



## Intelligent Energy Consumption Optimization in Flexible Job Shop Scheduling Considering Reliability-Centered Maintenance (RCM)

- Mohammad Hassan Sadeghpour**  Ph.D. in Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
- Ali Mohtashami** \* Associate Professor of Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
- Seyed Habib A. Rahmati**  Assistant Professor of Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran
- Mostafa Zandieh**  Professor of Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran

### Abstract

Maintenance is a significant cost factor in supply chains and production systems. Intelligent maintenance systems are gaining global interest with the rise of IT-based technologies. This study focuses on a new reliability-centered maintenance (RCM) method, where an intelligent system decides on repair or replacement based on system reliability in the practical flexible job shop scheduling problem (FJSP). The research introduces a balance by integrating industrial units' green production and energy consumption with traditional objectives like production costs and system reliability in a multi-objective framework. Another key aspect is the consideration of less

\* Corresponding Author: [mohtashami07@gmail.com](mailto:mohtashami07@gmail.com)

**How to Cite:** Sadeghpour, M. H., Mohtashami, A., Rahmati, S. H., Zandieh, M. (2024). Intelligent Energy Consumption Optimization in Flexible Job Shop Scheduling Considering Reliability-Centered Maintenance (RCM), *Industrial Management Studies*, 22(73), 1-56.

developed regions as a social factor in the energy calculation model, resembling the Ministry of Energy's computational models. The reliability model is tailored for a complex system with multiple machines having time-dependent lifespans and repair probabilities, where operation times, maintenance times, and post-repair reliability levels are all stochastic. Metaheuristic algorithms combined with simulation-based optimization are used to solve the model. Statistical and non-statistical methods are used to depict the performance of the algorithms. The study shows that these algorithms effectively solve complex multi-objective stochastic problems and can be considered as a decision support system (DSS) for software developers working on real-world applications.

## **Introduction**

In recent years, organizations have increasingly acknowledged the critical importance of maintenance activities. These activities have emerged as a fundamental cost factor, and diligent attention to them can prevent numerous additional expenses. Maintenance encompasses actions aimed at preserving or restoring equipment to a specified performance level. In many countries, including the United States, Japan, and European nations, maintenance costs represent a significant portion of production and sales expenditures.

Typically, four principal strategies exist within maintenance systems: corrective maintenance, preventive maintenance, predictive maintenance, and maintenance in the design phase. This research introduces an integrated system for selecting maintenance types and redundancy policies, which can significantly impact system productivity and costs.

Condition-Based Maintenance (CBM) and Reliability-Centered Maintenance (RCM) have gained prominence in various industries, including aerospace, petrochemical, nuclear, and automotive sectors, due to their utilization of advanced technologies like the Internet of Things (IoT) and cloud computing. These methodologies have demonstrated positive impacts across different sectors. For instance, NASA's implementation of RCM has resulted in annual savings exceeding ten million dollars. Similarly, domestic companies such as Esfahan's Mobarakeh Steel Company and Persian Gas Refinery Company have realized significant cost savings through these methods.

While the research literature predominantly focuses on classical maintenance approaches, this study emphasizes more intelligent models and predictive controls that dictate maintenance actions. Additionally, this research explores a multi-objective model for balancing equipment reliability and costs.

## **Literature Review**

### **2.1. Flexible Job Shop Scheduling Problem (FJSP)**

FJSP is an extended version of Job Shop Scheduling Problem (JSP) that involves two sub-problems: operation sequence and machine assignment. The main objective in FJSP is to minimize the maximum makespan ( $C_{\max}$ ) by optimizing the sequence of operations and allocation of machines. Unlike traditional job shop scheduling, FJSP allows each machine to perform various operations, making it more complex. Production scheduling issues are categorized into different types such as single machine, parallel machines, flow shop, job shop, and flexible job shop, each presenting unique challenges.

### **2.2. Maintenance**

Maintenance activities are crucial in production scheduling as they impact reliability, access to machinery, and costs. Real-world scenarios involve machines being unavailable due to failures or periodic services, causing production stoppages. Various studies have integrated maintenance considerations into different scheduling problems, highlighting the importance of optimizing maintenance activities alongside production scheduling.

### **2.3. Reliability Centered Maintenance (RCM)**

RCM is a strategy that aims to enhance operational reliability by identifying and classifying failure modes. RCM involves determining maintenance measures for machinery under different working conditions to optimize performance and reliability. The developed RCM in the research incorporates a process to reduce machine reliability randomly and execute necessary actions based on system and machine reliability levels.

### **Methodology**

The research introduces two simulation-based optimization (SBO) algorithms, NSGA-II and NPGA. These algorithms are designed to address the complexity and vast search area of the problem. SBO is suitable for random key or continuous solution structures, while GA is designed for both continuous and discrete structures. The developed integrated RCM process is implemented in both the SBO and the NSGA-II and NPGA versions of the SBO algorithms. The choice of using both SBO and meta-heuristic algorithms allows for validation of each other on a problem with significant complexity and a vast search area. The simulation-based optimization (SBO) approaches are crucial for dealing with the NP-Hard and stochastic nature of the developed model. These approaches are based on SBO and meta-heuristic algorithms (NSGA-II and NPGA). The research presents various statistical and qualitative outputs to analyze the performance of the SBOs in solving the developed flexible job shop scheduling problem integrated with RCM control terms.

### **Discussion**

The Pareto front in multi-objective optimization refers to a set of solutions where none outperforms the others completely. This implies that improving one objective leads to degradation in another. This set includes all solutions where enhancing one objective cannot be achieved without compromising others. In the aforementioned problem, which involves minimizing energy consumption costs, maximizing reliability, and minimizing maintenance and repair costs, the Pareto front displays solutions that achieve the best possible trade-off among these objectives. In other words, each solution on the Pareto front represents a balance point where improving one objective is impossible without causing a decline in another.

### **Conclusion**

This research addresses the development of a multi-objective stochastic green Flexible Job Shop Scheduling Problem (FJSP) by incorporating both maintenance and Reliability-Centered Maintenance (RCM) considerations. The integrated problem involves over six

## 5 | Intelligent Energy Consumption Optimization ... ; Sadeghpour et al.

practical stochastic factors common in the industry, including processing time, stochastic preventive and corrective maintenance times, failure levels, stochastic improvement post-repair, and random shocks. Additionally, the energy considerations factor in proximity to developed areas. Simulator modules were created for the stochastic components, and metaheuristic algorithms such as NSGA-II and NRGA were employed within evolutionary and simulation-based optimization frameworks to solve the problem. The speed and performance of these methods enable the algorithms to function as a Decision Support System (DSS) for software developers operating under highly stochastic industrial conditions. Statistical hypothesis tests on indices from multi-objective decision-making literature were conducted to evaluate the algorithms' results. Apart from NSGA-II's superiority in solving time, there were no significant differences between the algorithms in other multi-objective indices, thereby validating and replicating the results from the developed operators in the search pattern. Numerous supporting statistical and non-statistical charts further corroborated this performance and visually depicted the algorithms' efficacy across various solved problems.

**Keywords:** Maintenance System Prediction, RCM, Stochastic, Simulation-Based Optimization, Flexible Jobshop, Metaheuristic Algorithm.



## بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با در نظرگیری نگهداری و تعمیرات پایایی محور

دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری،

واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

محمدحسن صادقیپور

دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد قزوین،

دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

علی محتشمی\*

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد

قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

حبیب اله رحمتی

استاد گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و

حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مصطفی زنده

### چکیده

نگهداری و تعمیرات (نت) سهم قابل توجهی از هزینه‌های زنجیره‌های تأمین و سیستم‌های تولیدی را شامل می‌شود. امروزه با رشد تکنولوژی‌های مبتنی بر فناوری اطلاعات سیستم‌های هوشمند نت نیز بسیار در عرصه بین‌المللی در حال گسترش می‌باشد. در این تحقیق به توسعه یکی از روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایایی<sup>۱</sup> (RCM) که در آن یک سامانه هوشمند به تعیین تعمیر یا تعویض بر اساس سطح پایایی سیستم می‌پردازد در مسئله بسیار پرکاربرد کار کارگاهی منعطف<sup>۲</sup> (FJSP) خواهیم پرداخت. در نوآوری این تحقیق، مسئله کلاسیک با در نظرگیری تولید سبز و انرژی مصرفی واحد صنعتی در کنار دو تابع هدف کلاسیک هزینه‌های تولید و پایایی سیستم به صورت چندهدفه به توازن می‌رسد. بعلاوه در دیگر نوآوری مسئله تصمیم‌گیری توسعه داده‌شده، همانند مدل‌های محاسباتی وزارت نیرو در مدل محاسبه انرژی توجه به مناطق کمتر توسعه داده‌شده هم به‌عنوان یک عامل اجتماعی در نظر گرفته شده است. به‌منظور نزدیک

\* نویسنده مسئول: mohtashami07@gmail.com

1. Reliability-Centered Maintenance (RCM)
2. Flexible Job Shop Problem (FJSP)

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقپور و همکاران | ۷

سازی مدل تحت بررسی به مسائل دنیای واقعی، مدل پایایی برای سیستمی پیچیده شامل چندین ماشین با عمر تجهیزات وابسته به زمان با قابلیت تعمیرپذیری می‌باشد و در آن مدت‌زمان انجام عمل‌ها، زمان نگهداری و تعمیرات و سطح پایایی پس از تعمیر آن‌ها همگی تصادفی می‌باشند. سپس مدل توسعه داده‌شده توسط الگوریتم‌های فراابتکاری مناسب‌سازی شده با رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی حل‌شده و جواب‌های به‌دست‌آمده به‌وسیله روش‌های آماری و غیرآماري تحلیل شده‌اند. آنچه از یافته‌های این تحقیق قابل‌اثبات است آن است که الگوریتم‌های حل توسعه داده شده برای مسائل پیچیده چندهدفه قویاً تصادفی کارا می‌باشد و در نتیجه می‌توانند به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم<sup>۱</sup> (DSS) در دست توسعه دهندگان نرم‌افزار در این حوزه قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** پیش‌بینی سیستم نگهداری و تعمیرات، نت مبتنی بر قابلیت اطمینان، تصادفی، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، کار کارگاهی منعطف، الگوریتم فراابتکاری.

## مقدمه

در طول سالیان بسیار، در اکثر سازمان‌ها تمرکز مدیریت بر فعالیت‌های تولیدی معطوف شده و به موضوع نگهداری و تعمیرات به چشم یک فعالیت غیرضروری نگریسته می‌شد تا فعالیت‌های نت نادیده گرفته شوند؛ اما در سال‌های اخیر سیاست‌های سازمانی و نیازمندی‌های کسب و کار باعث شده تا مدیران توجه بیشتری به نگهداری و تعمیرات مبذول دارند، چراکه هزینه‌های نگهداری و تعمیرات در سازمان‌ها در شمار یکی از هزینه‌های اصلی درآمده است تا با این توان بالقوه در مدیریت بتواند از بسیاری از هزینه‌ها پیشگیری نماید.

افزایش قابلیت اطمینان سیستم به دو روش افزایش قابلیت اطمینان اجزای سیستم و یافتن تعداد بهینه از اجزای اضافه‌شده در سیستم، ممکن است. با افزایش تعداد زیرسیستم‌ها، نرخ پایایی سیستم ارتقا می‌یابد، اما باعث افزایش هزینه‌ها نیز می‌شود. در دنیای واقعی، نگهداری و تعمیرات و پایایی باهم آمیخته است و برای داشتن یک سیستم تحلیلی کامل‌تر، در این تحقیق به ارائه یک سیستم یکپارچه انتخاب نوع نگهداری و تعمیرات و سیاست افزونگی پرداخته شده است.

سیاست‌های سازمانی و نیازمندی‌های کسب و کار توجه مدیران را به مفاهیم نگهداری و تعمیرات به دلیل پیشگیری از بسیاری از هزینه‌ها بیشتر کرده است، نگهداری و تعمیرات به مجموعه فعالیت‌های انجام‌شده بر روی ماشین‌آلات یا سیستم‌های تولیدی با هدف نگهداشتن ماشین‌آلات در سطح مشخصی از کارایی و یا بازگرداندن آن به سطح مشخص مذکور در صورت خارج شدن از آن گفته می‌شود (علی حاج شیرمحمدی، ۲۰۰۵). یکی از مهم‌ترین ارقام هزینه‌ای، که سهم قابل توجهی از هزینه‌های تولید و قیمت تمام‌شده محصول را تعیین می‌نماید و عدم مدیریت آن باعث کاهش سودآوری می‌گردد، هزینه‌های مرتبط با نت و مفاهیم مرتبط با آن است (Mobley, 2002). در کشورهای آمریکا بین ۶ تا ۱۷ درصد قیمت فروش، در ژاپن بین ۶ تا ۱۲ درصد هزینه ثابت شرکت‌ها، در فرانسه ۱۵ درصد GNP، در کشورهای اروپایی، به‌طور میانگین، ۱۲-۱۴ درصد GNP، ۱۶۵ عدد از مهم‌ترین



بهبودسازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقپور و همکاران | ۹

شرکت‌های صنعتی در ایالات متحده به طور متوسط ۵ درصد چرخش مالی سالیانه خود، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات تجهیزات تولید تشکیل می‌دهد. همچنین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سالیانه، در مقایسه با چرخش مالی سالیانه<sup>۱</sup> در برخی کشورهای اروپایی بر اساس نتایج تحقیقات فدراسیون اروپایی انجمن‌های نگهداری و تعمیرات عبارت است از بلژیک ۴/۸ درصد، فرانسه ۴ درصد، ایرلند ۵/۱ درصد، ایتالیا ۵/۱ درصد، هلند ۵ درصد، اسپانیا ۳/۶ درصد، انگلستان ۳/۷ درصد، در صنایع خودروسازی اروپا ۲-۱ درصد مقدار چرخش سالیانه و در کشورهای صنعتی بین ۱۵ تا ۴۰ درصد هزینه‌های تولید را هزینه‌های نت تشکیل می‌دهند. به طور متوسط و با توجه به نوع صنعت، این هزینه چیزی حدود ۱۵ تا ۶۰ درصد هزینه محصول تولیدشده را در برمی‌گیرد (Mobley, 2002).

به طور کلی چهار استراتژی در سیستم‌های نت وجود دارد (علی حاج شیرمحمدی، ۲۰۰۵)، نگهداری و تعمیرات اصلاحی یا پس از خرابی<sup>۲</sup>، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه<sup>۳</sup>، نگهداری و تعمیرات پیشگویانه<sup>۴</sup>، نگهداری و تعمیرات در فاز طراحی<sup>۵</sup>. در این میان، انتخاب سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب خود تا حد زیادی می‌تواند بر بهره‌وری و هزینه‌های سیستم تأثیر گذارد. برای این منظور نیز در ادبیات تکنیک‌های مختلفی و عموماً به صورت ایستا و در ابتدای دوره برنامه‌ریزی صورت می‌پذیرد. یعنی پس از تحلیل ریسک در ابتدای دوره، نوع سیستم نگهداری و تعمیرات را تعیین می‌نمایند. رویکردها مورد استفاده در این مقاله، در دسته سوم قرار گرفته و تحت عنوان‌های نگهداری مبتنی بر شرایط<sup>۶</sup> و نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان شناخته می‌شوند. البته این دسته، دو دسته اول را نیز در نظر گرفته و به طور هوشمند به کار می‌برد. استفاده از این روش‌ها با بهبود سطح پردازش در دو بعد سخت‌افزاری، مانند مراکز داده<sup>۷</sup>، و نرم‌افزاری، مانند الگوریتم‌های

- 
1. Turn Over
  2. Corrective Maintenance (CM) or Breakdown Maintenance (BM) or Run to Failure (RTF)
  3. Preventive Maintenance (PM)
  4. Predictive Maintenance (PdM)
  5. Proactive Maintenance (PrM) or Maintenance Prevention (MP)
  6. Condition-Based Maintenance (CBM)
  7. Data Centers

هوشمند و یادگیرنده یا مفاهیمی مانند اینترنت اشیا و محاسبات ابری<sup>۱</sup> جایگاه و توجه خاصی پیدا نموده است. این روش‌ها یک متدولوژی و فرایند سیستماتیک برای تعیین مؤثرترین و کاراترین برنامه مدیریت نگهداری و تعمیرات بوده که برای پلنفرم، سیستم یا اجزا قابل استفاده است (Moubray, 1997). به عبارت دیگر، نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، روش مهندسی در جهت ایجاد ارتباط بین فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و مکانیزم خرابی‌ها به کمک یک ساختار منطقی است که هدف آن دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر (متناسب با میزان هزینه) به وسیله انجام موارد ضروری (و نه بیشتر) است.

روش‌های پیشگویانه CBM و RCM در صنایع مختلفی از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی، هسته‌ای، خودرویی کاربرد داشته و تأثیرگذار بوده‌اند. در یک نمونه موفق در ناسا، استفاده از RCM در یک مورد بیش از ده میلیون دلار در سال صرفه‌جویی هزینه‌ای ایجاد نمود. یا در نمونه‌ای دیگری در داخل کشور در شرکت خطوط لوله و مخازن نفت منطقه شمال غرب ایران، استفاده از این روش حدود دو میلیون دلار صرفه‌جویی ایجاد نموده است. این روش‌ها در سایر شرکت‌های داخلی مانند فولاد مبارکه اصفهان و شرکت پالایش گاز پارسیان نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی مزایای روش‌های پیشگویانه عبارت‌اند از (Higgins & Mobley, 2002) توسعه برنامه‌های نت با کیفیت بالا در زمانی کم و با هزینه‌ای پایین. در دسترس بودن تاریخچه نت هر سیستم در مورد حالت‌های شکست و درجه بحرانی بودن قطعاتش. اطمینان‌دهی از اینکه تمامی قطعات مهم نت و حالت‌های شکست و درجه بحرانی بودنشان در توسعه نیازمندی‌های نت مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزایش این احتمال که سطح و حجم نیازمندی‌های نگهداری و تعمیرات به شکلی بهینه تعیین شده است.

این در حالی است که عموم تحقیقات ادبیات نگهداری و تعمیرات بر حالت کلاسیک یعنی حالت‌هایی که زمان انجام برنامه نگهداری و تعمیرات اعم از نت پیشگیرانه و اصلاحی، زمان انجام کار و نوع عملیات، میزان بهبود پس از اجرای برنامه‌های نت، سطح خرابی دستگاه در طول زمان به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شود، تمرکز دارد؛ اما در

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۱۱

این تحقیق بر مدل‌های هوشمندتر و کنترل پیشگویانه که خود نوع عمل نگهداری و تعمیرات را تعیین می‌کند خواهیم پرداخت. همچنین مدل چند هدفه طراحی شده طوری خواهد بود که بالانس بین پایایی و هزینه تجهیزات موردنیاز را نیز مدیریت نماید. در این مقاله طبق یک رابطه جدید، محاسبه میزان مصرف انرژی و هزینه آن بر اساس ولتاژ و آمپر مصرفی درج شده در فیش برق و نیز ضریب دوری و نزدیکی به پایتخت و شهرهای بزرگ صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است به منظور نزدیک شدن مدل توسعه داده شده به مسائل دنیای واقعی، برای عموم پارامترها و متغیرهای مسئله به صورت تصادفی و تجهیزات تعمیر پذیر در نظر گرفته خواهد شد.

در ادامه سعی خواهد شد با بهره‌مندی از الگوریتم‌های حل کارا مبتنی بر شبیه‌سازی به حل مسئله توسعه داده شده پرداخت. برای این منظور ابتدا، ماژول‌های کنترلی خرابی یا پایایی سیستم توسعه داده خواهند شد. سپس به شبیه‌سازی یک سیستم تولیدی نمونه با در نظر گیری سیستم نگهداری و تعمیرات ذکر شده خواهیم پرداخت. در نهایت سعی خواهد شد با ارائه یک روش حل یکپارچه که تمامی ماژول‌ها را از سه محیط نگهداری و تعمیرات، پایایی و تولید به گونه‌ای ادغام نماییم که بتواند یا به عنوان سیستم پشتیبان تصمیم یا به عنوان ماژول‌های توسعه نرم‌افزارهای نگهداری و تعمیرات موجود نقش ایفا نماید. در قسمت‌های مختلف نیز سعی خواهد شد با استفاده از نمونه مسائل کلاسیک الگو، اجزایی توسعه داده شده قبل از ورود به الگوریتم نهایی اعتبار سنجی نماییم.

ساختار مقاله حاضر به این صورت می‌باشد. قسمت دوم مقاله به مرور ادبیات مرتبط با مسئله پرداخته می‌شود. در قسمت سوم، جزئیات مسائل ادغامی به بحث و گفتگو گذاشته می‌شود. قسمت چهارم رویکرد شبیه‌سازی در موضوع نت مبتنی بر قابلیت اطمینان را بررسی می‌کند. قسمت پنجم، مسئله پیشنهادی را تعریف و راه‌حل مربوط را با مثال‌های عددی بیان می‌کند؛ و در نهایت و در قسمت ششم، به نتیجه‌گیری مباحث مطروحه در این مقاله می‌پردازد.

## پیشینه پژوهش

در دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی بسیاری از سازمان‌های صنعتی تلاش‌هایی برای گسترش و فراگیر کردن نت (تقریباً تمام دارایی‌ها) انجام می‌دادند، ولی نولان و هیپ در صنعت هواپیمایی امریکا، رویکرد متفاوتی را در پیش گرفتند و یک فرآیند نگهداری و تعمیراتی را بر اساس عملکردهای سیستم، پیامدهای خرابی و حالت‌های شکست توسعه دادند. کار آن‌ها منجر به توسعه نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان شد که اولین بار در سال ۱۹۷۸ منتشر گردید (Moubray, 1997). هدف RCM کاهش تمایل به وابستگی مداوم به نگهداری و تعمیرات اصلاحی (واکنشی) و انطباق با چهار مؤلفه نگهداری و تعمیرات RCM است. در نتیجه، با توسعه برنامه اقدام RCM، یک دارایی به احتمال زیاد طول عمر بیشتری خواهد داشت و هزینه نت کاهش می‌یابد؛ یعنی نت تنها در مواقع ضروری انجام می‌شود (Moubray, 1997). مسائل مربوط به قابلیت اطمینان به منظور بهبود اثربخشی کلی تجهیزات<sup>۱</sup> و در عین حال کنترل هزینه چرخه عمر<sup>۲</sup> با مدیریت دارایی توسط نت مبتنی بر قابلیت اطمینان کنترل می‌شود. همچنین نقش RCM در گذشته‌ی سازمان‌ها از توسعه وظایف نگهداری و تعمیر مبتنی بر تجزیه و تحلیل حالت‌ها و اثرات شکست<sup>۳</sup> گسترش یافته است و شامل موارد پایداری، بهره‌وری انرژی، راه‌اندازی (مجدد یا تجهیزات موجود)، قابلیت نگهداری، عمر بازیابی شده، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان می‌شود (NASA, 2008). RCM یک روش سیستماتیک برای تعیین مؤثرترین رویکرد نگهداری و تعمیرات در طیف وسیعی از رویکردها از جمله نگهداری اصلاحی، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه یا نظارت در زمان واقعی یا برخط است که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم در طراحی چرخه عمر و در کمترین هزینه می‌شود و قابلیت اطمینان در زمان واقعی سیستم را به طور مداوم نظارت می‌کند و نوع صحیح فعالیت‌های نت را تعیین می‌کند (Børresen, 2011). روش RCM بر قابلیت اطمینان تجهیزات تکیه دارد و مستلزم جمع‌آوری زمان‌های خرابی

- 
1. Overall Equipment Effectiveness (OEE)
  2. Life Cycle Cost (LCC)
  3. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۱۳

است؛ اما در برخی موارد امکان ثبت اطلاعات کافی وجود ندارد و فقط زمان‌های سرویس در دسترس است که می‌توان از طریق اعداد فازی جهت استفاده از اطلاعات موجود، مانند تجربه کارکنان نگهداری و تعمیرات در ارائه دقت در برآورد قابلیت اطمینان کمک گرفت (Fuentes-Huerta et al., 2021). استفاده از ماشین‌آلات، عامل مهمی برای بهره‌وری سیستم‌های تولیدی و استفاده کم باعث کاهش آن می‌شود و بر اساس تئوری قابلیت اطمینان، استفاده بیش از حد باعث افزایش میزان خرابی ماشین‌ها و در نتیجه کاهش نرخ بهره‌برداری از آن‌ها می‌شود (Lu et al., 2021). اطمینان از عملکردهای هر یک از اجزای دارایی یا فرایندهای عملیاتی از نظر ایمنی، کیفیت و اقتصادی بودن بدون تأثیرات زیست‌محیطی و همچنین فرآیندهای تصمیم‌گیری، ادغام اطلاعات کمی و کیفی و انتخاب بهترین مورد جهت پیاده‌سازی و ارزیابی RCM و رسمی‌سازی اطلاعات جهت استفاده در تصمیم‌سازی توسط RCM، مواردی است که اهمیت دارد (Piechnicki et al., 2021). عملکرد RCM بر توسعه روش‌ها، تکنیک‌ها و مهارت‌هاست تا با شناسایی، پیشگیری و اصلاح خرابی‌های تجهیزاتی که منجر به شکست، در دسترس نبودن عملیاتی، نت بیش از حد و ضایعات می‌شوند، جلوگیری نماید. و همچنین وظایف اصلی RCM، جمع‌آوری تاریخچه تجهیزات و داده‌های تأمین‌کننده در رابطه با گارانتی، تجزیه و تحلیل اطلاعات موجود از قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی فعالیت‌های نت موردنیاز می‌باشد (Fuentes-Huerta et al., 2021). در مدیریت ریسک جهت به حداقل رساندن وقوع خرابی با رویکرد RCM قابلیت اطمینان اجزای سیستم با تعیین وظایف و برنامه‌ریزی نت افزایش می‌دهند (Siswanto et al., 2022).

### قابلیت اطمینان

پیچیدگی‌های زیادی در جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی، فناوری و غیره در قرن بیستم وجود دارد که ضرورت قابلیت اطمینان را توجیه می‌کند. رقابت شدید جهانی و افزایش انتظارات مشتریان و پیشرفت سریع فناوری، توسعه محصولات پیچیده، فشار زیادی را به تولیدکنندگان برای تولید محصولاتی با کیفیت بالا وارد ساخته است. در واقع قابلیت

اطمینان منافی ایجاد می‌کند که می‌توان در اعتبار نام تجاری، کاهش زمان عرضه محصولات جدید، سهم بازار، سودآوری، کاهش هزینه خدمات پس از فروش نام برد (Higgins & Mobley, 2002). قابلیت اطمینان، احتمال اینکه یک محصول یا سیستم در طول دوره عمر خود بدون خرابی به کار خود ادامه دهد، و از کارافتادن سیستم تبعات مالی و گاهی جانی را در پی خواهد داشت. سیستم‌های زیادی وجود دارند که رسیدن به سطح معین از قابلیت اطمینان در محصولات، از انتظارات مشتریان به شمار می‌رود (Nahas et al., 2007). موضوع تخصیص افزونگی در یک سیستم سری-موازی در شرایط محدودیت بودجه و وزن و شرایط استفاده از سیاست تخفیف افزایشی (Soltani et al., 2014)، و سیاست تخصیص افزونگی فعال و آماده‌به‌کار سرد در حالت چند هدفه (Sadjadi et al., 2014)، تخصیص افزونگی در شرایط عدم قطعیت احتمالی و فازی و فاصله‌ای و بهینه‌سازی (Soltani & Sadjadi, 2014)، حالت بیشینه و کمینه تأثیر در موضوع بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و تخصیص افزونگی و استراتژی افزونگی جهت دستیابی به راه‌حل پایدار از طریق روش تجزیه «بندرز»<sup>۱</sup> (Sadjadi & Soltani, 2015)، نظارت و کنترل کارآمدتر از طریق فناوری‌های نوظهور مانند شناسایی از طریق فرکانس رادیویی<sup>۲</sup> (شناسایی خودکار)، سنسورهای مختلف، سیستم میکرو الکترومکانیکی<sup>۳</sup>، ارتباط از راه دور بی‌سیم، کنترل نظارت و دستیابی به داده‌ها<sup>۴</sup> و دستگاه‌های اطلاعاتی تعبیه‌شده در محصول<sup>۵</sup> (Shin & Jun, 2015)، بررسی کولرها به‌عنوان اجزای حیاتی در سیستم‌های مختلف صنعتی که می‌توانند به‌طور مؤثر خطرات خرابی ناشی از دما را کاهش دهند، و تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان و رویکردهای بهینه‌سازی نگهداری تجهیزات خنک‌کننده آماده‌به‌کار گرم، و ارائه یک سیاست نگهداری و تعمیرات مبتنی بر شرایط بر اساس اطلاعات نظارت بر دما (Ma et al., 2020)، رویکرد چند هدفه برای مدل‌سازی یک مسئله

- 
1. Benders Decomposition
  2. Radio-frequency identification (RFID)
  3. Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)
  4. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
  5. Product Embedded Information Devices (PEID)

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۱۵

سیاست جایگزینی قابل استفاده برای تجهیزات با یک دوره استفاده از پیش تعیین شده (یک افق برنامه‌ریزی) و ارائه پیشنهاد تصمیمات مربوط به فواصل جایگزینی پیشگیرانه و تعداد قطعات یدکی خریداری شده در ابتدای افق برنامه‌ریزی با توجه به اهداف گوناگون مانند هزینه‌نت، میزان وقوع خرابی، در دسترس نبودن و سرمایه‌گذاری روی قطعات یدکی با مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها (مجموعه بهینه پارتو) را در مواجهه با یک مسئله سیاست جایگزینی (Azevedo et al., 2020)، و استفاده از تئوری بازی‌ها بر روی سیستم سری-موازی جهت بررسی تأثیر آنتروپی سیستم نیز به‌عنوان محدودیت، مسئله تخصیص افزونگی چند هدفه برای بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و کاهش هزینه سیستم در شرایط واقعی با محدود کردن آنتروپی سیستم (Cao et al., 2020)، و طراحی سیستم قابلیت اطمینان بهینه با کمترین هزینه در مسائل سری-موازی با استفاده از شبیه‌سازی، و تعیین بهینه تعداد مؤلفه‌های لازم برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم (Modibbo et al., 2021) مورد بررسی قرار گرفته است. بعلاوه پیکربندی موازی نقش کلیدی در تحلیل قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده دارد و میانگین عمر باقی مانده، شاخصی برای پیش‌بینی خرابی و برنامه‌ریزی نگهداری می‌باشد. با انجام بازرسی‌های منظم و جمع‌آوری اطلاعات، می‌توان با بهبود میانگین عمر باقی مانده، زمان مورد انتظار برای رسیدن به حالت معیوب را محاسبه کرد. در این روش، به جای محاسبه زمان باقی مانده تا خرابی کامل سیستم، زمان مورد انتظار برای رسیدن به حالت معیوب محاسبه می‌شود. این رویکرد می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در برنامه‌ریزی و اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات شود (Ahmadi et al., 2024).

## نگهداری و تعمیرات

نگهداری و تعمیرات فرآیندی پیچیده است که با خرابی تجهیز یا تعمیرات برنامه‌ریزی شده آغاز می‌شود و اجرای فرآیند آن مستلزم طرح‌ریزی، زمان‌بندی، کنترل و استقرار منابع نگهداری و تعمیرات (قطعات یدکی) است. برای سیستم‌های نگهداری و تعمیرات یک مدل مفهومی عمومی با هفت ماژول تعریف شده است که عبارت است از مشخص کردن

ویژگی سیستم نت، مدل‌سازی حجم کاری نت، طرح‌ریزی و زمان‌بندی به‌عنوان مهم‌ترین جزء جهت کنترل فرآیند نت، تأمین مواد و قطعات یدکی، در دسترس بودن تجهیزات، مازول کنترل کیفیت و معیارهای عملکردی (Duffuaa et al., 2001). بیشتر دلایل رایج بسیاری از شکست‌های طراحی مختلف که ممکن است برای خرابی محصول وجود داشته باشد، از یک فاجعه تا نقص ساده، در جدول ذیل ذکر شده است (Dhillon, 2011).

### شکل ۱. دلایل رایج برای خرابی محصول

۱	استفاده نادرست توسط مصرف‌کننده	۴	درک ضعیف از مسئله‌ای که باید حل شود.	۷	با توجه به اصول اولیه، مسئله نادرست بیان شده است.
۲	ساخت محصول/خدمات ناقص یا ناصحیح	۵	جمع‌آوری داده‌ها، رضایت بخش نیست	۸	فرضیات بیش از حد بسط داده شده یا غلط
۳	استدلال ناقص یا نادرست	۶	انبارش یا ذخیره‌سازی نادرست	۹	داده‌های نادرست

پیشرفت مفهوم نگهداری و تعمیرات از یک فعالیت خدماتی واکنشی به سمت یک فعالیت فعال و تبدیل شدن «پیش‌بینی نت» به یک اصطلاح پرکاربرد در عرصه صنعتی و تحقیقات دانشگاهی با نظارت بر داده‌ها، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و احتمالات خرابی جهت پیش‌بینی خطا و زوال سیستم در طول عمر مفید آن‌ها توسعه یافته است. به‌طور کلی، طول عمر مؤثر ماشین‌ها به داده‌های موجود و قابل دسترس بستگی دارد؛ ولی شرایط غیرمنتظره مانند آسیب خاص از شوک و تخریب ناخواسته ابزار پیش‌بینی آن‌ها را دشوار می‌کند (Sakib & Wuest, 2018). نت مبتنی بر قابلیت اطمینان تصادفی در یک مسئله چند هدفه که برنامه‌ریزی تولید و نت را توأم دربردارد (Rahmati et al., 2018b)، همچنین ارائه مدلی جهت بهینه‌سازی زمان‌بندی نت پیشگیرانه غیر ادواری برای سیستم‌های سری-موازی جهت تأمین سطح قابلیت اطمینان موردنیاز و برطرف نمودن سایر محدودیت‌های سیستمی نظیر فعالیت‌های نت و منابع در دسترس، و کمینه نمودن کل هزینه‌های نت نیز مهم می‌باشد (ساجدی نژاد & لطفی، ۲۰۱۹). بهینه‌سازی مدل مشترک از تولید، کنترل کیفیت و نت پیشگیرانه در یک سیستم تولیدی و چند فرایندی و با ساختار سری-موازی که در هر فرایند، با توجه به تعداد ماشین‌ها (تجهیزات) که برای تأمین بهره‌وری و تعادل خط موردنیاز است و یا اینکه دستگاه‌ها حین استفاده، معیوب می‌شوند و بنابراین کیفیت



بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۱۷

محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند، و اندازه‌گیری اهمیت ساختار ماشین‌ها و بهره‌وری هنگام انتخاب آن‌ها برای نگهداری و تعمیرات، تعیین کردن طول دوره تولید، حدود کنترل کیفیت و حدود نگهداری و تعمیرات به‌طور هم‌زمان و به‌طوری‌که نرخ متوسط هزینه به حداقل برسد (Cheng & Li, 2020)، مدیریت تولید و عملیات برای تولید هوشمند با استفاده از مزایای فناوری اطلاعات که در آن نیاز به یکپارچه‌سازی، یعنی ادغام افقی سیستم‌های زنجیره تأمین در داخل و بین کارخانه‌ها و ادغام عمودی از طریق سیستم‌های تولیدی وابسته به امکانات فیزیکی و دارایی‌های انسانی که آن نیز منجر به دیجیتالی شدن تولید، نگهداری و تعمیرات و ردیابی موجودی و عملیات در کل شبکه می‌شود (Zhou et al., 2022). نگهداری و تعمیرات در فناوری‌های صنعت نسل چهارم، منجر به افزایش عمر مفید تجهیزات و افزایش اثربخشی کلی تجهیزات، برای ذینفعان به سمت اقتصادی بودن و پایایی ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها هم به‌عنوان خدمات نت پس از فروش و هم برای نت پیشرفته تعبیه شده در برنامه‌های صنعت نسل چهارم توسعه داده می‌شوند. همچنین فازهای مدیریت نت برای چرخه عمر را به‌صورت طراحی برای قابل انجام بودن نت، برنامه‌ریزی استراتژی برای نت، کنترل وظایف نت، ارزیابی نتایج خاص از نگهداری و تعمیرات، بهبود نت، بهبود تجهیزات و ماشین‌آلات، برنامه‌ریزی برچیدن ماشین‌آلات در پایان دوره عمرشان و اجرای آن تعریف می‌شود (Hien et al., 2022). بررسی نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر نشان می‌دهد که تنها این عامل کافی نیست و مشارکت مدیریت کیفیت جامع نیز برای دستیابی به عملکرد عملیاتی ضروری است. همچنین، مدیریت زنجیره تأمین نقش میانجی در ارتباط میان مدیریت کیفیت جامع و عملکرد عملیاتی دارد (خانی et al., 2022). اهمیت نگهداری صنعتی در بهبود کارایی سیستم‌های تولید و اطمینان فنی ماشین‌ها و اجزا با حداقل منابع ممکن، و روش الزامی ارزیابی ارتباط بین اطمینان فنی و منابع نگهداری با توجه به استراتژی‌های نگهداری و نیازهای منابع با ۱۳ الزام توسعه داده شده و مطالعه ۲۱ روش مختلف ارزیابی، که فقط یکی از آن‌ها تمامی الزامات را رعایت کرده و سایرین نتوانستند ترکیب‌های ممکن از استراتژی‌های نگهداری و تأثیرات ناشی از آن‌ها را

به درستی بررسی کنند (Sielaff et al., 2023). استفاده از یادگیری ماشین برای ارزیابی وضعیت تجهیزات در نیروگاه‌های اتمی، به طور مؤثری اطلاعات حیاتی از جمله حالت‌های شکست و استراتژی‌های نگهداری را فراهم می‌کند (Xu et al., 2023). همچنین در سال ۲۰۲۴، در زمینه نگهداری و تعمیرات تجهیزات دستگاه CNC، با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) و بررسی معیارهایی از جمله هزینه، پیچیدگی، پایداری، وابستگی عملکردی و ایمنی، امتیاز بحرانی هر یک از اجزا محاسبه و تحلیل شده است (Alkabaa et al., 2024). نت مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) روشی پیشگیرانه برای اطمینان از عملکرد ایمن و اقتصادی سیستم‌های تولیدی است. مدل ارائه شده در سال ۲۰۲۴ توسط یانگ و همکاران، ترکیب بهینه‌ای از فعالیت‌های نگهداری را در سیستم‌های تولید چند حالته پیشنهاد می‌کند و تخریب ماشین‌آلات و کیفیت محصول را در نظر می‌گیرد و استراتژی بهینه نگهداری را استخراج می‌کند (Yang et al., 2024).

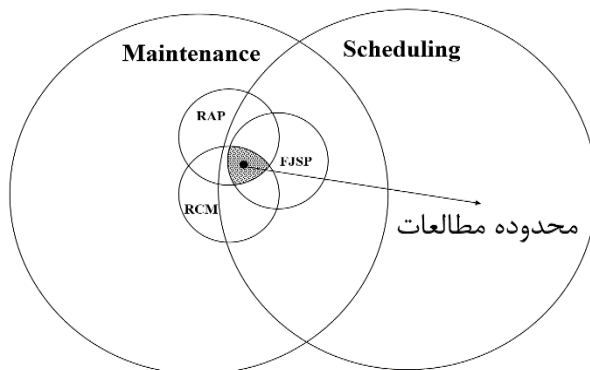
### کار کارگاهی منعطف

مسئله کار کارگاهی منعطف، نسخه توسعه داده شده JSP می‌باشد که شامل مسائل توالی عملیات و تخصیص ماشین است؛ با توجه به پیشرفت علم، برنامه‌ریزی تولید و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات لازم و ملزوم یکدیگر هستند؛ اوزتارک‌گلو و همکاران در سال ۲۰۱۱، مدل‌سازی دو هدفه با تابع هدف‌های زمان تکمیل کل و زمان تکمیل کار کارگاهی در مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی با تک ماشین و نت پیشگیرانه را مورد پژوهش قرار دادند (Ozturkoglu & Bulfin, 2011). صفری و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱، مفهوم شبیه‌سازی را در مسئله کار کارگاهی منعطف را با نت پیشگیرانه مورد تحقیق قرار دادند ولی فرض شکست بین زمان‌های بازرسی را در این شبیه‌سازی نظر نگرفتند (Safari & Sadjadi, 2011). رحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۲، بهینه‌سازی میزان توان الکتریکی مصرفی در طول یک ماه و کمینه نمودن زمان تکمیل کارها و بار کاری ماشین‌های بحرانی را در مسئله کار کارگاه منعطف مورد مطالعه قرار دادند (رحمتی و زندیه، ۲۰۱۲). ابراهیمی‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی یک مسئله برنامه‌ریزی نت پیشگیرانه چند

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۱۹

حالتی در یک خط تولید با دستگاه‌های سری-موازی اهتمام کردند. آن‌ها اهداف متعددی را در مسئله مورد پژوهش خود مانند هزینه‌های نت، مدت از کار افتادگی و خرابی سیستم و قابلیت اطمینان خط‌های تولید را اندازه‌گیری و رویکردهای مختلفی را برای نیروی کار، افت‌های زمانی نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی استفاده کردند (Ebrahimipour et al., 2015). خوخی و همکاران در سال ۲۰۱۷ زمان تکمیل کار را با یک نگرش ترکیبی از مسئله کار کارگاهی منعطف و نت پیشگیرانه، با دسترسی محدودی به ماشین‌آلات در حین انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه، حداقل کردند (El Khoukhi et al., 2017). رحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی مسئله کار کارگاهی منعطف و نت با مدل سازی چند هدفه با راهکار RCM پرداختند. آن‌ها برای انجام فعالیت‌های نت، از شاخص قابلیت اطمینان استفاده کردند به طوری که در صورت رسیدن به مقدار مشخصی از سطح قابلیت اطمینان، فعالیت‌های نت پیشگیرانه انجام می‌گیرد (Rahmati et al., 2018a). شن و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود، زمان فرایند و زمان تعمیر را در مسئله برنامه‌ریزی تولید تک ماشینه با نت پیشگیرانه دوره‌ای غیرقطعی در نظر گرفتند (Shen & Zhu, 2018). فعالیت‌های نت بر بسیاری از فعالیت‌های مربوط به تولید و مدیریت تولید مانند قابلیت اطمینان، در دسترس نبودن ماشین‌آلات و هزینه‌های مختلف مربوطه تأثیر می‌گذارد (Rahmati et al., 2018b). از فرضیات مسائل برنامه‌ریزی تولید این است که ماشین‌ها همیشه در دسترس هستند، و این در حالی است که در دنیای واقعی، ماشین‌آلات به دلیل خرابی و یا نیاز به سرویس‌های دوره‌ای، برای مدتی در دسترس نیستند (Rahmati et al., 2018a). شن و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مسئله برنامه‌ریزی ماشین موازی را با نت پیشگیرانه و زمان‌های پردازش و انجام فعالیت‌های نت را به صورت غیرقطعی بررسی کردند (Shen & Zhu, 2019). یه و همکاران در سال ۲۰۲۰ مسئله برنامه‌ریزی تولید را به صورت متمرکز با نت پیشگیرانه و نت اصلاحی در کار کارگاهی مورد تحقیق قرار دادند (Ye et al., 2021).

شکل ۲. حوزه پژوهش در زمینه‌های برنامه‌ریزی کارگاه‌های و نگهداری و تعمیرات



### شبیه‌سازی

بر اساس شکل‌های شماره ۲، مطالعه‌های زیادی در حوزه نت و قابلیت اطمینان صورت گرفته است، اما درصد کمی از این مطالعات به بررسی هم‌زمان نت و قابلیت اطمینان در حوزه کارگاه‌های پرداخته است. بررسی مسائل در شرایط واقعی کارگاه‌ها (خرابی دستگاه در بین دو بازه زمانی که از پیش تعیین شده جهت بازرسی و انجام امور نت پیشگیرانه و نیاز به نت اصلاحی و یا غیرقابل پیش‌بینی بودن زمان تعمیر دستگاه تصادفی بودن آن و سطح قابلیت اطمینان تجهیز بعد از پیاده‌سازی نت پیشگیرانه و بهبود الزاماً برابر یک نمی‌باشد) و در نظرگیری فرضیات کمتر (مانند تیغ‌های برش و برخی قطعات یدکی از جنس لاستیک، محدودیت‌هایی نظیر کوچک شدن تیغ برش پس از هر بار تیز کردن و یا تمام شدن تاریخ مصرف قطعه یدکی لاستیکی موجود در انبار، منجر به پیاده‌سازی نشدن نت پیشگیرانه طبق برنامه می‌شود). در نتیجه نمی‌توان برنامه‌ریزی منظمی جهت انجام امور نت داشت؛ لذا جهت نزدیک شدن به شرایط واقعی، لزوم در نظرگیری موضوع قابلیت اطمینان و نگهداری و تعمیرات در کنار هم را پررنگ می‌نماید. اکپنیونگ و اودو در سال ۲۰۲۴ سیاست نگهداری پیشگیرانه‌ای برای دستگاه‌های غیرقابل تعمیر مانند فتوکپی را با استفاده از تابع توزیع لاگ لجستیک جهت دستیابی به دسترسی و قابلیت اطمینان بالا و کاهش خرابی، شبیه‌سازی کرده و پروتکلی برای ارزیابی مدل توزیع ارائه

دادند (Ekpenyong & Udoh, 2024).

نگهداری و تعمیرات (نت) بخش مهمی از هزینه‌های زنجیره تأمین و تولید است. پیشرفت تکنولوژی‌های مبتنی بر فناوری اطلاعات منجر به گسترش سیستم‌های هوشمند نت شده است. این تحقیق، روش نوین نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) را برای سیستم‌های پیچیده کارگاه منعطف (FJSP) در بستر یک سامانه هوشمند برای تعیین تعمیر یا تعویض با توجه به سطح پایایی سیستم بررسی کرده است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن ماشین‌های دارای عمر وابسته به زمان، قابلیت تعمیرپذیری و زمان‌های تصادفی توسعه یافته و بهبودسازی مصرف انرژی را در کنار هزینه‌های تولید و پایایی سیستم با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری انجام داده است.

جدول ۱. برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه نگهداری تعمیرات

الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال	الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال
	RC M	C M	P M				RC M	C M	P M		
Random, NEH, SA, GA, ACO	-	-	√	Cmax	Ruiz et al. (2007)	Heuristic DP	-	√	-	Cmax	Lee (1999)
Heuristic	-	-	√	Cmax	Lin and Liao (2007)	CG	-	-	√	TWCT	Lee and Chen (2000)
BSA	-	-	√	Cmax	Liao and Sheen (2008)	Heuristic	-	-	√	Cmax	Espinouse et al. (2001)
NSGA II	-	-	√	Cmax Unavailability	Berrichi et al. (2008)	B&B	-	-	√	Cmax	Kubiak et al. (2002)
Heuristic	-	-	√	Tardiness	Sbihi and Varnier (2008)	Heuristic B&B	-	-	√	Cmax	Liao and Chen (2003)

الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال	الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال
	RC M	C M	P M				RC M	C M	P M		
B&B and DP	-	-	√	TWCT	Kacem et al. (2008)	Heuristic	-	-	√	Cmax	Cheng and Liu (2003)
Heuristic	-	-	√	Cmax	Chen (2008)	TS GA	-	-	√	Cmax	Aggoune (2004)
Heuristic GA	-	-	√	Cmax	Zribi et al. (2008)	Heuristic TE	-	-	√	TWC T	Cassady and Kutanoglu (2005)
SAs, GAs, NEH	-	-	√	Cmax	Naderi et al. (2009)	GA	-	-	√	TWC T	Sortrakul et al. (2005)
AIS, GA			√	Cmax	Naderi et al. (2009)	B&B	-	-	√	Cmax	Mauguierre et al. (2005)
GA-SA	√	√	√	Cmax	Safari and Sadjadi (2009)	Hybrid GA			√	Cmax	Zribi and Borne (2005)
Heuristic B&B	-	-	√	Cmax	Chen (2009)	GA	-	-	√	Cmax, TWL, CWL	Gao et al. (2006)

جدول ۲. برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه نگهداری تعمیرات (ادامه)

الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال	الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال
	RC M	C M	P M				RC M	C M	P M		
GA	-	-	√	Cmax, TCT, TWCT	Kim and Ozturk (2015)	DP, B&B	-	-	√	TCT	Mellouli et al. (2009)
Heuristic	-	-	√	T, ML, TFT, MT	Ying et al. (2016)	Heuristic	-	-	√	MWT	Pan et al. (2010)
NSGA II, NRGGA	-	-	√	Cmax, Stability	Ahmadi et al. (2016)	Heuristic	-	-	√	Cmax	Low et al. (2010)
Monte	-	-	√	productio	Cheng	FBS	-	-		Cmax	Wang

الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال	الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال
	RC M	C M	P M				RC M	C M	P M		
Carlo Simulation & GA				n, QC and PM	et al (2020)						and Yu (2010)
CPLEX & Game theory	-	-	√	GMS' optimization	Hassanpour et al (2021)	Heuristic	-	-	√	Cmax	Mati (2010)
SWOT-AHP	-	-	-	Decision-making Database (DMD)	Piechnicki et al (2021)	MOEA	-	-	√	Cmax Cost	Ben Ali et al. (2011)
-	-	-	√	PdM <sup>r</sup> management to industry 4.0	Nordal et al (2021)	NSGA II	-	-	√	Cmax Unavailability	Moradi et al. (2011)
-	-	-	-	Structural Modeling	Khani et al., 2022	DFT <sup>r</sup> & Markov	-	-	-	sequential binary decision diagram	Tannous et al (2011)
-	-	-	-	Evaluation of a production system, development of requirements	Sielaff et al., 2023	DP			√	Cmax Cost	Zhou et al. (2012)
Machine Learning	-	√	√	condition assessment of equipment	Xu et al., 2023	SA-GA	-	-	√	Cmax Tardiness Lateness	Dalfard and Mohammadi (2012)
FANP	√	-	√	Criticality analysis	Alkabaa et al., 2024	DCRO+ TS	-	-	√	Cmax, TWL CWL	Li and Pan (2012)
Machine Learning	√	√	√	Min Maintenance	Ekpenyong &	DABC	-	-	√	Cmax, TWL	Li et al. (2014)

1. Generation maintenance scheduling
2. predictive maintenance
3. dynamic fault tree

الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال	الگوریتم حل	نوع نت			تابع هدف	نام و سال
	RC M	C M	P M				RC M	C M	P M		
				nce cost & max Reliability	Udoh, 2024					CWL	
Quantitative Analysis	√	√	√	Minimal Maintenance & Quality Cost	Yang et al., 2024	SA	-	√	√	Cmax	Mokhtari and Dadgar (2015)

### مدلسازی

در ادامه، به توصیف شاخص‌ها و پارامترها و متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدلسازی مسئله نگهداری و تعمیرات مبتنی بر قابلیت اطمینان به تفکیک پرداخته شده است.

#### شاخص‌ها<sup>۱</sup>

- $i, h$  . شاخص کار  $(I, \dots, n)$
- $j, g$  . شاخص عملیات  $(I, \dots, J_i)$
- $k$  . شاخص ماشین‌ها  $(I, \dots, m)$
- $l$  . توالی عملیات تخصیص داده شده بر روی ماشین  $k (I, \dots, d_k)$
- $u$  . شاخص دوره زمانی

#### پارامترها

- $n$  . تعداد کل کارها
- $m$  . تعداد کل ماشین‌ها
- $J_i$  . تعداد کل عملیات برای کار  $i$
- $a_{kij}$  . تخصیص عملیات  $O_{ij}$  به ماشین‌های  $M_{ij}$  که توانایی انجام تنظیمات را دارند
- اگر توانایی انجام عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $i$  باشد  
در غیر اینصورت.
- $a_{kij} : \left. \begin{matrix} 1 \\ 0 \end{matrix} \right\}$
- $P_{kij}$  . زمان فرایند عملیات  $O_{ij}$ ، در صورتی که کار بر روی ماشین  $k$  انجام پذیرد.



$M$	. عدد بزرگ
$E_k$	. مجموعه عملیات‌هایی که می‌تواند بر روی ماشین $k$ انجام پذیرد.
$D$	. تعداد روزهای ماه
$H$	. تعداد ساعت‌های روز کاری
$V$	. ولتاژ (ولت)
$I$	. جریان مصرفی (آمپر)

#### متغیرهای تصمیم

$C_{max}$	. زمان تکمیل کار
$C_{ij}$	. زمان اتمام عملیات
$S_{ijk}$	. زمان شروع عملیات $O_{ij}$ روی ماشین $k$
$C_{ijk}$	. زمان تکمیل عملیات $O_{ij}$ روی ماشین $k$
$C_i$	. زمان تکمیل کار $i$
$x_{ijkl}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{اگر عملیات } O_{ij} \text{ انجام شده بر روی ماشین } k \text{ دارای الویت } l \text{ باشد.} \\ \text{در غیر اینصورت.} \end{array}$
$v_{ijk}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{اگر عملیات } O_{ij} \text{ بر روی ماشین } k \text{ انجام شود.} \\ \text{در غیر اینصورت.} \end{array}$
$z_{ijhkg}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{اگر عملیات } O_{ij} \text{ قبل از عملیات } O_{hg} \text{ بر روی ماشین } k \text{ انجام شود.} \\ \text{در غیر اینصورت.} \end{array}$
$w_{ijk u}$	$\left. \begin{array}{l} 1 \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{اگر عملیات } O_{ij} \text{ در دوره زمانی } u \text{ توسط ماشین } k \text{ انجام شود.} \\ \text{در غیر اینصورت.} \end{array}$
$t_{ij}$	. زمان شروع عملیات $O_{ij}$
$Tm_{kl}$	. زمان شروع کار برای ماشین $k$ با الویت $l$
$d_k$	. تعداد عملیات تخصیص شده به ماشین $k$
$ps_{ij}$	. زمان فرایند عملیات $O_{ij}$ بعد از انتخاب ماشین

با توجه به شاخص‌ها و پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی شده، در ادامه به توصیف مدل‌سازی با تعریف توابع هدف و محدودیت‌های مربوط به مسئله نگهداری و تعمیرات

مبتنی بر قابلیت اطمینان ارائه می‌گردد.

$$Z_1 = \text{Min } \tilde{T}EC = C * \left\{ \sqrt{3} * V * \left( \sum_{i \in J} \sum_{j \in n_i} \sum_{k \in M} (X_{ijk} I_{ijk}) * \sin \phi \right) * \left\{ D * H * 60 \left( \frac{1}{C_{\max}} \right) \right\} \right\} \quad (1)$$

$$Z_2 = \text{Max } \tilde{T}R = \sum_{i=1}^n R(\tilde{t}_i) = \text{Pr}(T > t) \quad (2)$$

$$Z_3 = \text{Min } \tilde{M}C = \sum_{i=1}^n CCM_i + \sum_{j=1}^m CPM_j \quad (3)$$

Subject to :

$$C \max \geq \tilde{t}_{ij} + \sum_k \tilde{p}_{kij} \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$\tilde{t}_{ij} + \sum_k \tilde{p}_{kij} * v_{ijk} \leq \tilde{t}_{ij+1} \quad \forall i, j = 1, \dots, J_i \quad (5)$$

$$\sum_{k \in M_{ij}} v_{ijk} = 1 \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\tilde{s}_{ijk} = \tilde{t}_{ij} * v_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (7)$$

$$\tilde{s}_{ijk} + v_{ijk} * \tilde{p}_{kij} - M * (1 - z_{ijhkg}) \leq \tilde{s}_{hkg} \quad \forall i, j, h, g \in E_k, O_{ij} \neq O_{hg} \quad (8)$$

$$\tilde{s}_{hkg} + v_{hkg} * \tilde{p}_{hkg} - M * (1 - z_{hgij}) \leq \tilde{s}_{ijk} \quad \forall i, j, h, g \in E_k, O_{ij} \neq O_{hg} \quad (9)$$

$$z_{ijhkg} + z_{hgij} = v_{ijk} * v_{hkg} \quad \forall i, j, h, g \in E_k, O_{ij} \neq O_{hg} \quad (10)$$

$$I_{ijk} = f(C \max) \quad \forall i, j, k \quad (11)$$

$$\tilde{t}_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$\tilde{s}_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (13)$$

$$z_{ijhkg}, z_{hgij} \in \{0-1\} \quad \forall i, j, h, g \in E_k, O_{ij} \neq O_{hg} \quad (14)$$

$$v_{ijk}, v_{hkg} \in \{0-1\} \quad \forall i, j, h, g \quad (15)$$

معادله (۱) نشان‌دهنده تابع هدف اول مسئله می‌باشد که ماهیت تصادفی دارد. این تابع هدف با در نظر گیری نحوه محاسبه مصرف انرژی در وزارت نیروی ایران رابطه‌ای ریاضی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی ارائه می‌نماید. این نحوه محاسبه مؤلفه اجتماعی مناطق محروم (دوری از تهران) را با ضریبی که در رابطه ۱۶ ارائه شده است می‌پردازد. توابع هدف به دست آمده همگی از یک پروسه شبیه‌سازی به دست می‌آیند. در این پروسه زمان

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۲۷

تکمیل کارها که خروجی اصلی زمان‌بندی تولید می‌باشد بر پایه شبیه‌سازی جواب‌های موجه که محدودیت‌های مسئله را در نظر می‌گیرند به دست می‌آیند. در حقیقت تابع هدف اول از دو قسمت اصلی تشکیل شده است که در روابط (۱۶) و (۱۷) از یکدیگر جدا شده‌اند. رابطه (۱۶) نشان‌دهنده توان مصرفی در طول مدت‌زمان یک برنامه زمان‌بندی و رابطه (۱۷) نشان‌دهنده تعداد برنامه‌های اجرا شده در ماه می‌باشد.

$$P = \sqrt{3} * V * (\sum_{i \in J} \sum_{j \in n_i} \sum_{k \in M} (X_{ijk} I_{ijk})) * \sin \varphi \quad (16)$$

$$D * H * 60 \left( \frac{1}{C_{\max}} \right) \quad (17)$$

در این رابطه،  $C$  هزینه برق مصرفی و  $\sin \varphi$  نشان‌دهنده دوری و نزدیکی به پایتخت و شهرهای صنعتی بزرگ می‌باشد. تابع دوم در معادله (۲) به مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم مشتمل بر شبکه‌ای از ماشین‌های تولیدی می‌پردازد. حداکثر کردن قابلیت اطمینان که تابعی به شدت تصادفی می‌باشد به منظور تعیین نوع اقدام نگهداری و تعمیرات نیز می‌باشد. تابع هدف سوم در معادله (۳) نشان‌دهنده تابع هدف سوم مسئله جهت حداقل کردن هزینه برنامه نگهداری تعمیرات شامل نت پیشگیرانه و نت اصلاحی است که به صورت تصادفی بیان شده است. در حقیقت در توابع هدف تعریف شده در این مسئله چندهدفه تضادهای ساختاری وجود دارد. بدین معنی که اگر هدف سوم بهینه‌سازی شود و هزینه‌های نت کاهش یابد سطح آمادگی سیستم به منظور افزایش پایایی خود در هدف دوم نیز کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با کاهش پایایی و افزایش خرابی، زمان تکمیل کارها افزایش خواهد یافت.

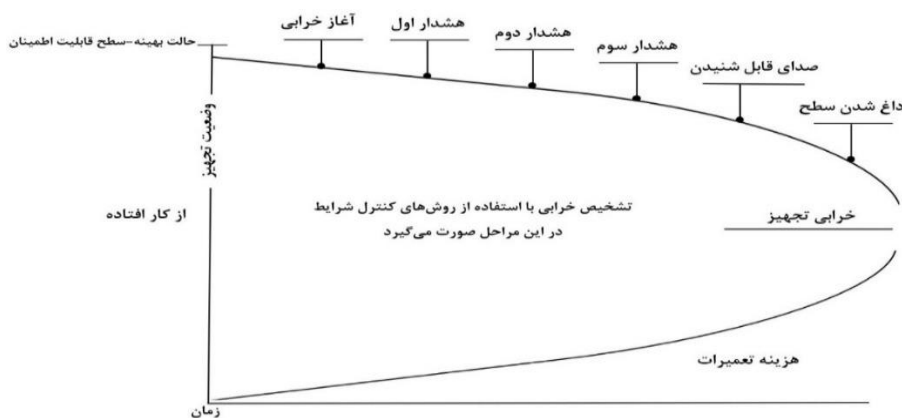
معادله (۴) نشان‌دهنده محدودیتی تصادفی و سازنده زمان تکمیل کارها است که بزرگ‌تر از زمان انجام همه کارها است. در این معادله، زمان تکمیل کار از مجموع زمان شروع عملیات  $O_{ij}$  و زمان فرایند عملیات  $O_{ij}$  در صورتی که کار بر روی ماشین  $k$  انجام پذیرد، بیشتر و یا به عبارتی حداقل برابر با آن است. محدودیت ۵ تقدم را نشان می‌دهد. به طور کلی دو نوع پیش‌نیازی عملیات یک کار و پیش‌نیازی عملیات کارهای مختلف روی یک ماشین وجود دارد. پس از در نظرگیری محدودیت‌های توالی، محدودیت‌های

تخصیص مطرح می‌شوند. به این صورت که اگر عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  پردازش شود، متغیر  $v_{ijk}$  مقدار یک را اختیار می‌کند و محدودیت فعال می‌گردد. در نتیجه زمان شروع عملیات بعدی  $(j+1)$  بر روی کار  $i$ ، بزرگ‌تر و یا حداقل برابر است با زمان شروع عملیات  $j$  بر روی کار  $i$  ( $O_{ij}$ ). محدودیت ۶ تضمین می‌کند که فقط یک ماشین، عملیات  $O_{ij}$  را انجام می‌دهد و در صورت تخصیص عملیات  $O_{ij}$  به ماشین  $k$ ، پردازش فقط توسط ماشین  $k$  انجام می‌گیرد. محدودیت ۷ زمان شروع عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  را نمایش می‌دهد که برابر است با زمان انجام عملیات  $O_{ij}$  که با ضرب در متغیر باینری اولویت  $v_{ijk}$  به این صورت که اگر عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  انجام گیرد، متغیر باینری  $v_{ijk}$  مقدار یک را گرفته و محدودیت زمان شروع عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  فعال می‌گردد. محدودیت ۸ و ۹ کنترل‌کننده هم‌زمانی کارهای است و می‌گوید که نمی‌توان هر دو عملیات  $O_{ij}$  و  $O_{hg}$  بر روی ماشین  $k$  به صورت هم‌زمان، اجرا و پردازش کرد و هر ماشین در یک زمان فقط قادر به انجام یک کار می‌باشد؛ و یا به عبارت دیگر در یک زمان، هر ماشین یک کار را انجام می‌دهد و بایستی بین زمان تکمیل دو کار متفاوت در یک مرحله، حداقل به اندازه زمان پردازش کار قبلی فاصله باشد. به این صورت که زمان شروع عملیات  $O_{hg}$  یعنی  $S_{hgk}$  از مجموع زمان شروع عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  با زمان فرایند عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  وقتی که تخصیص صورت گرفته باشد و با در نظر گرفتن یک جریمه برای شروع نشدن عملیات  $O_{hg}$  بیشتر است. محدودیت ۵ نیز بالعکس محدودیت ۴ می‌باشد تا از شروع نشدن عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  با توجه به تقدم عملیات  $O_{hg}$  بر روی ماشین  $k$  با در نظر گرفتن جریمه جلوگیری نماید و زمان شروع عملیات  $O_{ij}$  بر روی ماشین  $k$  از مجموع زمان شروع و عملیات  $O_{hg}$  در صورت تخصیص بیشتر است و به عبارت دیگر زمان تکمیل بین دو مرحله متوالی همیشه از زمان پردازش آن کار بیشتر است. محدودیت ۱۰ نیز به نوع دیگر پیش‌نیازی کارها روی ماشین را کنترل می‌نماید و نشان‌دهنده جدا بودن هر یک از عملیات  $O_{ij}$  و  $O_{hg}$  بر روی ماشین  $k$  است. به این صورت که حاصل جمع دو متغیر باینری است و اگر عملیات  $O_{ij}$  قبل از عملیات  $O_{hg}$  بر روی ماشین  $k$  انجام شود، عملیات باید تا

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۲۹

اتمام عملیات شروع نشود. در نتیجه مشخص می‌کند کدام یک از عملیات  $O_{hg}$  و  $O_{ij}$  بر دیگری رجحان دارد و به‌عنوان اولویت انتخاب می‌شود. محدودیت ۱۱ نشان‌دهنده‌ی این است که جریان مصرفی انرژی، تابعی از زمان تکمیل کار می‌باشد. بدین معنی که هر چه زمان انجام کارها افزایش یابد جریان مصرفی نیز افزایش می‌باشد. مجموعه محدودیت‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به تعریف محدودیت‌های ضمنی یا متغیرهای تصمیم مدل در محدوده قابل قبول پرداخته است.

شکل ۳. نمای شماتیک از کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه‌های نگهداری

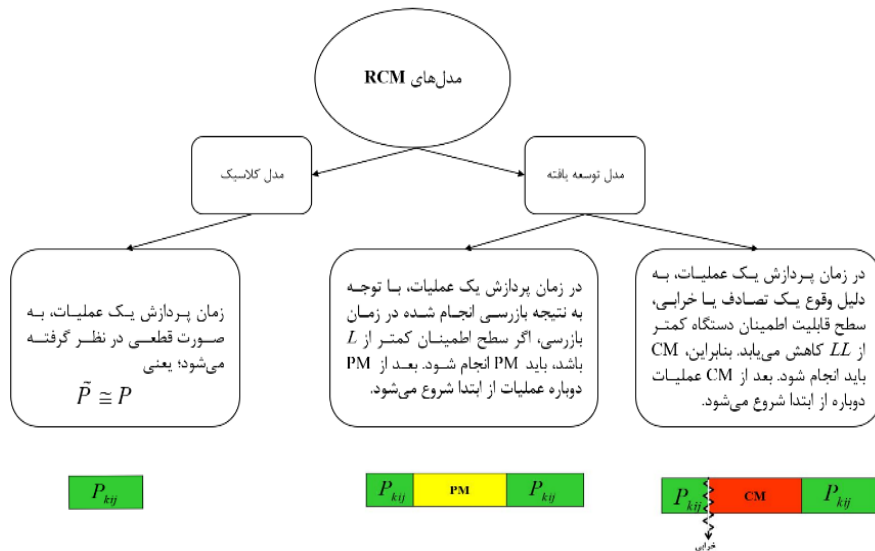


همان‌طور در شکل شماره ۳ مشخص است، محور عمودی سطح قابلیت اطمینان تجهیز و محور افقی زمان استفاده از آن می‌باشد. با شروع کار تجهیز و پس از گذشت زمان و با توجه به شرایط، از طریق صداهای نامتعارف از سمت دستگاه، بو حاصل از سوختگی سیم‌ها، گرم شدن بیش از حد دستگاه و برخی شرایط دیگر، خرابی‌ها آغاز می‌شود. این حالت‌های خرابی منجر به کاهش سطح قابلیت اطمینان شده که توسط سیستم هوشمند RCM شناسایی و طبقه‌بندی و با روش‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه و اصلاحی رفع می‌گردد. همچنین با گذشت زمان که سطح قابلیت اطمینان تجهیز رو به کاهش است، هزینه نگهداری و تعمیر تجهیزات افزایشی بوده و بیشترین میزان هزینه نگهداری و تعمیرات، زمانی رخ می‌دهد که تجهیز از کار افتاده و با انجام اقدام اصلاحی تعویض

می گردد.

مطابق با شکل ۴، مدل‌های RCM به دو دسته مدل کلاسیک و مدل توسعه یافته تقسیم بندی می شوند. در حالت کلاسیک، زمان پردازش عملیات به صورت قطعی فرض می شود و زمان نت اصلاحی و نت پیشگیرانه در آن در نظر گرفته نمی شود؛ اما در مدل توسعه یافته، زمان تکمیل فرایند وابسته به شرایط انجام نت اصلاحی و نت پیشگیرانه می باشد. به این صورت که اگر سطح قابلیت اطمینان تجهیز کمتر از سطح از پیش در نظر گرفته شده  $L$  باشد (سطح اول قابلیت اطمینان که دستگاه قادر به ادامه فعالیت هست، اما در این سطح نت پیشگیرانه انجام می گیرد)، آنگاه نت پیشگیرانه انجام گرفته و سپس فرآیند دوباره انجام خواهد گرفت؛ و اگر سطح قابلیت اطمینان تجهیز کمتر از سطح از پیش در نظر گرفته شده  $LL$  باشد (سطح دوم قابلیت اطمینان که دستگاه با شکست روبرو شده است و قادر به ادامه فعالیت نیست، در این سطح نت اصلاحی انجام می گیرد)، در حالت توسعه یافته و زمانی که نت پیشگیرانه انجام می گیرد، زمان پردازش فرایند، برابر است با  $P_{kij}+PM$  و در حالتی که نت اصلاحی بر روی دستگاه صورت می گیرد، زمان پردازش فرایند برابر است با  $P_{kij}+CM$ .

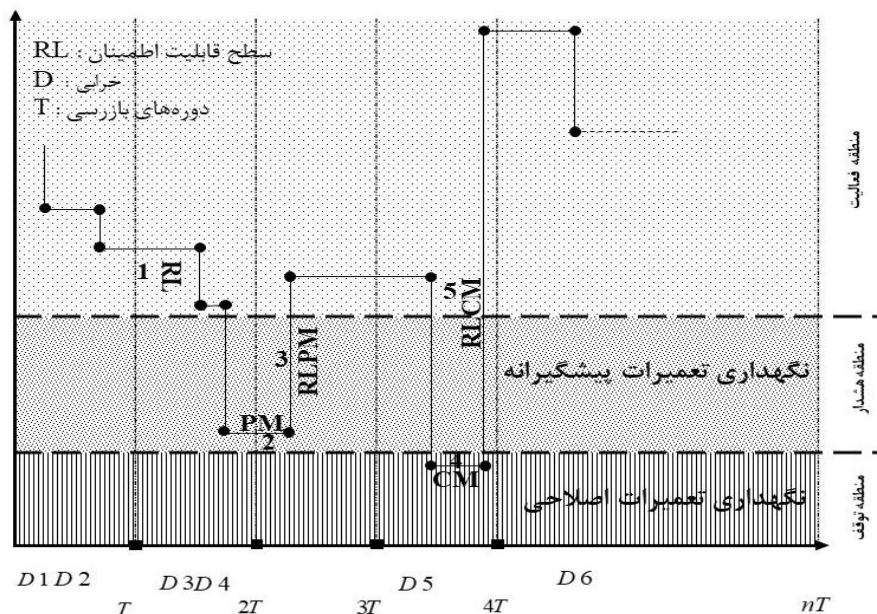
شکل ۴. انواع مدل‌های نت مبتنی بر قابلیت اطمینان



همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید،  $D$  نشان‌دهنده زمان‌های رخداد خرابی و  $T$  بازه‌های زمانی بازرسی است. سطح قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> با  $RL$  نمایش داده می‌شود که با شروع کار دستگاه کاهش می‌یابد. تا زمانی که  $RL$  از حد اولیه عبور نکند، دستگاه بدون نیاز به نت پیشگیرانه به کار خود ادامه می‌دهد؛ اما با ورود به ناحیه هشدار، اقدامات نت پیشگیرانه سطح قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد. در صورت خرابی و کاهش  $RL$  به زیر نرخ شکست، نت اصلاحی (تعمیر یا تعویض) باعث بازگشت قابلیت اطمینان به سطح اولیه می‌شود. نت پیشگیرانه برنامه‌ریزی‌شده و نت اصلاحی به صورت تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی رخ می‌دهد، ممکن است بین دو بازرسی نیز اتفاق افتد و موجب از کارافتادگی تجهیز گردد.

شکل ۵. انجام فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس سطح قابلیت اطمینان

## 1. Reliability Level (RL)



### الگوریتم حل

در این قسمت، به منظور بهینه‌سازی توضیحات مرتبط با الگوریتم‌ها، ابتدا اپراتورهای پایه‌ای مورد استفاده الگوریتم‌ها اعم از اپراتورهای الگوریتم‌های فراابتکاری و اپراتورهای شبیه‌سازی توضیح داده شده و سپس خلاصه‌ای از منطق الگوریتم‌ها بر اساس اپراتورهای توضیح داده شده مطرح خواهد شد. در این قسمت، همچنین به منظور حل مسئله تصادفی چندهدفه از دو الگوریتم به نام الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نا مغلوب<sup>۱</sup> (NSGA-II) و الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نا مغلوب<sup>۲</sup> (NRGA) برای توسعه الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی تصادفی چندهدفه استفاده شده است.

### ساختار جواب و همسایگی

این مقاله از ساختاری دو برداری با طولی به اندازه تعداد کل عملیات<sup>۳</sup> (TNOP) برای ایجاد

1. Non-dominated Sorting Genetic Algorithms  
 2. Non-dominated Ranking Genetic Algorithms  
 3. Total Number of Operations



بهبودسازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقیپور و همکاران | ۳۳

کروموزوم استفاده می‌کند؛ که در آن بردار اول نشان‌دهنده دنباله‌ای از عمل‌ها برای انجام بر روی ماشین‌آلات و بردار دوم بردار تخصیص می‌باشد. ساختار نمونه‌ای از راه‌حل در شکل ۶ نشان داده شده است.

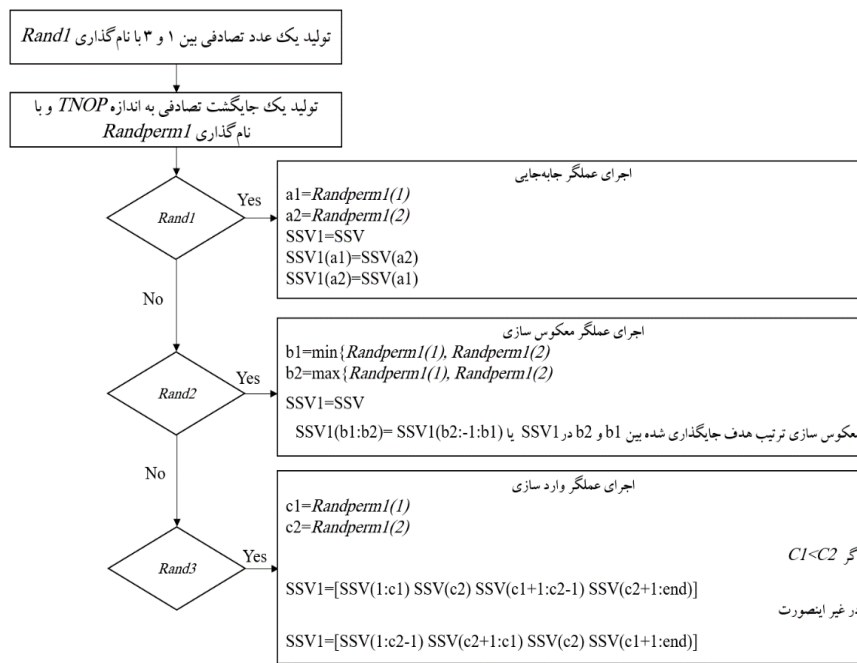
شکل ۶. نمونه ساختار راه‌حل مسئله

بردار توالی								
$O_{31}$	$O_{32}$	$O_{21}$	$O_{33}$	$O_{11}$	$O_{22}$	$O_{12}$	$O_{23}$	$O_{13}$
بردار تخصیص ماشین								
$M_3$	$M_2$	$M_4$	$M_2$	$M_1$	$M_1$	$M_3$	$M_1$	$M_2$

بردار توالی<sup>۱</sup> (SV) یک استراتژی ترکیبی تصادفی<sup>۲</sup> (RHS) از جایجایی<sup>۳</sup>، معکوس<sup>۴</sup> و واردسازی<sup>۵</sup> را اعمال می‌کند. این استراتژی ترکیبی در شکل ۷ نشان داده شده است.

- 
1. Sequence Vector
  2. random hybrid strategy
  3. Swap
  4. Reversion
  5. Insertion

شکل ۷. عملگر ساختار همسایگی SV ترکیبی پیشنهادی



بردار تخصیص<sup>۱</sup> (AV) از طریق عملیات تغییر ماشین<sup>۲</sup> (MCO) از مجموعه ماشین‌های قابل هر عملیات، به صورت شکل ۸ به روزرسانی می‌شود.

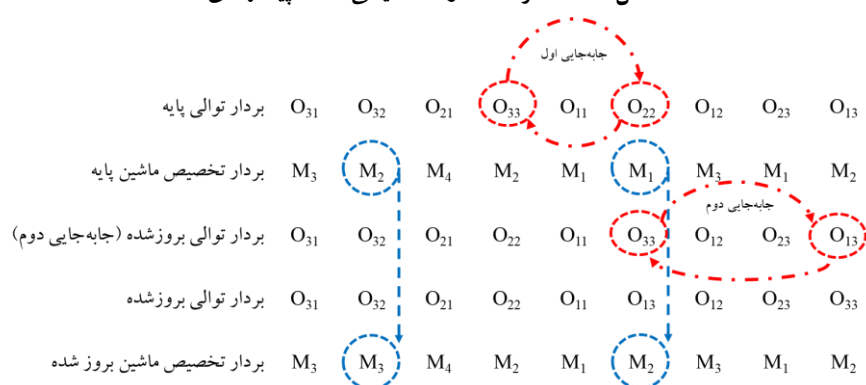
مطابق با شکل ۷، سه اپراتور برای بهینه‌سازی فرآیند تولید پیاده‌سازی شده‌اند. این اپراتورها شامل جابه‌جایی، معکوس‌سازی و واردسازی هستند که به صورت تصادفی از میان آن‌ها یکی انتخاب می‌شود. انتخاب اپراتور بر اساس یک عدد تصادفی از بین یک تا سه صورت می‌گیرد. در صورت انتخاب اپراتور جابه‌جایی، دو کار با توجه به رعایت پیش‌نیازی انتخاب شده و موقعیت عملیات نهایی آن‌ها تعویض می‌گردد. اپراتور معکوس‌سازی، کلیه عملیات مربوط به دو کار را با رعایت شرط پیش‌نیازی معکوس می‌کند، به طوری که تمامی عملیات‌های مربوط به کار سوم ( $O_{33}, O_{32}, O_{31}$ ) با تمامی عملیات‌های کار دوم ( $O_{23}, O_{22}, O_{21}$ ) جایگزین می‌شوند. اپراتور واردسازی نیز با انتخاب

1. Assignment Vector
2. Machine Changing Operator

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۳۵

آخرین عملیات تصادفی از یک کار و قرار دادن آن قبل از آخرین عملیات از کار دیگر و با رعایت شرط پیش‌نیازی، توالی جدیدی را ایجاد می‌کند. این رویکرد، ضمن حفظ ترتیب منطقی عملیات‌ها، به افزایش تنوع و اکتشاف فضای جستجو کمک کرده و در نتیجه، احتمال یافتن راه‌حل‌های مطلوب را بالا می‌برد.

شکل ۸. عملگر ساختار همسایگی AV پیشنهادی



در راستای بهینه‌سازی فرآیند تولید، ساختار همسایگی AV که در شکل ۸ ارائه شده، به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه برای توالی عملیات مطرح می‌گردد. این ساختار با در نظر گرفتن شرایط پیش‌نیازی، ابتدا عملیات  $O_{33}$  را به‌عنوان نقطه شروع انتخاب نموده و آن را با عملیات  $O_{22}$  جابه‌جا می‌کند. در ادامه، عملیات  $O_{13}$  را با  $O_{33}$  جابه‌جا می‌نماید تا توالی بهینه‌ای از عملیات‌ها حاصل شود. این توالی با محاسبه زمان تکمیل کارها، به‌عنوان یک راه‌حل مطلوب (رعایت شرایط پیش‌نیازی) مورد بررسی قرار می‌گیرد و بردار تخصیص ماشین به‌روزرسانی می‌شود. در مورد بردار پایه تخصیص ماشین، انتخاب تصادفی ماشین  $M_2$  و جابه‌جایی آن با ماشین توانا  $M_3$ ، جابه‌جا کرده و بردار تخصیص ماشین را به‌روزرسانی می‌شود. در این فرآیند، حفظ ترتیب منطقی عملیات‌ها و توجه به توانایی ماشین‌ها برای انجام عملیات، ضروری است. این رویکرد، ضمن رعایت شرایط پیش‌نیازی، تنوع لازم برای اکتشاف فضای جستجو را فراهم می‌آورد.

## اپراتورهای شبیه‌سازی

دو دسته کلی از مسائل بهینه‌سازی تصادفی در ادبیات با نام‌های پارامتریک و کنترل وجود دارند. این دو دسته با نام‌های ایستا و پویا نیز شناخته می‌شوند. بهینه‌سازی ایستا شامل مجموعه‌ای از پارامترهای ایستا برای همه حالت‌هاست. با این حال، در بهینه‌سازی کنترل-محور یا پویا، راه‌حل‌ها با توجه به شرایط پویا تغییر می‌کنند. در این تحقیق، به دلیل ماهیت تصادفی مسئله پیشنهادی، استراتژی پویا، فرایند شبیه‌سازی را کنترل می‌کند. شکل ۹ ساختار کلی SBO پیشنهاد شده را طرح‌بندی می‌کند. در این قسمت بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی در مسئله نگهداری و تعمیرات با رویکرد قابلیت اطمینان یا همان RCM بررسی می‌گردد. SBO پیشنهادی دارای دو عنصر اصلی است، یعنی الگوریتم بهینه‌سازی و فرآیند شبیه‌سازی.

شکل ۹. تابع تولید شوک

تابع تولید شوک پیشنهادی برای RCM	
شروع زمان تکانش برابر با شروع زمان عملیات فراخوانی شده بر روی ماشین $m$ مندرج در زمان خرابی/شوگ ماشین $m$	
$S_1 = STJ \{i\} \{j\} \& Shocktimeset(m) = [S_1]$	
زمانی که $S$ کوچکتر از زمان پایان عملیات فراخوانی شده است، یعنی	
<b>While</b>	
$l=l+1; : \text{آنگاه } S_1 \leq FTJ \{i\} \{j\}$	زمان خرابی/شوگ بعدی از طریق توزیع نمایی با میانگین $\lambda$ تعیین می‌گردد: یعنی
$S_l = S_{l-1} + \exp(\lambda)$	جایگزینی زمان $S_1$ در زمان خرابی/شوگ در مجموعه ماشین $m$ . یعنی
$R_l = P_{l+1} \cup Q_l$	
	<b>پایان</b>
<b>End</b>	

قسمت دوم مربوط به شبیه‌سازی می‌باشد که از مؤلفه‌های تصادفی در کار کارگاهی منعطف مانند سطح قابلیت اطمینان<sup>۱</sup>، دوره‌های زمانی نت پیشگیرانه، بهبود سطح قابلیت اطمینان با نت پیشگیرانه و دوره زمانی نت اصلاحی، بهبود سطح قابلیت اطمینان بعد از نت اصلاحی و یا تعویض قطعه و زمان بین دو خرابی استفاده می‌کند.

## 1. Reliability Level (RL)

جدول ۳. شبیه‌سازی و تابع توزیع احتمالی متغیرها

#	واقعه	نماد	تابع توزیع احتمالی متغیرها
۱	کاهش سطح ناشی از شوک	$RL$	$RL \sim Exp(\eta)$ توزیع نمایی
۲	مدت زمان نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه	$PMD$	$PM \sim \log normal(\mu_{PM}, \sigma_{PM})$ توزیع لاگ نرمال
۳	بهبود سطح قابلیت اطمینان بر اساس انجام نت پیشگیرانه	$RLPM$	$RLPM \sim \log normal(\mu_{PM}, \sigma_{PM})$ توزیع لاگ نرمال $Deg_{new} = Deg_{old} - RLPM; L \leq Deg_{old} < H$
۴	مدت زمان نگهداری و تعمیرات اصلاحی	$CMD$	$CM \sim \log normal(\mu_{CM}, \sigma_{CM})$ توزیع لاگ نرمال
۵	بهبود سطح قابلیت اطمینان بر اساس انجام نت اصلاحی	$RLCM$	$RLCM \sim \log normal(\mu_{CM}, \sigma_{CM})$ توزیع لاگ نرمال $Deg_{new} = Deg_{old} - RLCM; Deg_{old} \geq H$
۶	مدت زمان احتمالی بین دو شوک متوالی	$TBS$	$TBS \sim Exp(\lambda)$ توزیع نمایی

بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی یک ابزار کارا است که زوایای مختلف تصادفی بودن را می‌تواند نشان دهد و در مسائل بهینه‌سازی تصادفی به دو صورت عمل می‌کند؛ بررسی سیستم در شبیه‌سازی به صورت ثابت یا پارامتریک و به صورت پویا می‌باشد که متناسب با شرایط موجود به ارائه راهکار می‌پردازد که ما در این مقاله با توجه به شرایط تصادفی بودن مسئله، به صورت پویا به بازرسی از وضع موجود می‌پردازیم.

### شکل ۱۰. ایجاد مدل و نحوه عملکرد فرایند

ایجاد مدل
تنظیم پارامتر. جمعیت مدل، اندازه مدل، تعداد تکرار، اندازه جمعیت
مقداردهی اولیه. معرفی جواب‌های مسئله به عنوان کروموزوم
ارزیابی جمعیت. معرفی تابع برازندگی
$P_t =$ جمع‌آوری اولین جمعیت
<b>حلقه تکرار</b> به اندازه پارامتر مدل جهت ایجاد جمعیت فرزندان با اجرای
$C_t =$ عملگر تولیدمثل
$M_t =$ عملگر جهش
$Q_t =$ ادغام جمعیت فرزندان حاصل شده از عملگرهای تولیدمثل و جهش ( $M_t, C_t$ )
$R_t =$ ادغام جمعیت فرزندان ایجاد شده با جمعیت نسل قبل ( $R_t = P_t \cup Q_t$ )
ارزیابی جمعیت شبیه‌سازی شده $R_t$
مرتب‌سازی جمعیت براساس استراتژی مرتب‌سازی $R_t$
ایجاد جمعیت نسل ( $P_{t+1}$ ) بعد به اندازه جمعیت نسل اولیه

پایان

این بخش فرآیند شبیه‌سازی پیشنهادی را معرفی می‌کند. FJSP چند هدفه پیشنهادی شامل مؤلفه‌های تصادفی مختلفی مانند  $RL$ ،  $PMD$ ،  $RLPM$ ،  $CMD$ ،  $RLCM$  یا  $TBS$  است تا یک نسخه واقعی از RCM را در بر بگیرد. این متغیرها حالت حل‌ها را به صورت پویا تغییر می‌دهند.

عامل شبیه‌ساز الگوریتم به‌عنوان یک ابزار قدرتمند بهینه‌سازی، در هر برنامه‌نویسی تصادفی می‌باشد. دو دسته کلی از مسائل بهینه‌سازی تصادفی در ادبیات وجود دارد، پارامتریک و کنترل. بهینه‌سازی پارامتریک شامل مجموعه‌ای از پارامترهای استاتیک برای همه حالت‌ها است. باین حال، در بهینه‌سازی کنترل، راه‌حل‌ها با توجه به حالت‌های پویا تغییر می‌کنند. در این تحقیق به دلیل ماهیت تصادفی مسئله، استراتژی پویا فرآیند شبیه‌سازی را کنترل می‌کند. شکل ۱۱ ساختار کلی عامل شبیه‌ساز الگوریتم پیشنهادی را به صورت شماتیک ترسیم می‌کند.

ورودی شکل ۸ راه‌حلی از فرآیند بهینه‌سازی و خروجی آن نسخه شبیه‌سازی شده تابع هدف است. این عامل شبیه‌ساز الگوریتم یک حلقه از اجرای شبیه‌سازی را برای به دست آوردن مقدار متوسط توابع هدف انجام می‌دهد تا راه‌حل قوی‌تری برای الگوریتم بهینه‌سازی ارائه کند. در این فلوچارت،  $dt$  زمان نمونه شبیه‌سازی را تنظیم می‌کند. علاوه بر این،  $LVT$  و  $VT$  به ترتیب نشان‌دهنده طول از پیش تعیین شده بین زمان بازدید و زمان آخرین بازدید به دست آمده است.

### شکل ۱۱. شبه کد کلی بخش شبیه‌سازی پیشنهادی عامل شبیه‌ساز الگوریتم

یک راه حل از الگوریتم بگیر.  
شماره شبیه‌سازی = صفر، شماره تکرار = یک.  
تا زمانی که شبیه‌ساز کوچکتر مساوی تعداد پیش فرض شبیه‌سازی هست، اقدامات زیر را انجام بده:  
شناسایی جزئیات شبیه‌سازی  
تا زمانی که یک کار وجود دارد که زمان اتمام آن فرا نرسیده است، مراحل زیر را اجرا کن.  
زمان برابر است با  $k$ -امین شبیه‌سازی در زمان تنظیم شده شبیه‌سازی  
زمان آخرین بازدید برابر است با (حداقل جزء صحیح تقسیم زمان بر طول زمان از پیش تعیین شده بین بازدید) ضرب در طول زمان از پیش تعیین شده بین بازدید  
۱) بروز رسانی قابلیت اطمینان و تابع تصمیم‌نگهداری و تعمیرات  
۲) تابع تعیین وضعیت ماشین‌ها و کار  
۳) ایجاد تابع شوک برای ادامه کار  
اضافه کردن یک تکرار دیگر به  $k$ -امین شبیه‌سازی ( $k=k+1$ )

#### پایان

به شبیه‌سازی پایان داده و زمان تکمیل کارها، هزینه نگهداری و تعمیرات، و قابلیت اطمینان سیستم در محل ذخیره شبیه‌سازی مربوطه گزارش دهید.  
یکی به شماره شبیه‌سازی اضافه و بعنوان شبیه‌ساز جدید نام گذاری کنید ( $sim=sim+1$ )

#### پایان

به کار شبیه‌سازی پایان داده و میانگین زمان تکمیل کارها، هزینه نگهداری و تعمیرات، و قابلیت اطمینان سیستم از محل ذخیره شبیه‌سازی به تابع هدف شبیه‌سازی گزارش دهید.

علاوه بر این، اصطلاحات  $JJS\{j\}(i)$ ،  $JF\{j\}(i)$  و  $IMB(m)$  در شکل ۱۰ و شکل ۱۱، متغیرهای منطقی باینری هستند که به ترتیب نشان‌دهنده «عملیات  $j$  از کار  $i$  شروع شده است»، «عملیات  $j$  از کار  $i$  تمام شده است» و «دستگاه  $m$  مشغول است». تابع به‌روزرسانی قابلیت اطمینان نیز در شکل ۱۲ ارائه شده است که سطح قابلیت اطمینان ماشین‌ها را تعیین می‌کند. همچنین این شکل منطق تصمیم‌گیری نگهداری و تعمیرات را نیز شامل می‌شود.

شکل ۱۲. شبه کد پیشنهادی قابلیت اطمینان و هزینه در شرایط واقعی و عملکرد تصمیم‌گیری نت

<p>به تعداد حلقه‌های <math>m</math> از یک تا <math>M</math> (<math>m=1:M</math>)</p> <p>اگر زمان شروع فعالیت می‌باشد (<math>t=0</math>)</p> <p>سطح قابلیت اطمینان ماشین <math>m</math> برابر با صفر باشد</p> <p><b>پایان</b></p> <p>اگر زمان خرابی ماشین <math>m</math> فرا رسیده است</p> <p><b>تکته:</b> زمان خرابی یا شوک بر اساس تابع مشخص شوک محاسبه می‌شود</p> <p>به ماشین بعدی در حلقه مراجعه شود (<math>m=m+1</math>)</p> <p><b>در غیر اینصورت</b></p> <p>سطح قابلیت اطمینان جدید برای ماشین <math>m</math> برابر است با سطح قابلیت اطمینان قدیم برای ماشین <math>m</math> ضرب در یک عدد تصادفی با توزیع سیگمویید با میانگین <math>\lambda</math></p> <p><b>پایان</b></p> <p>بر اساس کاهش معین سطح تصمیم نگهداری و تعمیرات مشخص شده، اقدامات ذیل صورت می‌گیرد:</p> <p>اگر سطح قابلیت اطمینان ماشین <math>m</math> از <math>L</math> بیشتر باشد (<math>RL(m) \geq L</math>)</p> <p>نیازی به اقدامات برنامه نگهداری و تعمیرات نیست</p> <p><b>پایان</b></p> <p>اگر زمان بازرسی ماشین <math>m</math> از <math>L</math> کمتر (<math>DL(m) &lt; L</math>) یا زمان بازرسی فرارسیده باشد (<math>LVT/RL(m) = t</math>)</p> <p>آنگاه شماره شاخص کار <math>I</math> و عملیات <math>J</math> بر روی ماشین <math>m</math> را فراخوانی کن.</p> <p>عملیات <math>J</math> از کار <math>I</math> بر روی ماشین <math>m</math> متوقف کن.</p> <p>یکی از فعالیت‌های برنامه نگهداری و تعمیرات را شروع کن.</p> <p>اگر سطح قابلیت اطمینان ماشین <math>m</math> از <math>L</math> کمتر (<math>RL(m) &lt; L</math>) باشد:</p> <p>برنامه نگهداری و تعمیرات <b>پیشگیرانه</b> بر روی ماشین <math>m</math> را شروع کن. (زمان انجام این فرایند تصادفی بوده و براساس توزیع لاگ نرمال با میانگین و انحراف معیار زمان نت پیشگیرانه می‌باشد. <math>(\mu_{PM}, \sigma_{PM})</math>)</p> <p>پس از انجام اقدامات نت پیشگیرانه، سطح قابلیت اطمینان ماشین <math>m</math> را با توزیع لاگ نرمال با میانگین و انحراف معیار زمان نت پیشگیرانه <math>(\mu_{PM}, \sigma_{PM})</math> افزایش دهید.</p> <p>یعنی:</p> $RL_{PM} \approx \log normal(\mu_{PM}, \sigma_{PM}), RL_{new}(m) = RL_{old}(m) + RL_{PM}; LL \leq RL_{old}(m) < L$ <p>زمان شروع مجدد کار <math>J</math> بر روی ماشین <math>m</math> و زمان شروع مجدد ماشین <math>m</math> که اقدامات نت <b>پیشگیرانه</b> صورت گرفته و را برابر <math>t</math> در نظر بگیرید.</p> <p>زمان تکمیل کار <math>J</math> بر روی ماشین <math>m</math> و زمان تکمیل ماشین <math>m</math> که اقدامات نت <b>پیشگیرانه</b> صورت گرفته و را برابر <math>t+PMD</math> در نظر بگیرید.</p> <p><b>در غیر اینصورت</b> اگر سطح زمان بازرسی بیشتر باشد، یعنی ماشین خراب شود و (<math>DL(m) &gt; U</math>) باشد:</p> <p>برنامه نگهداری و تعمیرات <b>اصلاحی</b> بر روی ماشین <math>m</math> را شروع کن. (زمان انجام این فرایند تصادفی بوده و براساس توزیع لاگ نرمال با میانگین و انحراف معیار زمان نت اصلاحی می‌باشد. <math>(\mu_{CM}, \sigma_{CM})</math>)</p> <p>پس از انجام اقدامات نت اصلاحی، سطح قابلیت اطمینان ماشین <math>m</math> را برابر با یک قرار دهید؛ یعنی:</p> $RL_{new}(m) = RL_{old}(m) + RL_{CM} = 1;$ <p>زمان شروع مجدد کار <math>J</math> بر روی ماشین <math>m</math> و زمان شروع مجدد ماشین <math>m</math> که اقدامات نت <b>اصلاحی</b> صورت گرفته و را برابر <math>t</math> در نظر بگیرید.</p> <p>زمان تکمیل کار <math>J</math> بر روی ماشین <math>m</math> و زمان تکمیل ماشین <math>m</math> که اقدامات نت <b>اصلاحی</b> صورت گرفته و را برابر <math>t+CMD</math> در نظر بگیرید.</p> <p><b>پایان</b></p> <p><b>پایان</b></p> <p>ماشین <math>m</math> در حال کار هست و امکان تخصیص کار جدید تا انتهای کار قبلی وجود ندارد.</p> <p><b>پایان</b></p>
--



### شکل ۱۳. تابع تشخیص پیشنهادی وضعیت ماشین و کار

تابع تشخیص وضعیت‌های ماشین	
۱	به تعداد حلقه‌های $m$ از یک تا $M$
۲	اگر ماشین $m$ مشغول به کار بود، متغیر باینری $IBM$ را برابر یک در نظر بگیر.
۳	اگر زمان تکمیل کار ماشین $m$ فرا رسیده بود
۴	و ماشین $m$ مشغول به کار نبود، متغیر باینری $IBM$ برابر با صفر بود
۵	اگر نوع کار بر روی ماشین $m$ از نوع فعالیت نگهداری و تعمیرات نبود.
۶	فراخوانی کن اندیس‌های شناسایی $i$ و $z$ را به عنوان عملیات مربوط به ماشین. نکته: در این قسمت نیازی به فراخوانی اندیس فعالیت نت نیست (انجام شده‌اند)
۷	$JIF(i,j)=1$ تغییر وضعیت از کاره بر روی ماشین $m$ به حالت تکمیل شده، اتمام عملیات زبر روی کار $i$ .
۸	پایان
۹	در غیر اینصورت
۱۰	به ماشین بعدی برو ( $m=m+1$ )
۱۱	پایان
۱۲	پایان
۱۳	پایان
تابع تشخیص وضعیت‌های کار	
۱۴	به تعداد حلقه‌های $m$ از یک تا $M$
۱۵	اگر ماشین $m$ مشغول به کار بود، متغیر باینری $IBM$ را برابر یک در نظر بگیر.
۱۶	به ماشین بعدی برو ( $m=m+1$ )
۱۷	پایان
۱۸	به تعداد حلقه‌های تعداد عملیات $op$ از یک تا $TNOP$
۱۹	فراخوانی کن اندیس‌های شناسایی کار ( $i$ ) و ماشین ( $j$ ) را از $op$ -امین عملیات مرتب شده
۲۰	اگر شرایط $IJS(i,j)=1$ بود، عملیات آغاز شده است.
۲۱	به عملیات بعدی برو ( $op=op+1$ )
۲۲	در غیر اینصورت اگر کاری بر روی ماشین شروع نشده بود ( $IJS(i,j)=0$ ) و همچنین همه کارهای مربوطه قبل از آن بر روی ماشین تمام شده است ( $IJE(i,j)=1$ )
۲۳	کاری که امکان شروع دارد، شروع کن ( $JS(i,j)=1$ )
۲۴	زمان شروع عملیات را از بین زمان شبیه‌سازی موجود و زمان تکمیل الویت دار، و زمان تکمیل عملیات نهایی کار بر روی ماشین $m$ ، بیشترین را انتخاب کن. $STJ(i,j)=\max\{t, IJE(i,j)-1, FTM(m)\}$
۲۵	زمان تکمیل عملیات برابر هست با زمان شروع به علاوه زمان فرایند بر روی ماشین $m$ . یعنی $FTJ(i,j)=STJ(i,j)+PTJ(i,j)(m)$
۲۶	زمان شروع و تکمیل کار بر روی ماشین $m$ می‌بایست بروزرسانی شود، همچنین زمان شوک برای حرکت از این سطح از طریق تابع شوک ایجاد شده مشخص می‌گردد. $STM(m)=STJ(i,j) \& FTM(m) = FTJ(i,j)$
۲۷	پایان
۲۸	پایان
۲۹	پایان

با توجه به برنامه‌های اصلی و برنامه‌های نگهداری و تعمیرات در شکل ۱۳، تابع تشخیص وضعیت ماشین و کار فعال می‌شوند. این توابع وضعیت شروع و پایان کارها را علاوه بر وضعیت ماشین‌ها در هر لحظه‌ای شبیه‌سازی می‌کند.

### الگوریتم‌های چند هدفه

قلب الگوریتم تکاملی NSGA-II الگوریتم ژنتیک (GA) است (دب<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۰) که اپراتورهای پایه‌ای آن در بخش مربوط به الگوریتم‌های تک‌هدفه ذکر گردیدند. در الگوریتم چندهدفه NSGA-II دو اپراتور مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها و فاصله ازدحام به‌منظور انجام عمل‌های مرتب‌سازی جمعیت چندهدفه و انجام عمل انتخاب به نسخه تک-هدفه اضافه شده‌اند. این دو عملگر در کنار سایر عملگرهای GA تک‌هدفه باعث ایجاد مجموعه جواب‌های نامغلوب یا فرونت پارتو شده و در تکرارهای متوالی آن را بهبود می‌دهند (رحمتی و همکاران ۲۰۱۲). الگوریتم NRGA نسخه توسعه یافته الگوریتم NSGA-II است که در آن انتخاب از کل سطوح دسته‌بندی جمعیت بعد از ادغام جمعیت اولیه و ثانویه صورت می‌پذیرد (رحمتی و همکاران ۲۰۱۲).

### نتایج محاسباتی

در بقیه قسمت‌های این بخش، مسائل آزمایشی با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند تا عملکرد الگوریتم‌ها را واضح‌تر نشان دهند و مقادیر تابع هدف جبهه‌های پارتو نیز در شکل ۱۴ برای مسائل آزمون نمونه ارائه شده است. همچنین جبهه پارتو برای یکی از مسائل آزمایشی در شکل ۲۶ ترسیم شده است. این شکل جبهه اصلی را در فضای سه بعدی و نقاط برجسته آن را در صفحات دو بعدی مختلف به تصویر می‌کشند تا نمای بصری کاملی برای جبهه‌ها فراهم شود.

شکل ۱۴. مقادیر شاخص‌های کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی

#	NSGAI					NRGA				
	NOS	MID	S	D	Time	NOS	MID	S	D	Time
۱	۷۰	۱۳۷۱۵/۰۳	۲۸۳۸/۸۳	۱۱۳۲۵۸/۳۰	۱۶۷۵/۷۷	۶۳	۹۳۷۵/۷۱	۹۳۷۷/۸۹	۱۴۹۴۲۹/۳۴	۱۶۷/۳۶
۲	۹۲	۷۵۵۴۲/۷۰	۱۹۰۸۳/۳۷	۱۷۳۶۱۸۸/۷۱	۴۲۳۰/۸۵	۶۷	۱۰۲۶۲/۱۲	۲۲۴/۶۱	۳۵۲۴۸/۶۰	۳۷۳/۵۶
۳	۷۶	۹۸۸۲۳/۴۲	۵۷۶۰۲/۷۶	۱۹۳۰۶۰۸/۵۳	۱۰۳۱۴/۴۱	۷۲	۱۷۴۵۷/۵۱	۲۱۰۳۹/۲۹	۳۸۱۶۳۳/۳۶	۱۴۴۸/۹۰
۴	۷۱	۶۹۲۴/۷۲	۷۸۱۸/۶۶	۹۰۱۳۰/۰۳	۱۱۳۹/۲۰	۷۱	۷۸۴۷/۳۴	۱۷۲۹/۷۳	۴۹۵۰۷/۰۲	۲۴۰/۶۰
۵	۷۹	۲۱۵۸۶/۴۱	۷۸۹۸/۴۳	۱۸۵۹۷۷/۸۳	۵۲۰۵/۸۴	۶۰	۲۰۷۱۴/۳۲	۵۵۷۶/۸۱	۱۴۵۶۷۷/۲۴	۵۹۷/۶۶
۶	۷۰	۱۱۰۴۸/۶۱	۸۰۳/۱۸	۵۲۰۷۱/۸۳	۱۹۴۸/۱۰	۵۲	۹۷۰۶/۴۶	۴۵۲/۲۱	۴۸۴۶۴/۵۵	۳۱۶/۶۶
۷	۵۸	۱۱۱۱۱۷/۸۲	۳۲۹/۱۳	۱۹۰۸۲/۳۱	۱۷۱۹/۲۲	۸۲	۳۲۰۲۵/۳۶	۳۶۶۹/۵۰	۳۳۵۰۳۴/۹۵	۳۰۱/۱۸
۸	۴۴	۸۰۱۷/۲۸	۳۱۶/۳۹	۱۸۲۶۲/۹۰	۱۵۳۷/۳۱	۶۵	۱۴۲۹۹/۷۰	۱۱۰۴/۷۵	۶۸۷۸۰/۹۴	۳۶۰/۶۶
۹	۹۲	۶۲۷۵/۱۹	۳۷۷/۱۸	۳۲۹۲۳/۵۰	۱۶۵۸/۸۰	۴۱	۴۳۴۲/۸۰	۸۵/۸۷	۳۱۴۳/۶۶	۳۰۰/۶۳
۱۰	۶۶	۶۶۶۸/۹۴	۵۱۳/۸۹	۲۳۹۶۵/۱۱	۱۴۹۴/۷۳	۵۲	۹۳۵۹/۷۱	۶۸۶/۹۸	۳۹۳۲۶/۵۸	۳۳۶/۹۵
۱۱	۷۷	۲۵۱۸۹/۰۲	۱۳۹۳۲/۹۱	۱۸۲۱۱۲/۹۲	۴۶۹۳/۰۶	۶۱	۴۲۹۳۱/۳۹	۴۵۹۳/۶۸	۲۵۸۰۴۷/۷۵	۱۱۳۴/۵۰
۱۲	۹۲	۱۵۴۰۵/۴۴	۱۳۷۰/۷۹	۹۲۷۱۴/۰۴	۳۱۹۸/۵۲	۲۸	۲۷۰۹۰/۵۳	۲۰۷۹/۵۱	۱۲۲۹۶۲/۸۱	۴۷۳/۰۲
۱۳	۲۷	۲۵۰۸۸/۲۰	۳۱۲۸/۲۱	۶۳۶۷۹/۸۵	۴۳۱۸/۲۶	۴۹	۳۴۳۰۶	۱۲۸/۸۰	۱۴۹۵۰۹/۳۷	۷۲۷/۹۶
۱۴	۵۸	۱۵۱۴۵۰/۹۸	۲۶۲۰۳/۵۴	۹۲۰۸۵۸/۲۶	۱۲۹۹۷/۹۲	۷۳	۱۴۹۴۵۴/۱۲	۲۵۵۵۰/۳۱	۱۳۳۴۸۵۷/۲۹	۳۷۳/۵۰
۱۵	۴۸	۲۰۹۶۵/۷۱	۵۵۳/۶۰	۱۶۶۸۹/۱۷	۳۶۲۸/۸۱	۵۸	۹۳۹۲۱/۹۶	۱۳۲۸۳/۱۱	۶۰۰۵۱۰/۷۹	۹۷۶/۵۰
۱۶	۶۳	۵۳۱۰۱/۴۰	۴۱۸۸/۴۱	۱۶۱۵۳۰/۶۰	۶۳۵۶/۵۶	۴۸	۱۱۱۶۴۹/۷۷	۷۳۶۹/۹۲	۳۶۸۰۳۲/۰۵	۱۶۱۸/۸۳

نتایج به‌دست‌آمده از حل الگوریتم‌های پیشنهادی در شکل ۱۴ نشان داده شده است که شامل شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها است که به‌طور کلی عملکرد آن‌ها را در یافتن راه‌حل‌های بهینه برای مسئله کار کارگاهی منعطف ارزیابی می‌کنند و مقایسه این شاخص‌ها معیار ارزشمندی برای انتخاب مؤثرترین و کارآمدترین راه‌حل‌ها است.

### مقایسه آماری الگوریتم‌های پیشنهادی

به جهت ارزیابی کارایی مدل و به‌منظور مقایسه عملکرد الگوریتم NSGA-II با الگوریتم NRGA، ۱۶ مثال تصادفی با اندازه‌های مختلف در تعداد کار و ماشین در داخل کار کارگاهی منعطف و بر روی مدل پیشنهادی تشکیل شد و همچنین معیارهای مقایسه کارایی (MID و S و D و Time و NOS) الگوریتم‌های چندهدفه محاسبه و نتایج در شکل ۱۴ و

۱۵ آورده شده است.

شکل ۱۵. مقایسه آماری میانگین الگوریتم‌های پیشنهادی بر اساس آزمون  $t$ 

نام شاخص	آزمون $t$	
	P-Value	توضیحات
۱ NOS	۰/۱۳۰	تفاوت معنی‌دار آماری ندارند
۲ MID	۰/۸۵۵	تفاوت معنی‌دار آماری ندارند
۳ S	۰/۴۶۶	تفاوت معنی‌دار آماری ندارند
۴ D	۰/۵۸۸	تفاوت معنی‌دار آماری ندارند
۵ Time	۰/۰۱۱	NRGA، NSGAIII را مغلوب می‌کند

آزمون  $t$  یک ابزار آماری برای مقایسه میانگین دو گروه است تا مشخص کند که تفاوت مشاهده شده بین میانگین‌ها به‌طور معنی‌داری بزرگ است یا می‌تواند تصادفی باشد. این آزمون شامل دو فرضیه است، فرض صفر ( $H_0$ ) که بیان می‌کند میانگین‌های دو گروه برابر هستند و تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و فرض مقابل ( $H_1$ ) که بیان می‌کند میانگین‌ها برابر نیستند و تفاوت معنی‌داری وجود دارد. اگر نتیجه آزمون  $t$  نشان دهد که تفاوت میانگین‌ها معنی‌دار است، فرض صفر رد و نتیجه‌گیری می‌شود که میانگین‌ها متفاوت هستند. در غیر این صورت، فرض صفر پذیرفته و نتیجه‌گیری می‌شود که تفاوت مشاهده شده ممکن است ناشی از تصادف باشد و میانگین‌ها در واقع برابرند.

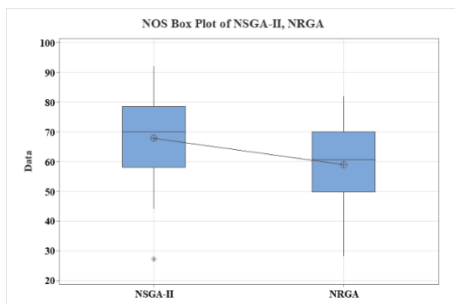
### خروجی الگوریتم‌ها

شاخص تعداد جواب‌ها<sup>۱</sup> (NOS) نشان‌دهنده بهبود عملکرد الگوریتم با افزایش تعداد جواب‌ها است که برای هر یک از اعضای جبهه‌ی پارتو، مقدار تابع هدف انرژی را با هر یک از الگوریتم‌های NSGA-II و NRGا را حل و محاسبه می‌کند.

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۴۵

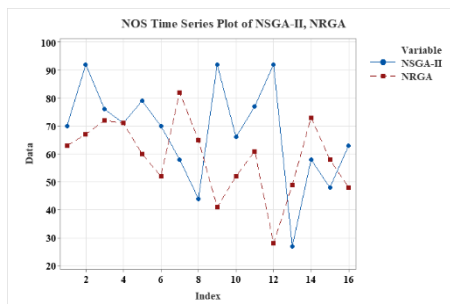
شکل ۱۷. نمودار جعبه‌ای آزمون‌های آماری

شاخص NOS



شکل ۱۶. نمودار سری‌های زمانی آزمون‌های

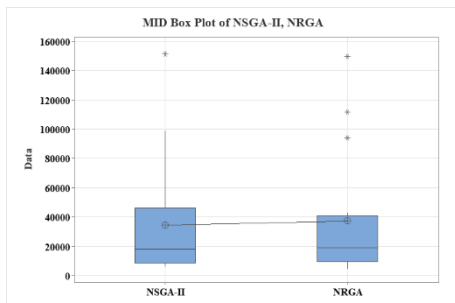
آماري شاخص NOS



مقدار بیشتر این شاخص، نشانگر عملکرد بهتر الگوریتم در جبهه پارتویی می‌باشد. مطابق شکل‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۷، عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II با NPGA در مجموعه نمونه‌ها و با شاخص NOS، تفاوت معناداری ندارند.

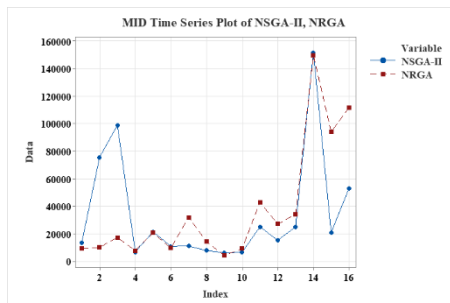
شکل ۱۹. نمودار جعبه‌ای آزمون‌های آماری

برای شاخص MID



شکل ۱۸. نمودار سری‌های زمانی آزمون‌های

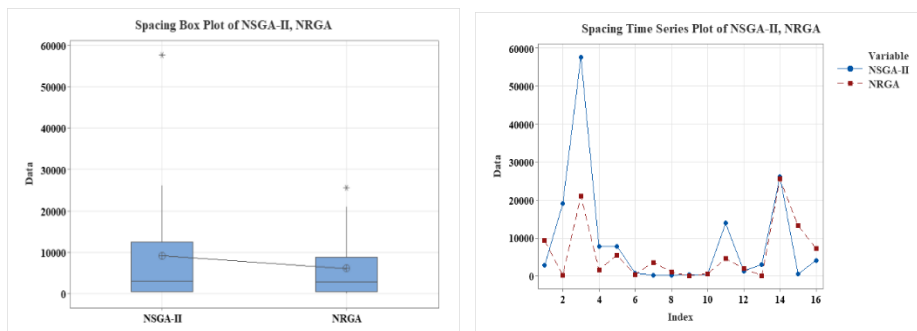
آماري برای شاخص MID



شاخص میانگین فاصله بهینه<sup>۱</sup> (MID) با کاهش فاصله ایده‌آل، کیفیت بالاتر راه‌حل‌ها و بهبود عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد که برای هر یک از اعضای جبهه پارتو، متوسط فاصله از نقطه‌ی ایده‌آل را محاسبه می‌کند مقدار کم این شاخص، نشانگر عملکرد بهتر الگوریتم در جبهه پارتویی می‌باشد. مطابق شکل‌های ۱۴، ۱۸ و ۱۹، عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II با NPGA در مجموعه نمونه‌ها و با شاخص MID، تفاوت معناداری ندارند.

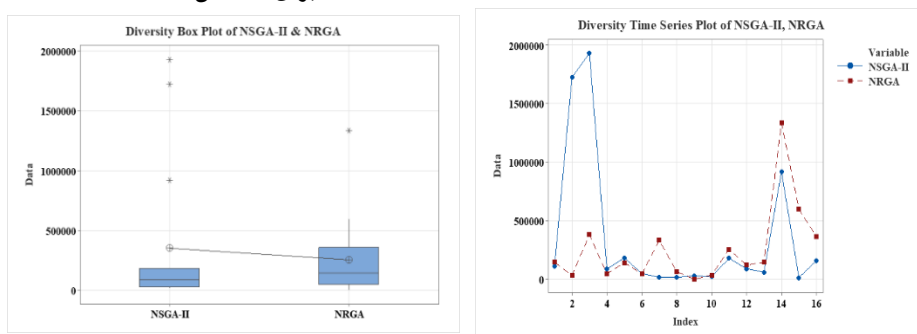
## 1. Mean Ideal Distance

شکل ۲۰. نمودار سری‌های زمانی آزمون‌های آماری برای شاخص S  
 شکل ۲۱. نمودار جعبه‌ای آزمون‌های آماری برای شاخص S



با شاخص میانگین یکنواختی فضای (S)، با کاهش فاصله نقطه‌ای، بهبود عملکرد الگوریتم و کیفیت بالاتر راه‌حل‌ها را نشان می‌دهد که توزیع جواب‌های موجود در جبهه‌ی پارتو را با آن می‌توان ارزیابی کرد. مقدار کم این شاخص، نشانگر عملکرد با یکنواختی بیشتر الگوریتم در جبهه پارتویی می‌باشد. مطابق شکل‌های ۱۴، ۲۰ و ۲۱ عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II با NPGA در مجموعه نمونه‌ها و با شاخص S، تفاوت معناداری ندارند.

شکل ۲۲. نمودار سری‌های زمانی آزمون‌های آماری برای شاخص D  
 شکل ۲۳. نمودار جعبه‌ای آزمون‌های آماری برای شاخص D



شاخص پراکندگی (D)<sup>۲</sup> پراکندگی با افزایش تنوع راه‌حل‌ها، بهبود عملکرد الگوریتم و

1. Spacing
2. Diversity

بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۴۷

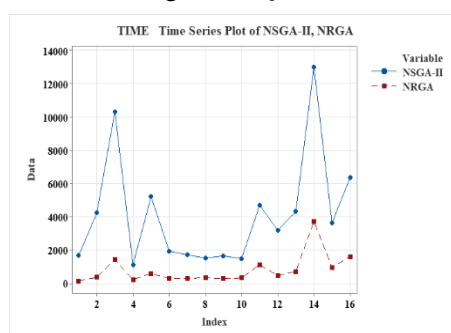
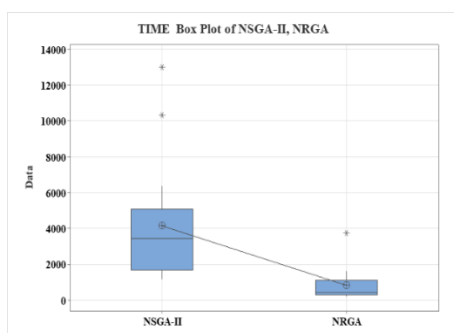
انتخاب راه‌حل‌های مؤثرتر و کارآمدتر را ممکن می‌سازد و جواب‌های پارتویی یک الگوریتم را نمایش می‌گذارد. مقادیر بیشتر این معیار نشانگر وسعت و پراکندگی بیشتر و بهتر عملکرد الگوریتم در جبهه پارتویی می‌باشد. مطابق شکل‌های ۱۴، ۲۲ و ۲۳ عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II با NPGA در مجموعه نمونه‌ها و با شاخص D، تفاوت معناداری ندارند.

شکل ۲۴. نمودار سری‌های زمانی آزمون‌های

شکل ۲۵. نمودار جعبه‌ای آزمون‌های آماری

برای شاخص T

آماری برای شاخص T

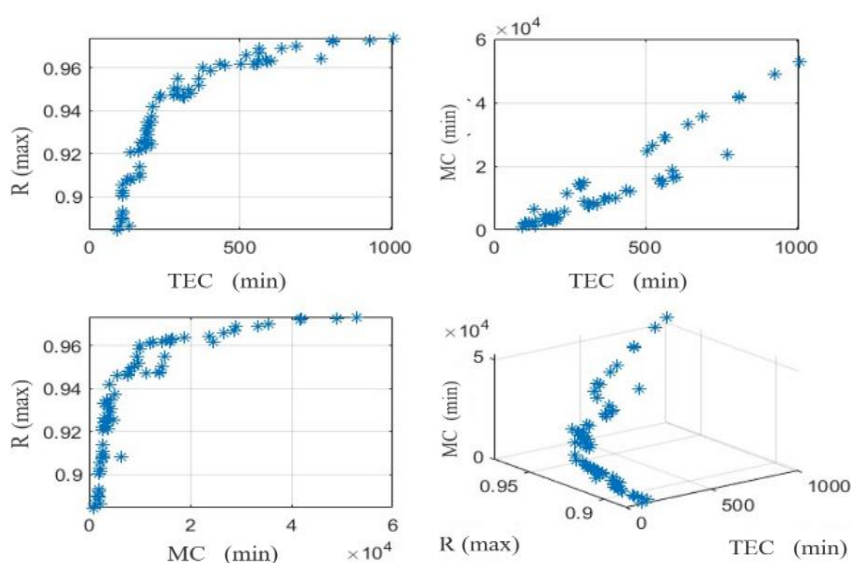


شاخص زمان (T) که با کاهش زمان حل، عملکرد بهتر الگوریتم و بهبود کارایی در حل مسائل پیچیده را نشان می‌دهد و میزان زمان حل الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA در مجموعه‌ی نمونه‌ها مقایسه می‌کند. مقادیر کمتر این شاخص نشانه‌ی بهتر بودن عملکرد الگوریتم در جبهه پارتویی می‌باشد. مطابق شکل‌های ۱۴، ۲۴ و ۲۵، عملکرد الگوریتم‌های NSGA-II و NPGA در مجموعه نمونه‌ها و با شاخص T، الگوریتم NSGA-II الگوریتم NPGA را مغلوب می‌کند.

در نتیجه، شاخص تعداد جواب‌ها نشان‌دهنده بهبود عملکرد الگوریتم با افزایش تعداد جواب‌ها است. شاخص میانگین یکنواختی فضا، با کاهش فاصله نقطه‌ای، بهبود عملکرد الگوریتم و کیفیت بالاتر راه‌حل‌ها را نشان می‌دهد. شاخص پراکندگی، با افزایش تنوع راه‌حل‌ها، بهبود عملکرد الگوریتم و انتخاب راه‌حل‌های مؤثرتر و کارآمدتر را ممکن می‌سازد. شاخص میانگین فاصله بهینه، با کاهش فاصله ایده‌آل، کیفیت بالاتر راه‌حل‌ها و

بهبود عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد. همچنین، شاخص زمان با کاهش زمان حل، عملکرد بهتر الگوریتم و بهبود کارایی در حل مسائل پیچیده را نشان می‌دهد. در ادامه، نمودار جبهه پارتو برای یک نمونه مسئله FJSP رسم و هم‌زمان سطح قابلیت اطمینان برخط مسئله نمونه و روند تکامل راه‌حل آن، به نمایش گذاشته شده است.

شکل ۲۶. یک نمونه از جبهه پارتویی از الگوریتم کار کارگاهی منعطف



جبهه پارتویی در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه به مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها اشاره دارد که هیچ کدام از آن‌ها نسبت به دیگری برتری کامل ندارند. به این معنی که بهبود در یک هدف منجر به افت در هدف دیگر می‌شود. این مجموعه شامل تمامی راه‌حل‌هایی است که نمی‌توان یکی از اهداف را بهبود بخشید بدون اینکه اهداف دیگر تضعیف شوند. در مسئله‌ی فوق که شامل حداقل کردن هزینه انرژی مصرفی، حداکثرسازی قابلیت اطمینان و حداقل‌سازی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌باشد، جبهه پارتویی راه‌حل‌هایی را نشان می‌دهد که بهترین مصالحه ممکن بین این اهداف را برقرار می‌کنند؛ به عبارت دیگر، هر راه‌حل روی جبهه پارتویی نمایانگر یک نقطه تعادل است

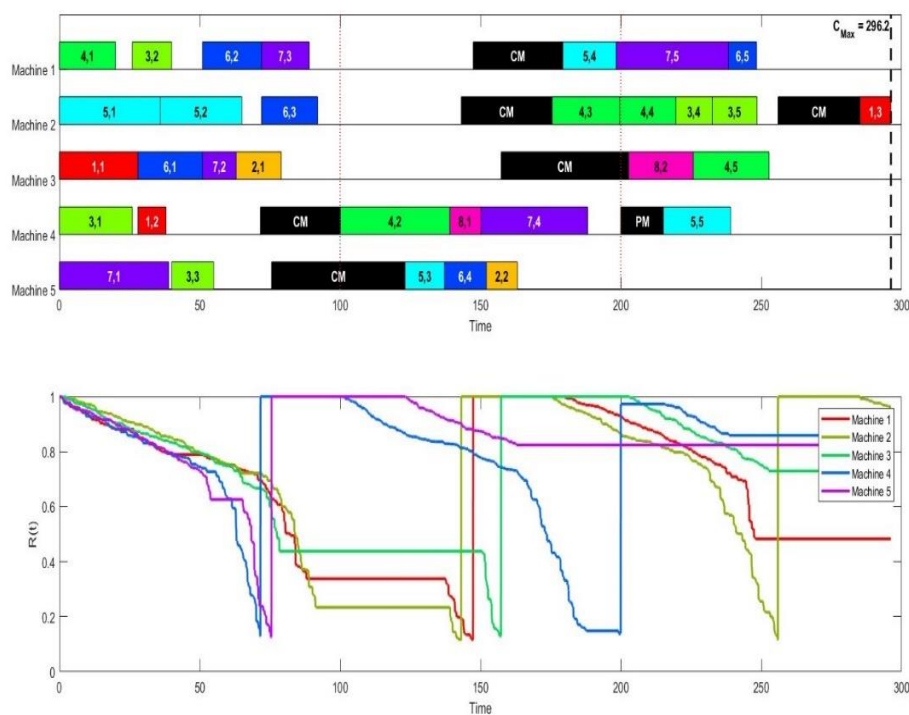


بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۴۹

که در آن نمی‌توان یک هدف را بهبود بخشید مگر اینکه هدف دیگر دچار افت شود. همان‌طور که در شکل ۲۷ برای یک مسئله با ۵ ماشین و ۸ کار نشان داده شده است، با کاهش سطوح قابلیت اطمینان ماشین ۴ و ماشین ۵، به کمتر از  $LL$ ، این ماشین‌ها به  $CM$  نیاز دارند. در نتیجه عملیات بر روی کار ماشین‌ها، قطع شده و عملیات نت اصلاحی آغاز می‌شود.

شکل ۲۷. سطح قابلیت اطمینان برخط بر اساس روند تکامل راه‌حل یک مسئله نمونه

از جبهه پارتویی



همچنین پس از نت اصلاحی بر روی ماشین ۴، سطح قابلیت اطمینان این ماشین افزایش یافته و بعد گذشت زمان، دوباره سطح قابلیت اطمینان آن کاهش می‌یابد و این بار این کاهش در سطح  $L$  بوده و نیاز به یک برنامه نت پیشگیرانه (PM) بوده که با اجرای آن، ماشین ۴ عملیات بر روی کار ۵ از سر می‌گیرد. می‌توان گفت که این ارقام

نشان دهنده آن است که الگوریتم معرفی شده می تواند فرآیند را به صورت هوشمند و مستقل کنترل کند. نتایج، مسئله پیشنهادی را از جنبه های مختلف نشان می دهد که الگوریتم های چندهدفه توسعه یافته می توانند فرآیند بهینه سازی را بر اساس ملاحظات RCM از پیش تعیین شده به طور کارآمد نظارت و اجرا کنند.

### نتیجه گیری

در این تحقیق به توسعه مسئله FJSP سبز چندهدفه تصادفی با در نظر گیری هم زمان ملاحظات نت و RCM پرداخته شد. در مسئله یکپارچه تولید شده، بیش از شش عامل تصادفی ساز کاربردی در صنعت اعم از زمان پردازش، زمان های نت پیشگیرانه و اصلاحی تصادفی، سطح خرابی و بهبود پس از تعمیر تصادفی و شوک دهی تصادفی بهره گرفته شده است. در قسمت ملاحظات انرژی نیز عامل دوری و نزدیکی به مناطق توسعه یافته در نظر گرفته شده است. سپس ماژول های شبیه ساز برای قسمت های تصادفی توسعه پیدا نمودند و تحت قالب الگوریتم های فراابتکاری NSGAI و NRGAI روش های تکاملی و بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی برای حل مسئله توسعه داده شد. با توجه به سرعت و عملکرد روش های توسعه داده شده، الگوریتم ها می توانند به عنوان یک DSS در دست توسعه دهندگان نرم افزار تحت شرایط قویاً تصادفی در محیط های صنعتی در این حوزه قرار گیرند. سپس با استفاده از آزمون های فرض آماری روی شاخص های مطرح ادبیات مسائل تصمیم گیری چندهدفه، نتایج به دست آمده از الگوریتم های بررسی گردید که به غیر از برتری در زمان حل توسط روش NSGAI در سایر شاخص های چند هدفه تفاوت معنی داری بین الگوریتم ها وجود ندارد که به نوعی اعتبارسنجی و تکثیرپذیری نتایج به دست آمده از اپراتورهای توسعه داده شده را در الگوی جستجو نشان می دهد. همچنین نمودارهای آماری و غیر آماری متعدد پشتیبان نیز این عملکرد را تأیید نمود و جزئیات عملکرد الگوریتم ها روی مسائل متعدد حل شده به صورت بصری ارائه نمودند. در ادامه این تحقیق می توان مدیریت منابع انسانی اعم از تولیدی و تعمیرات را در مسئله در نظر گرفت. بعلاوه بهبود عملکرد هوشمند

بهبودسازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقیپور و همکاران | ۵۱

سازی الگوریتم‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند شبکه‌های عصبی و یادگیری تقویت شده<sup>۱</sup> نیز می‌تواند به توسعه مؤثر و کاربردی ادبیات مسئله منجر شود.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

#### ORCID

Mohammad Hassan


Sadeghpour


Ali Mohtashami


Seyed Habib A. Rahmati

Mostafa Zandieh

 <https://orcid.org/0009-0003-8714-5068>

 <https://orcid.org/0000-0002-6096-6646>

 <https://orcid.org/0000-0002-0276-7622>

 <https://orcid.org/0000-0003-1209-9514>

## منابع

۱. خانی، امیرمحمد، کزازی، ابوالفضل، بیرامی، ثریا. (۱۴۰۱). مدل‌سازی ساختاری بر مبنای مدیریت زنجیره تأمین در رابطه با مدیریت کیفیت جامع، نگهداری و تعمیرات بهره‌ور فراگیر، سازمان یادگیرنده و عملکرد عملیاتی. *مطالعات مدیریت صنعتی*, ۲۰(۶۵), ۳۹-۸۴.  
<https://doi.org/10.22054/jims.2022.62763.2688>
۲. رحمتی، سید حبیب‌الله، زندیه، مصطفی. (۱۳۹۱). توسعه دو الگوریتم چند هدفه برای حل مسئله چند هدفه زمان‌بندی کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن توان مصرفی ماهانه. *مطالعات مدیریت صنعتی*, ۱۰(۲۷), ۱۱۸-۱۴۳.  
[https://jims.atu.ac.ir/article\\_1905.html](https://jims.atu.ac.ir/article_1905.html)
۳. ساجدی نژاد، آرمان، & لطفی، میثم. (۱۳۹۸). مدلی برای بهینه‌سازی زمانبندی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای سیستم‌های چند جزئی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *مطالعات مدیریت صنعتی*, ۱۷(۵۵), ۱۳۷-۱۶۰.  
<https://doi.org/10.22054/jims.2019.15312.1543>.
۴. علی حاج شیرمحمدی. (۲۰۰۵). برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات (مدیریت فنی). انتشارات غزل

## References

5. Ahmadi, R., Castro, I. T., & Bautista, L. (2024). Reliability modeling and maintenance planning for a parallel system with respect to the state-dependent mean residual time. *In Journal of the Operational Research Society* (Vol. 75, Issue 2, pp. 297–313).  
<https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2194316>
6. Alkabaa, A. S., Taylan, O., Guloglu, B., Baik, S., Sharma, V., Mishra, R., Alharbi, R., & Upreti, G. (2024). A fuzzy ANP-based criticality analyses approach of reliability-centered maintenance for CNC lathe machine components. *In Journal of Radiation Research and Applied Sciences* (Vol. 17, Issue 1, p. 100738).  
<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100738>
7. Azevedo, R. V., Moura, M. das C., Lins, I. D., & Droguett, E. L. (2020). A multi-objective approach for solving a replacement policy problem for equipment subject to imperfect repairs. *Applied Mathematical Modelling*, 86, 1–19.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.04.007>
8. Børresen, C. S. (2011). A framework for cost-benefit analysis on use

- of condition based maintenance in an IO perspective. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ....  
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-15498>
9. Cao, R., Coit, D. W., Hou, W., & Yang, Y. (2020). Game theory based solution selection for multi-objective redundancy allocation in interval-valued problem parameters. *Reliability Engineering and System Safety*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106932>
  10. Cheng, G., & Li, L. (2020). Joint optimization of production, quality control and maintenance for serial-parallel multistage production systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107146>
  11. Dhillon, B. S. (2011). *Design Reliability Fundamentals and Applications* by B.S. Dhillon. In Economist ISBN 9781032180212. (Vol. 398, Issue 8716).
  12. Duffuaa, S. O., Ben-Daya, M., Al-Sultan, K. S., & Andijani, A. A. (2001). A generic conceptual simulation model for maintenance systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(3), 207–219. <https://doi.org/10.1108/13552510110404512>
  13. Ebrahimipour, V., Najjarbashi, A., & Sheikhalishahi, M. (2015). Multi-objective modeling for preventive maintenance scheduling in a multiple production line. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(1), 111–122. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0766-6>
  14. Ekpenyong, M. E., & Udoh, N. S. (2024). Intelligent optimal preventive replacement maintenance policy for non-repairable systems. In *Computers and Industrial Engineering* (Vol. 190). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110091>
  15. El Khoukhi, F., Boukachour, J., & El Hilali Alaoui, A. (2017). The “Dual-Ants Colony”: A novel hybrid approach for the flexible job shop scheduling problem with preventive maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, 106, 236–255. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.10.019>
  16. Fuentes-Huerta, M. A., González-González, D. S., Cantú-Sifuentes, M., & Praga-Alejo, R. J. (2021). Fuzzy reliability centered maintenance considering personnel experience and only censored data. *Computers and Industrial Engineering*, 158(April), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107440>
  17. Hien, N. N., Lasa, G., Iriarte, I., & Unamuno, G. (2022). An overview of Industry 4.0 Applications for Advanced Maintenance Services. *Procedia Computer Science*, 200, 803–810. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.277>
  18. Higgins, L. R., & Mobley, R. K. (2002). *Maintenance Engineering Handbook*, Sixth Edition.

19. Lu, X. Q., Yan, H. F., Su, Z. L., Zhang, M. X., Yang, X. H., & Ling, H. F. (2021). Metaheuristics for homogeneous and heterogeneous machine utilization planning under reliability-centered maintenance. *Computers and Industrial Engineering*, 151, 106934. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106934>
20. Ma, X., Liu, B., Yang, L., Peng, R., & Zhang, X. (2020). Reliability analysis and condition-based maintenance optimization for a warm standby cooling system. *Reliability Engineering and System Safety*, 193, 106588. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106588>
21. Mobley, R. K. (2002). *Introduction to Predictive Maintenance*. In Elsevier Science (USA). ISBN 0-7506-7531-4
22. Modibbo, U. M., Arshad, M., Abdalghani, O., & Ali, I. (2021). Optimization and estimation in system reliability allocation problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 212, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107620>
23. Moubray, 1997. (1997).. *Reliability-Centered Maintenance*. 2nd ed.. In Elsevier Science (USA), 223p. ISBN 0-8311-3078-4
24. Nahas, N., Nourelfath, M., & Ait-Kadi, D. (2007). Coupling ant colony and the degraded ceiling algorithm for the redundancy allocation problem of series-parallel systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(2), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.12.002>
25. NASA, R. (2008). *Guide reliability: Centered maintenance guide for facilities and collateral equipment*. Aeronautics and SA NASA, Eds.
26. Ozturkoglu, Y., & Bulfin, R. L. (2011). A unique integer mathematical model for scheduling deteriorating jobs with rate-modifying activities on a single machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5–8), 753–762. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3303-9>
27. Piechnicki, F., Dos Santos, C. F., De Freitas Rocha Loures, E., & Dos Santos, E. A. P. (2021). Data fusion framework for decision-making support in reliability-centered maintenance. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/21681015.2020.1817164>
28. Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., & Karimi, B. (2018a). Developing simulation-based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem. *Scientia Iranica*, 25(5E), 2788–2806. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4461>
29. Rahmati, S. H. A., Ahmadi, A., & Karimi, B. (2018b). Multi-objective evolutionary simulation-based optimization mechanism for a novel stochastic reliability centered maintenance problem.

- Swarm and Evolutionary Computation*, 40, 255–271.  
<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.02.010>
30. Sadjadi, S. J., & Soltani, R. (2015). Minimum-Maximum regret redundancy allocation with the choice of redundancy strategy and multiple choice of component type under uncertainty. *Computers and Industrial Engineering*, 79, 204–213.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.021>
31. Sadjadi, S. J., Tofigh, A. A., & Soltani, R. (2014). A new nonlinear multi-objective redundancy allocation model with the choice of redundancy strategy solved by compromise programming approach. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 27(4), 545–552.  
<https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2014.27.04a.05>
32. Safari, E., & Sadjadi, S. J. (2011). A hybrid method for flowshops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2020–2029. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.138>
33. Sakib, N., & Wuest, T. (2018). Challenges and Opportunities of Condition-based Predictive Maintenance: A Review. *Procedia CIRP*, 78, 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.318>
34. Shen, J., & Zhu, K. (2018). An uncertain single machine scheduling problem with periodic maintenance. *Knowledge-Based Systems*, 144, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.12.021>
35. Shen, J., & Zhu, Y. (2019). A parallel-machine scheduling problem with periodic maintenance under uncertainty. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(8), 3171–3179. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1032-8>
36. Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.12.006>
37. Sielaff, L., Lucke, D., & Sauer, A. (2023). Evaluation of a production system's technical availability and maintenance cost—development of requirements and literature review. *In International Journal of Computer Integrated Manufacturing* (Vol. 36, Issue 12, pp. 1801–1822). <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2177739>
38. Siswanto, N., Zaman, M. B., Fahreza, F., Priyanta, D., Pitana, T., Prastowo, H., Wicaksana, A., & Fauzi, H. N. (2022). A Case Study Maintenance Task Allocation Analysis on Marine Loading Arm Using Reliability Centered Maintenance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 972(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/972/1/012032>
39. Soltani, R., & Sadjadi, S. J. (2014). Reliability optimization through

- robust redundancy allocation models with choice of component type under fuzziness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(5), 449–459. <https://doi.org/10.1177/1748006X14527075>
40. Soltani, R., Sadjadi, S. J., & Tofigh, A. A. (2014). A model to enhance the reliability of the serial parallel systems with component mixing. *Applied Mathematical Modelling*, 38(3), 1064–1076. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.035>
  41. Xu, Y., Cai, Y., & Song, L. (2023). Condition Assessment of Nuclear Power Plant Equipment Based on Machine Learning Methods: A Review. *In Nuclear Technology* (Vol. 209, Issue 7, pp. 929–962). <https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2169042>
  42. Yang, X., He, Y., Liao, R., Cai, Y., & Dai, W. (2024). Mission reliability-centered opportunistic maintenance approach for multistate manufacturing systems. *In Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 241). <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109693>
  43. Ye, H., Wang, X., & Liu, K. (2021). Adaptive Preventive Maintenance for Flow Shop Scheduling with Resumable Processing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(1), 106–113. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2978890>
  44. Zhou, L., Jiang, Z., Geng, N., Niu, Y., Cui, F., Liu, K., & Qi, N. (2022). Production and operations management for intelligent manufacturing: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(2), 808–846. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2017055>

#### References [In Persian]

1. khani, A. M., Kazzazi, A., & birami, S. (2022). Structural modeling based on supply chain management in relation to total quality management, maintenance and comprehensive productivity, learning organization and operational performance. *Industrial Management Studies*, 20(65), 39-84. <https://doi.org/10.22054/jims.2022.62763.2688>.
2. Rahmati, S. H. A., & Zandieh, M. (2012). Developing two multi-objective algorithms for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem considering total consumed power per month. *Industrial Management Studies*, 10(27), 118-143 [https://jims.atu.ac.ir/article\\_1905.html](https://jims.atu.ac.ir/article_1905.html).
3. Sajedinejad, A., & Lotfi, M. (2019). Providing a model to optimize preventive maintenance schedules for multi-component systems



بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با ...؛ صادقی‌پور و همکاران | ۵۷

using GA. *Industrial Management Studies*, 17(55), 137-160  
<https://doi.org/10.22054/jims.2019.15312.1543>.

4. Hajshirmohammadi.A. (2005). *Maintenance planning: Industrial Technical Management (23th ed.)*. Ghazal Publications.

**استناد به این مقاله:** صادقی‌پور، محمدحسین، محتشمی، علی، رحمتی، حبیب‌اله، زندیه، مصطفی. (۱۴۰۳).  
بهینه‌سازی هوشمند مصرف انرژی در مسئله کار کارگاهی منعطف با در نظرگیری نگهداری و تعمیرات پایایی محور،  
مدیریت صنعتی، ۲۲(۱۳)، ۱-۵۶. DOI: 10.22054/jims.2024.78151.2904



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.