسه دو نمودار رسم شده در شکل ۷ و شکل ۸ درمی‌یابیم که تابع نرخ متوسط هزینه به تغییرات پارامتر هزینه نت پیشگیرانه نسبت به تغییرات هزینه نت اصلاحی حساس‌تر بوده است و شیب

research	Optimal value of decision parameters	Minimum average cost rate
<i>The results of the basic research[۶]</i>	$Q^* = 524$, $K^* = 3.27$ $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = 0.31$ $\xi_5 = \xi_6 = 0.92$	89.34
<i>The results of the present study</i>	$Q^* = 708$, $K^* = 4.45$ $b^* = 74$ $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_4 = 0.42$ $\xi_5 = \xi_6 = 1.25$	60.18

برای تحقیقات آتی، به منظور واقعی تر بودن مدل می توان چند فرض را لحاظ کرد. از جمله این که رخ دادن خرابی پیش از رسیدن به نقطه بازرسی اتفاق بیافتد و سیستم متوقف شود یا بعد از تعمیرات اجزاء حالت کامل در نظر گرفته نمی شود و مثلاً اجزاء به صورت جزئی یا ناقص تعمیر می گردند. هم چنین می توان نرخ تقاضا را به صورت احتمالی لحاظ کرد.

در این مقاله سیاست بهینه سازی همزمان نت و برنامه ریزی تولید برای سیستم های تولید چند مؤلفه ای با در نظر گرفتن ذخیره احتیاطی مورد مطالعه قرار گرفت. برای اولویت بندی اجزاء در این سیستم از معیاری به نام اهمیت ساختاری استفاده شد. هم چنین، برای تصمیم گیری راجع به نت پیشگیرانه هر جزء، قابلیت اطمینان بررسی شد. مدل هزینه کلی شامل هزینه راه اندازی، هزینه بازرسی، هزینه نت پیشگیرانه و اصلاحی، هزینه نگهداری موجودی در انبار، هزینه نگهداری ذخیره احتیاطی، هزینه بازپرسی آن و هزینه کمبود می باشد. از آن جا که محاسبه نرخ متوسط هزینه به صورت تحلیلی امری دشوار است بنابراین، از روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است. این الگوریتم با محاسبه مقدار سه متغیر تصمیم اندازه دسته تولید، آستانه نت پیشگیرانه و مقدار بهینه کمبود، مقدار هزینه های کل سیستم را کمینه می کند. برای بررسی مدل مثال عددی آورده شده است.

از مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش پایه [۶] طبق جدول ۵ می توان مشاهده کرد که در نظر گرفتن استراتژی این مقاله نسبت به مقاله پایه منجر به افزایش مقدار اقتصادی تولید به اندازه ۳۵ درصد یعنی از میزان ۵۲۴ واحد به ۷۰۸ واحد، کاهش متغیر موثر در محاسبه آستانه نت و در نتیجه آن افزایش مقادیر آستانه نت پیشگیرانه می شود. این تغییر مقادیر بدین معناست که در حالت جدید بازرسی بعد از هر ۷۰۸ واحد محصول انجام می شود چون هم ذخیره احتیاطی در سیستم موجود است و هم کمبود به صورت پس افت تقاضا لحاظ می گردد. پس از بازرسی اگر قابلیت اطمینان پیشبینانه اجزاء ۱ و ۲ و ۳ و ۴ کمتر از ۰/۴۲ و اجزاء ۵ و ۶ کمتر از ۱/۲۵ باشد، عملیات نت پیشگیرانه انجام می شود که نسبت به مقاله پایه این آستانه بهبود یافته است. یکی از موارد مهم در مقایسه این دو پژوهش، کاهش هزینه های سیستم های چند مؤلفه ای و پیچیده، به میزان ۳۲ درصد است. یعنی هزینه ها در پژوهش پایه ۸۹/۳۴ واحد پولی بوده ولی در پژوهش حاضر با کاهش ۳۲ درصدی به میزان ۶۰/۱۸ واحد پولی رسیده است و به اندازه ۲۹/۱۶ واحد پولی صرفه جویی شده است. این میزان کاهش هزینه باعث بهبود عملکرد سیستم و در نهایت افزایش میزان سود شرکت های تولیدی خواهد شد.

- ^۱ EOQ: Economic Order Quantity
- ^۲ R.H.Wilson
- ^۳ EPQ: Economic Production Quantity
- ^۴ PM: Preventive maintenance
- ^۵ CM: Corrective maintenance
- ^۶ Predetermined Maintenance Actions
- ^۷ CBM: Condition Based maintenance
- ^۸ OM: Opportunity Maintenance
- ^۹ Stochastic Dependence
- ^{۱۰} Economic Dependence
- ^{۱۱} Structural Dependence
- ^{۱۲} Birnbaum
- ^{۱۳} Pal et al.
- ^{۱۴} Tabatabaei and Alimohamadi
- ^{۱۵} Keizer et al.
- ^{۱۶} Nguyen et al.
- ^{۱۷} Cheng et al.
- ^{۱۸} Babaeimorad et al
- ^{۱۹} Cheng and Li
- ^{۲۰} Tian et al.
- ^{۲۱} Zhang et al.
- ^{۲۲} Li et al.
- ^{۲۳} Birnbaum's measure
- ^{۲۴} No-Resumption
- ^{۲۵} Groenevelt et al

منابع (References)

- ۱. McKay, K. and Wiers, V., ۲۰۰۴. *Practical Production Control: A Survival Guide for Planners and Schedulers*. J. Ross Publishing. ۱st Edn.
- ۲. Geurtsen, M., Didden Jeroen, B.H.C., Adan, J., Atan, J. and Adan, I., ۲۰۲۳. Production, maintenance and resource scheduling: A review. *European Journal of Operational Research*, 305(۲), pp. ۵۰۱-۵۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.040>
- ۳. Nikufekr, M. and Abdulhazade, V., ۲۰۲۳. *Planning and Control of Production and Inventories*. ۷ Edn. [In Persian]
- ۴. Hendry, L.C. and Kingsman, B.G., ۱۹۸۹. Production planning systems and their applicability to make-to-order companies. *European journal of operational research*. 40(۱), pp. ۱-۱۵. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90266-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90266-X)

- ۵. Monk, E.F. and Wagner, B.J., ۲۰۱۳. *Concepts in Enterprise Resource Planning*. Course Technology, Cengage Learning. ۴th Edn.
- ۶. Cheng, G.Q., Zhou, B.H. and Li, L., ۲۰۱۷. Joint optimization of lot sizing and condition-based maintenance for multi-component production systems. *Computers and Industrial Engineering*, 110, pp. ۵۳۸-۵۴۹. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.033>
- ۷. Moazam-Jazi, E., Tavakkoli-Mogh, R. and Sangroudi, H.A., ۲۰۲۲. A mathematical model for dynamic maintenance grouping considering discrete performance of a multi-component system. *Sharif Journal of Industrial Engineering and Management*, 39 (۱), pp. ۳-۲۱. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j75.2022.06610.2163>
- ۸. Ansari Chaharsoughi, F., ۲۰۱۴. Meta-analysis of knowledge assets for continuous improvement of maintenance cost controlling. Thesis for PhD. <https://dspace.ub.uni-siegen.de/handle/ubsi/۸۴۰>
- ۹. Zheng, R., Fang, H. and Hu, C., ۲۰۲۴. Joint optimization of inspection and condition-based maintenance for a deteriorating product under extended warranty. *Reliability Engineering and System Safety*, 245, pp. ۱۱۰۰۴۳. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110043>
- ۱۰. Nguyen, K.-A., Do, P. and Grall, A., ۲۰۱۷. Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using Birnbaum's structural importance. *Reliability Engineering and System Safety*, 168, pp. ۲۴۹-۲۶۱. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.05.034>
- ۱۱. Ben-Daya, M., Kumar, U. and Murthy, D.N.P., ۲۰۱۶. *Introduction to Maintenance Engineering: Modelling, Optimization and Management*. John Wiley and Sons Ltd, ۱st Edn., pp. ۷۴-۸۳. Chichester.
- ۱۲. Nguyen, K.-A., Do, P. and Grall, A., ۲۰۱۴. Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 1(۴), pp. ۲۲۸-۲۴۵. <https://doi.org/10.1080/2330.2674.2014.983082>
- ۱۳. Birnbaum, L., ۱۹۶۹. *On the importance of different elements in a multi-element system*. Multivariate Analysis, 2, pp. ۱-۲۰. Academic Press, New York.
- ۱۴. Borgonovo, E., Aliee, H., Glab, M. and Teich, J., ۲۰۱۶. A new time-independent reliability importance measure. *European Journal of Operational Research*, 254(۲), pp. ۴۲۷-۴۴۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.0۵۴>
- ۱۵. Hatami, M., Shahrokhi, M., Pouresmaeeli, M. and Moakedi, H., ۲۰۱۷. Optimization sequence of preventive maintenance activities for a repairable multi-component

series system. *Sharif Journal of Industrial Engineering and Management*, 33 (۱), pp. ۵۵-۶۳. <https://doi.org/10.24200/j.10.17.0070>

۱۶. Pal, B., Sana, S.S. and Chaudhuri, K., ۲۰۱۳. A mathematical model on EPQ for stochastic demand in an imperfect production system. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(۱), pp. ۲۶۰-۲۷۰. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.11.009>

۱۷. Nilipour Tabatabaei, A. and Alimohamadi, M., ۲۰۱۳. Developing EPQ model considering preventive maintenance, defective product, shortage and work in process inventory. *Research in Production and Operations Management*, ۴(۱), pp. ۶۹-۸۴. [In Persian] https://jpom.ui.ac.ir/article_۱۹۷۹۳.html?lang=en

۱۸. Keizer, M.C.O., Teunter, R.H. and Veldman, J., ۲۰۱۷. Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components. *European Journal of Operational Research*, 257(۱), pp. ۲۰۹-۲۲۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.047>

۱۹. Cheng, G.Q., Zhou, B.H. and Li, L., ۲۰۱۸. Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 175, pp. ۲۵۱-۲۶۴. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.03.020>

۲۰. Babaeimorad, S., Fattahi, P. and Bagheri, H., ۲۰۱۹. Joint optimization of maintenance and production scheduling with considering the back of order and probabilistic demand. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 7(۱۴), pp. ۴۷-۵۷. [In Persian] <https://doi.org/10.22084/jer.2019.19043.1870>

۲۱. Cheng, G. and Li, L., ۲۰۲۰. Joint optimization of production, quality control and maintenance for serial-parallel multistage production systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 204, pp. ۱۰۷-۱۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107146>

۲۲. Tian, S., Zhang, N. and Fouladirad, M., ۲۰۲۳. An integrated optimization of lot-sizing and condition-based maintenance policy of a two-stage deteriorating system. *Computers and Industrial Engineering*, 179, pp. ۱۰۹۲۲۳. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109223>

۲۳. Zheng, N., Cai, K., Deng, Y. and Zhang, J., ۲۰۲۴. Joint optimization of condition-based maintenance and condition-based production of a single equipment considering random yield and maintenance delay. *Reliability Engineering and System Safety*, 241 (۱۰۹۶۹۴). <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109694>

۲۴. Zhang, H., Wang, Z., Liu, X., Gaudoin, O. and Xie, M., ۲۰۲۵. Joint optimization of condition-based production and maintenance with mutual production-deterioration dependencies. *Reliability Engineering and System Safety*, 256 (۱۱۰۶۷۹). <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110679>

۲۵. Li, S., Yang, Z., He, J., Ma, C., Wang, L., Liu, Y. and Nie X., ۲۰۲۵. Joint production, quality and condition-based maintenance strategy for manufacturing system considering the dynamic customer demand under delivery performance. *Computers and Industrial Engineering*, ۲۰۷ (۱۱۱۲۷۱). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111271>

۲۶. Van Noortwijk, J.M., ۲۰۰۹. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 94(۱), pp. ۲-۲۱. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.019>

۲۷. Groenevelt, H., Pintelon, L. and Seidmann, A., ۱۹۹۲. Production lot sizing with machine breakdowns. *Management Science*, 38(۱), pp. ۱۰۴-۱۲۳. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.38.1.104>

۲۸. Pooya, A., Tavakoli, A. and Fakhlaei, N., ۲۰۱۴. Designing a dynamic model for selecting appropriate scenario of safety stock level in MRP system case study: Mashhad panel barsava manufacturing company. *Organizational Resources Management Researches*, 7(۴), pp. ۲۲-۴۵. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22286977.1392.3.4.5.8>

۲۹. Mehri-Ghahfarokhi, M. and Yousefi, O., ۲۰۲۲. Simultaneous optimization of production and maintenance decisions for multi-component systems using mathematical modeling. Master's Thesis, Malek Ashtar University of Technology. [In Persian]