




Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2423-6950
Vol. 14, Issue 2, No. 33, Summer 2023

 <https://doi.org/10.22108/pom.2023.136747.1499>

(Research paper)

Flow shop scheduling and assignment problem in equipment overhaul

Nader Shamami *

Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran,
Iran, n.shamami@casu.ac.ir

Mohsen Torkashvand

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj,
Iran, mtorkashvand28@gmail.com

Hamid Bigdeli

Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran,
Iran, h.bigdeli@casu.ac.ir

Purpose: This paper aims to propose a flow shop scheduling problem for equipment overhaul. This problem consists of three stages, the separation of the components of an equipment is done in the first stage. Repairs and overhaul operations are carried out on the separated parts of the first stage in the second stage. Finally, the overhauled parts of the previous stage are mounted on each other in the third stage. In the third stage, operations are performed in parallel workshops. The objective function of the problem is the maximum time to complete jobs, and the sequence of processing jobs should be done in such a way that the value of the objective function is minimized.

Design/methodology/approach: To solve the problem, a mixed integer programming model has been proposed for small size, which determines the processing sequence of jobs based on the position of each job. A genetic algorithm has been used to solve the problem in large dimensions. By increasing the size of the problem and in different sizes, the results have been examined and analyzed, which shows the efficiency of the model and the proposed algorithm.

Findings: To check the accuracy of the model's performance and also the effect of the presence of parallel machines in the third stage, an example was presented in this paper. Accordingly, while the accuracy of the model's performance was checked, the effect of the presence of more machines was

* Corresponding author, Orcid: 0000-0001-5066-9157



determined in the third stage. As the number of machines increased in the third stage, the value of the objective function did not deteriorate. The performance of GAMS in solving the problem in a small size was investigated. Considering that solving the problem for large dimensions is not possible in a reasonable time and the problem is NP-hard, then solving the problem in large dimensions was done using a genetic algorithm. Therefore, solving the problem on a large dimension has been done using the genetic algorithm. According to the obtained results, the efficiency of the genetic algorithm was shown. Due to its low average value, it indicated the convergence of the genetic algorithm.

Research limitations/implications: Considering that there are not many published papers in the field of equipment overhaul, it is difficult to access related models and papers. Therefore, in this paper, the model and solution method have been written with many reviews. Also, to check and reduce costs, the number of third-stage machines has been determined using sensitivity analysis.

Practical implications: The problem of equipment overhaul is used in many fields in reality. For example, the operations related to the maintenance, repair and overhaul of the aircraft engine have been investigated. Since the planning of maintenance and maintenance operations is difficult, the focus of research has been on improving maintenance operations by finding suitable scheduling for job shop operations in maintenance operations. They emphasized that scheduling can improve maintenance operations and presented a simulation model.

Social implications: The purpose of creating a space to start an activity is to reduce costs, earn money and achieve profit. To examine the cost-effectiveness of the equipment overhaul issue, we can refer to the number of third-stage machines. According to the amount of equipment to perform an overhaul on them, the number of third-stage machines can be determined. Therefore, extra machines can be removed to reduce the cost. On the other hand, if the related equipment to the customers is different, to reduce the storage costs or increase customer satisfaction, different goals should be considered. Here, the objective function of maximum completion time is considered for this purpose. If the equipment must be available at a certain time, goals such as the total time to complete the job can be considered. In line with the application of the social implications in the investigated problem in this paper and considering that the investment costs, as well as the ability to respond to the applicants' requests, are related to the number of third-stage machines, the value of the objective function is analyzed based on the number of third-stage machines and analysis has been done.

Originality/value: In this paper, a three-stage flow shop scheduling problem in the overhaul industry was studied. Accordingly, a new mathematical model based on the job processing position was proposed, which dealt with the exact solution of the problem in small dimensions. According to the type of problem in the overhaul environment, the combined flow shop problem for equipment overhaul was investigated. Also, the use of parallel machines in the third stage of the equipment overhaul problem is one of the new issues under investigation.

Keywords: Equipment overhaul, Jobs allocation, Scheduling, Flow shop



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۴، شماره ۲، پیاپی ۳۳، تابستان ۱۴۰۲

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳ ص ۱-۲۶



<https://doi.org/10.22108/pom.2023.136747.1499>

(مقاله پژوهشی)

مسئله زمان‌بندی و تخصیص جریان کارگاهی در اورهال تجهیزات

نادر شمامی^{۱*}، محسن ترکاشوند^۲، حمید بیگدلی^۳

۱- مربی گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران، n.shamami@casu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، mtorkashvand28@gmail.com

۳- استاد گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران، h.bigdeli@casu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی به‌منظور اورهال تجهیزات ارائه شده است. این مسئله شامل سه مرحله است که در مرحله اول، عملیات تفکیک اجزای یک تجهیز و در مرحله دوم، عملیات تعمیرات و اورهال بر قطعات تفکیک‌شده مرحله اول انجام می‌شود؛ سپس در مرحله سوم، قطعات اورهال‌شده مرحله قبل بر هم سوار می‌شوند. در مرحله سوم، کارگاه‌های موازی، عملیات را به‌صورت موازی انجام می‌دهند. تابع هدف مسئله، بیشینه زمان تکمیل کارهاست و توالی پردازش کارها باید به‌نحوی باشد که مقدار تابع هدف، کمینه شود. به‌منظور حل مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای سایز کوچک ارائه شده است که براساس موقعیت هر کار، توالی پردازش کارها را مشخص می‌کند. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، الگوریتم ژنتیک به کار رفته است. با افزایش سایز مسئله و در سایزهای مختلف، نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل شده است که این کارایی مدل و الگوریتم ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اورهال تجهیزات، تخصیص کارها، زمان‌بندی، جریان کارگاهی

۱- مقدمه

تجهیزات و دارایی‌های فیزیکی سازمان در طول چرخه عمرشان، دچار استهلاک می‌شوند و این امر سازمان‌ها را در دوره‌های زمانی متناوب، در برابر تصمیم‌گیری برای از رده خارج کردن یا بازسازی تجهیزات قرار می‌دهد. در بسیاری از موارد، بازسازی و اورهال تجهیزات صنعتی در صورتی که به‌درستی اجرا شود، می‌تواند در مسیر خلق بیشترین ارزش از دارایی‌های فیزیکی، به سازمان کمک کند.

بنا به یک تعریف عمومی، اورهال عبارت است از احیای همه‌جانبه و کامل یک دارایی برای رساندن آن به شرایط پذیرفتنی، از طریق بازسازی و یا تعویض قطعات و زیرمجموعه‌های آن (لنهان^۱، ۲۰۱۱). در واقع هدف از اجرای اورهال، بازیابی عملکرد بهینه تجهیزات، در عین تضمین قابلیت اطمینان آن است. فرآیند اورهال تجهیزات عموماً شامل مراحل زیر می‌شود (چانگ و عبدالله^۲، ۲۰۱۴):

- جداسازی؛
- بازکردن قطعات؛
- تمیزکاری؛
- بازرسی؛
- تعمیر (یا تعویض)؛
- مونتاژ و تست.

کلمه اورهال معمولاً برای تجهیزات مکانیکی به کار می‌رود و فرآیند آن عموماً در میانه عمر مفید تجهیز پیاده‌سازی می‌شود. گاهی به‌جای کلمه اورهال، از عبارت تعمیرات عمده^۳ استفاده می‌شود. برای اورهال برخی تجهیزات، لازم است که آنها را از محل استقرار خارج و به محل مناسب برای اجرای فرآیند بازسازی منتقل کرد، اگرچه بسیاری از تجهیزات را نیز باید در محل استقرارشان اورهال کرد. در فرآیند اورهال تجهیزات، گاهی به بازسازی^۴ برخی قطعات و تجهیزات زیرمجموعه نیاز است. برای قطعاتی که امکان بازسازی‌شان وجود ندارد، باید برای تعویض^۵ آنها اقدام کرد.

عملیات اورهال می‌تواند به‌صورت اضطراری، در پی یک شکست غیرمنتظره، در قالب یک برنامه از پیش تعیین شده و در زمان خارج از بهره‌برداری بودن تجهیز شود. به‌طور کلی، اجرای فرآیند تعمیرات اساسی دو نوع هزینه را به سازمان تحمیل می‌کند: یکی هزینه‌های مستقیم اجرای فرآیند اورهال و دیگری هزینه‌های مرتبط با از دسترس خارج بودن تجهیز در زمان تعمیرات اساسی. برنامه‌ریزی صحیح و بر مبنای وضعیت سلامت تجهیز در طی چرخه عمر آن، می‌تواند زمان‌بندی اجرای عملیات تعمیر اساسی را به‌گونه‌ای تنظیم کند که هر دو نوع هزینه به حداقل برسد.

به‌منظور افزایش سرعت و دقت در اورهال و تعمیرات تجهیزات در این طرح تحقیقاتی، مسئله زمان‌بندی و تخصیص اورهال تجهیزات در یک جریان کارگاهی^۶ چندمرحله‌ای در نظر گرفته شده است. با هدف بهبود انجام فرآیند اورهال و به اقتضای زمان و وضع موجود، می‌توان به‌منظور کاهش هزینه‌های نیروی انسانی و زمان، از توابع هدفی همچون بیشینه زمان تکمیل عملیات استفاده کرد. مسئله در حالت کلی این‌گونه تعریف می‌شود که تعمیرات و اورهال تجهیزات به چه صورتی زمان‌بندی می‌شود. در صورتی که اورهال تجهیزات به‌موقع و به‌درستی زمان‌بندی

شود، می‌تواند در مسیر ایجاد بیشترین ارزش از دارایی‌های فیزیکی به مجموعه کمک کند؛ بنابراین در این تحقیق به دنبال زمان‌بندی درست و به‌موقع اورهال و تعمیرات تجهیزات هستیم، به‌طوری‌که حداکثر بهره‌وری در فرآیند مدنظر حاصل و درنهایت به آمادگی سیستم‌های مربوطه منجر شود.

در قرن حاضر سازمان‌ها با محیطی بسیار ناپایدار و پویا در حال فعالیت‌اند و همواره با خطرات و تهدیدهایی روبه‌رو می‌شوند که در صورت پاسخ‌ندادن به‌موقع و سریع، بدون تردید با چالش‌های بسیار مهمی مواجه خواهند شد. با توجه به اینکه مدت‌زمان استفاده از تجهیزات نظامی، بیشتر از وسایل تجاری است و تغییرات در آن معمولاً در زمان بیشتری اتفاق می‌افتد، یکی از این عوامل کلیدی در به‌کارگیری تجهیزات، بحث اورهال و بهینه‌کردن است که در سال‌های اخیر، بیشتر مدیران، سازمان‌ها و فرماندهان به آن توجه کرده‌اند و با توجه به این شرایط، زمان‌بندی اورهال، تعمیرات و وسایل و تجهیزات، می‌تواند نقش بسزایی در حوضه صنایع دفاعی و نظامی داشته باشد. هر موقع که هرکدام از وسایل و تجهیزات به تعمیرات اساسی و بهینه‌سازی نیاز دارد، به مراکز اورهال و بهینه‌سازی ارسال و به همان نسبت، از آمادگی و توان رزمی آن واحد کم می‌شود و با این وصف، هرگونه سرعت و چابکی به تقویت مجدد توان و آمادگی آن واحد کمک می‌کند (بهرامی و همکاران،^۷ ۱۳۹۶).

میزان آمادگی می‌تواند معیاری برای تخصیص بودجه، خرید تجهیزات، اقلام پشتیبانی و همچنین انجام اقدامات نظامی در زمان صلح یا جنگ باشد. آمادگی تجهیزات یکی از مؤلفه‌های اساسی در آمادگی عملیاتی سازمان‌ها و هدف اصلی سیستم نگهداری، تعمیرات (نت) و فلسفه وجودی آن در فرآیند پشتیبانی آنهاست (رمضانی و همکاران،^۸ ۱۳۹۰).

در این مقاله ما یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی را به‌منظور کاهش هزینه و زمان اورهال تجهیزات ارائه داده‌ایم که این مسئله در جلوگیری از تعمیرات اضافی، تشخیص و پیشگویی معایب، قبل از خرابی و کاهش ضایعات کاربرد دارد (خدابخشیان و همکاران،^۹ ۱۳۸۷). یکی از مهم‌ترین عوامل دفاعی هر کشور، تجهیزات نظامی آن است. از جمله ضرورت‌های ارائه‌شده در این تحقیق، آماده نگه داشتن تجهیزات و در اختیار داشتن حداکثر توان مقابله با نیروهای غیرخودی در زمان نیاز است. اهمیت این مسئله مربوط به زمانی است که حفاظت از کشور و جان افراد در میان باشد و کاربرد آن در مواقع صلح، برای حفظ امنیت و در مواقع جنگ، به‌منظور تسریع در آماده‌سازی تجهیزات است.

در راستای افزایش توان دفاعی، آماده‌سازی و در دسترس بودن تجهیزات نظامی برای استفاده در مواقع اضطراری تعمیرات و اورهال تجهیزات انجام می‌شود. در صورت روبه‌روشدن با تهدیدات احتمالی، امکان به‌کارگیری تجهیزات در زمان نیاز، وجود خواهد داشت. همچنین زمان‌بندی انجام اورهال و بهینه‌سازی مناسب، دقیق، با قابلیت اطمینان بالا و با کیفیت، می‌تواند باعث افزایش اعتماد کارکنان و سازمان به سیستم تعمیرات و اورهال داخلی و در نتیجه افزایش روحیه و اعتماد به‌نفس پرسنل فنی شود که این خود باعث نوعی وابستگی‌نداشتن به عوامل خارجی می‌شود. همچنین زمان‌بندی انجام تعمیرات، اورهال و بهینه‌سازی باکیفیت و قابلیت اعتماد بالا، باعث جلوگیری از دوباره‌کاری و عودت مجدد تجهیزات و ادوات بازسازی‌شده به مراکز می‌شود و می‌تواند در کاهش هزینه و وقت پرسنل سازمان مؤثر باشد.

با توجه به موارد مطرح شده، هدف از ارائه این مقاله، برنامه‌ریزی منظم برای اورهال تجهیزات به منظور جلوگیری از ایجاد وقفه در فعالیت‌هایی است که یک سازمان انجام می‌دهد؛ به نحوی که کمترین مشکل برای به‌کارگیری تجهیزات وجود داشته باشد. حال برای انجام تعمیرات، به‌روزرسانی و اورهال تجهیزات، از یک سیستم منظم استفاده و طی یک فرآیند مشخص، عملیات اورهال انجام می‌شود. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی این سیستم، از جهت تسریع در انجام فرآیند اورهال بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی سه مرحله‌ای، برای اورهال تجهیزات ارائه شده است؛ به طوری که در مراحل اول و دوم یک ماشین و در مرحله سوم، ماشین‌های موازی وجود دارند. نوآوری‌های مسئله شامل موارد زیر است: در نظر گرفتن جریان کارگاهی سه مرحله‌ای برای اورهال تجهیزات، ارائه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته جدید، در نظر گرفتن ماشین‌های موازی یکسان در مرحله سوم مسئله جریان کارگاهی، در نظر گرفتن سیستم جریان کارگاهی به‌منظور اورهال تجهیزات و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ.

۲- پیشینه پژوهش و مبانی نظری

رمنی و استادچر^{۱۰} (۲۰۱۴) عملیات مربوط به نگهداری، تعمیر و اورهال^{۱۱} موتور هواپیما را بررسی کردند. با توجه به اینکه برنامه‌ریزی و عملیات تعمیر و نگهداری دشوار است، تمرکز تحقیق بر بهبود عملیات نگهداری، از طریق یافتن زمان‌بندی^{۱۲} مناسب برای عملیات کار کارگاهی^{۱۳}، در عملیات نگهداری و تعمیرات بوده است. آنها تأکید کردند که زمان‌بندی می‌تواند عملیات نگهداری را بهبود دهد، یک مدل شبیه‌سازی را ارائه و فرآیند نگهداری و تعمیرات را به ۳ مرحله مجزا تقسیم کردند که شامل عملیات دمونتاز، انجام تعمیرات و مونتاژ است.

چانگ و عبدالله (۲۰۱۴) یک مدل مدیریت عملیات را ارائه کردند که مفهوم توسعه پایدار را در فرآیند نگهداری و مدیریت در نگهداری، تعمیرات و اورهال یک کارخانه به کار می‌گیرد. نگهداری، تعمیرات و اورهال هواپیما برای عملیات هوایی بسیار مهم است. آنها چهار بررسی برای نگهداری و تعمیرات در نظر گرفتند که بررسی C و D به زمان بیشتر و هزینه بالاتری نسبت به بررسی‌های A و B نیاز دارد. به‌منظور افزایش رضایت مشتریان، بخش MRO شرکت باید بر تحویل، کیفیت، هزینه و انعطاف‌پذیری تمرکز کند.

هوانگ و همکاران^{۱۴} (۲۰۱۶) بر اساس مدل‌های چند اعتباری، یک بهینه‌سازی شبیه‌سازی را برای مسئله زمان‌بندی نگهداری، تعمیر و اورهال به وجود آوردند و نیز یک مدل شبیه‌سازی را با درجه اعتبار بالا ارائه دادند که احتمالی و زمان‌بر است؛ سپس فرآیند را به سه بخش تقسیم کردند: کارگاه دمونتاز، تعمیرات و مونتاژ. کارگاه تعمیرات شامل یک یا چند ماشین چندکاره با یک یا چند ماشین یکسان است.

مایتو و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۶) یک تحقیق را با هدف بهبود زمان‌بندی ماشین‌ها ارائه کردند؛ به طوری که مقدار پیشینه زمان تکمیل کارها در زمان‌بندی کار کارگاهی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک^{۱۶} کمینه می‌شود. همچنین برنامه‌ریزی جدیدی را برای انجام تعمیرات ماژول بخش سرد موتور انجام دادند.

حسینی^{۱۷} (۱۳۹۶) مسئله زمان‌بندی مونتاژ را در جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر دو مرحله‌ای، با خط اختصاصی تولیدکننده محصولات متنوع چنددوره‌ای در نظر گرفت. تابع هدف، مسئله پیشینه زمان تکمیل کارها و میانگین وزنی کل زمان‌های تأخیر است. مرحله اول شامل ماشین‌های اختصاصی در گام اول و یک ماشین در گام دوم و

مرحله دوم شامل دو گام تولید اختصاصی است. آنها یک مدل ریاضی و همچنین یک روش فراابتکاری مبتنی بر نقاط قوت پارتو و جست‌وجوی وسیع همسایگی انعطاف‌پذیر را ارائه کردند.

لیو و همکاران^{۱۸} (۲۰۱۷) یک مسئله زمان‌بندی را در کلاس سیستم‌های نگهداری، تعمیرات و اورهال ارائه کردند. آنها با در نظر گرفتن همه مشخصه‌های کلیدی از قبیل دمونتاژ، بازیابی غیرقطعی مواد، مسیریابی احتمالی و زمان‌های پردازش احتمالی، یک مسئله زمان‌بندی را به‌عنوان یک مسئله شبیه‌سازی فرموله کردند و برای حل مسئله، دو الگوریتم ترکیبی را ارائه دادند. مسئله برای یک مجموعه از کارها، عبارت است از: تعیین توالی کارها به‌منظور دمونتاژ در کارگاه دمونتاژ، تعیین توالی اجزا برای تعمیر در کارگاه تعمیرات و تعیین توالی کارها برای انجام عملیات مونتاژ در مرحله مونتاژ؛ به‌طوری که مجموع وزنی زمان‌های تأخیر کمینه شود.

بزرگ‌نژاد و همکاران^{۱۹} (۱۳۹۷)، مسئله یکپارچه زمان‌بندی کارها و نیروی انسانی را در محیط جریان کارگاهی ارائه دادند که در آن تعدادی نیروی انسانی با مهارت‌های مختلف، کارهای متفاوتی را با سرعت‌های مختلف انجام می‌دهند. تابع هدف مسئله، تعیین زمان‌بندی کارها در مراحل مختلف و تخصیص نیروی انسانی به این مراحل است؛ به‌گونه‌ای که بیشینه زمان تکمیل کارها حداقل شود. آنها همچنین یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح مختلط و یک الگوریتم فراابتکاری را از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌سازی تبرید ارائه کردند.

حسام و همکاران^{۲۰} (۱۳۹۸) مسئله زمان‌بندی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات را در یک سیستم تولیدی با ماشین‌های موازی غیر یکسان در نظر گرفتند، با فرض زمان‌های پردازش کنترل‌شدنی، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه را برای کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های توسعه، فشرده‌سازی زمان‌های پردازش، نگهداری و تعمیرات، حداکثر زمان تکمیل، دیرکردها و زودکردها ارائه کردند، برای حل مدل چندهدفه پیشنهادی، از رویکرد کلاسیک برنامه‌ریزی آرمانی چند انتخابی و برای حل نمونه مسائل در ابعاد متوسط و بزرگ، از ژنتیک مرتب‌سازی‌شده غیرغالب^{۲۱} استفاده کردند.

ترن و همکاران^{۲۲} (۲۰۱۹) الگوریتم هوش ازدحامی و بهینه‌سازی کلونی مورچگان^{۲۳} را به‌منظور حل مسئله زمان‌بندی فرآیندهای MRO، با دو تابع هدف بیشینه زمان تکمیل و مجموع زمان‌های تأخیر همه کارها ارائه دادند و سه مرحله برای فرآیند MRO در نظر گرفتند: همه اجزا در مرحله اول، بازرسی می‌شوند، در مرحله دوم زمان‌بندی عملیات تعمیرات است و در نهایت در مرحله سوم، عملیات آزادسازی انجام می‌شود.

لی و همکاران^{۲۴} (۲۰۲۰) یک روش بهینه‌سازی زمان‌بندی را برای نگهداری و تعمیرات منابع خدماتی در محصولات پیچیده ارائه کردند که این موضوع سبب بهبود رضایت مشتریان، بالابردن ارزش محصول و افزایش مزیت رقابتی می‌شود. آنها ابتدا مسئله زمان‌بندی را در منابع خدماتی تحلیل کردند، سپس یک مدل ریاضی را برای مسئله زمان‌بندی مربوطه ارائه دادند که شامل سه تابع هدف کمینه‌کردن زمان انتظار مشتریان، کاهش منابع مازاد و ماکزیم‌کردن شاخص هزینه عملکرد منابع است. در نهایت هر یک از سه تابع هدف براساس روش‌های ژنتیک بهبودیافته، روش بهینه‌سازی ضریب وزنی ترکیبی و روش NSGA-II تحلیل شده‌اند.

رحمان و همکاران^{۲۵} (۲۰۲۰) معتقدند که فرآیند MRO یک عمل به‌منظور کنترل، شناسایی و اطمینان از عمر یک تجهیز دفاعی است. اندونزی باید مفهوم MRO را در صنایع دفاعی در نظر داشته باشد. مسئله مربوطه عبارت است از: چگونگی تعیین وزن‌دهی و توسعه برنامه‌ریزی استراتژیک، برای نگهداری و تعمیرات اساسی کشتی‌های

جنگی به منظور پشتیبانی از آمادگی عملیات دریایی. هدف از تحقیق ارائه شده، ایجاد یک برنامه ریزی استراتژیک در توسعه MRO کشتی های جنگی، در پشتیبانی از آمادگی عملیات دریایی است.

گا و همکاران^۶ (۲۰۲۲) با توجه به نبود تطابق بین انواع و تعداد واحدهای تعمیرات و فعالیت های پشتیبانی در زمان جنگ، همراه با زمان بندی فعالیت های نگهداری تجهیزات، مسئله زمان بندی جریان کارگاهی انعطاف پذیر را در نظر گرفتند و مدل زمان بندی فعالیت های نگهداری تجهیزات را براساس گروه تعمیرات همراهی کننده ارائه کردند. بر پایه توانایی محدود و زمان تیم تعمیرات، مدل ارائه شده زمان بندی فعالیت های تیم تعمیرات را با هدف کمینه کردن زمان صرف شده برای تعمیرات در نظر گرفت.

به منظور بررسی و مقایسه پیشینه موضوع، خلاصه مقالات مطرح شده در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مقالات: ۱ مقاله ماشین های موازی، ۱ مقاله جریان کارگاهی، ۱ مقاله کار کارگاهی، ۴ مقاله کار کارگاهی دو مرحله ای، ۱ مقاله جریان کارگاهی دو مرحله ای، ۱ مقاله جریان کارگاهی انعطاف پذیر و ۲ مقاله جریان کارگاهی سه مرحله ای را ارائه دادند.

جدول ۱- خلاصه پیشینه مسئله

Table 1- Summary of problem literature

ردیف	نویسنده	مسئله
۱	رمنی و استادچر (۲۰۱۴)	کار کارگاهی دو مرحله ای
۲	چانگ و عبدالله (۲۰۱۴)	جریان کارگاهی سه مرحله ای
۳	هوانگ و همکاران (۲۰۱۶)	کار کارگاهی دو مرحله ای
۴	مایتو و همکاران (۲۰۱۶)	کار کارگاهی دو مرحله ای
۵	حسینی (۱۳۹۶)	جریان کارگاهی دو مرحله ای
۶	لیو و همکاران (۲۰۱۷)	کار کارگاهی دو مرحله ای
۷	بزرگنژاد و همکاران (۱۳۹۷)	جریان کارگاهی
۸	حسام و همکاران (۱۳۹۸)	ماشین های موازی
۹	ترن و همکاران (۲۰۱۹)	کار کارگاهی
۱۰	رحمان و همکاران (۲۰۲۰)	جریان کارگاهی سه مرحله ای
۱۱	گا و همکاران (۲۰۲۲)	کار کارگاهی انعطاف پذیر

با توجه به پیشینه بررسی شده، در این تحقیق یک مسئله زمان بندی جریان کارگاهی ترکیبی به منظور نگهداری، تعمیرات و اورهال تجهیزات در ارتش ارائه خواهد شد. در این مسئله، تجهیزات مدنظر برای زمان بندی تعمیرات و اورهال در یک جریان کارگاهی چند مرحله ای قرار می گیرند که مرحله اول آن دمونتاژ تجهیزات، مرحله دوم تعمیرات و اورهال و مرحله سوم مونتاژ است. مرحله سوم، ماشین های موازی در نظر گرفته شده است که با توجه به دانش ما از مسئله، تاکنون برای مسئله اورهال تجهیزات بررسی نشده است. در صنعت اورهال تجهیزات، مدل ارائه شده در این مقاله تاکنون بررسی نشده است. لیو (۲۰۱۷)، پیچیده ترین حالت را ارائه کرده و در مرحله دوم کار کارگاهی در نظر گرفته شده است؛ در صورتی که در مسئله ما و در مرحله سوم، ماشین های موازی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین اهم نوآوری مسئله مدنظر، به شرح ذیل است:

- ۱- ارائه یک مدل ریاضی جدید بر مبنای موقعیت پردازش کارها؛
- ۲- به‌کارگیری مسئله جریان کارگاهی ترکیبی برای اورهال تجهیزات؛
- ۳- به‌کارگیری ماشین‌های موازی در مرحله سوم مسئله اورهال تجهیزات.

۳- روش‌شناسی پژوهش

مسئله بررسی شده در این مقاله، یک مسئله جریان کارگاهی سه مرحله‌ای به‌منظور تعمیرات و اورهال تجهیزات است. در این مسئله تعداد n تجهیز برای انجام عملیات اورهال، در یک جریان کارگاهی سه مرحله‌ای پردازش می‌شود که در مرحله سوم آن تعداد m ایستگاه وجود دارد. اگر تجهیزات به‌عنوان کار و هر مرحله نیز همانند یک ماشین در نظر گرفته شود، مسئله مورد بررسی، یک مسئله جریان کارگاهی سه مرحله‌ای است که در مراحل اول و دوم، یک ماشین و در مرحله سوم، ماشین‌های موازی یکسان وجود دارد. توابع هدف مختلف، معانی متفاوتی در مسائل زمان‌بندی دارند. در این مقاله تابع هدف، بیشینه زمان تکمیل کارها در نظر گرفته شده است. این تابع هدف برای حالتی کاربرد دارد که تجهیزاتی به‌منظور اورهال برنامه‌ریزی می‌شوند که به‌صورت دسته‌ای، به مراکز مختلف مربوط‌اند. در این حالت برای کاهش زمان تکمیل کل کارها، بیشترین زمان تکمیل، کمینه می‌شود و تجهیزات اورهال‌شده مربوط به یک مرکز، به‌طور هم‌زمان، در زمان کمتری تحویل می‌شوند.

۳-۱- فرضیات مدل

- مدل مسئله با در نظر گرفتن مفروضات زیر، ارائه شده است:
- تعداد مراحل ثابت و برابر با ۳ است؛
 - هر ماشین در هر مرحله، فقط در یک لحظه کاری را پردازش می‌کند؛
 - فضای انبارش بین مراحل، آزاد در نظر گرفته شده است؛
 - هر کار در یک زمان، فقط بر یک ماشین پردازش می‌شود؛
 - عملیات یک کار در هر مرحله، زمانی شروع می‌شود که عملیات آن در مرحله قبل به اتمام رسیده باشد؛
 - توالی پردازش کارها در مراحل اول و دوم یکسان در نظر گرفته شده است.

۳-۲- نمادگذاری

با توجه به توضیحات ذکرشده، مدل ریاضی مسئله به شرح زیر است:

اندیس‌ها

- | | |
|-----------|--|
| s | اندیس پوزیشن کارها $\{1, 2, \dots, n\}$ |
| r, j, i | اندیس کارها $\{1, 2, \dots, n\}$ |
| l | اندیس ماشین‌ها در مرحله سوم $\{1, 2, \dots, m\}$ |

پارامترها

n	تعداد کارها
m	تعداد ماشین‌های مرحله سوم
pf _j	زمان پردازش کار j در مرحله اول
ps _j	زمان پردازش کار j در مرحله دوم
pt _j	زمان پردازش کار j در مرحله سوم
A	یک عدد بسیار بزرگ

متغیرهای تصمیم

- $X_{i,s}$ اگر کار i در پوزیشن s در مرحله دومونتاژ پردازش شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.
- $Y_{i,s,l}$ اگر کار i در پوزیشن s بر ماشین l در مرحله مونتاژ پردازش شود، برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است.
- CF_s زمان تکمیل کار در پوزیشن s در مرحله اول
- CS_s زمان تکمیل کار در پوزیشن s در مرحله دوم
- $CT_{s,l}$ زمان تکمیل کار در پوزیشن s بر ماشین l در مرحله سوم

۳-۳- مدل ریاضی

با توجه به تعریف اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم، معادلات مدل ریاضی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Minimize } C_{max} \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^n X_{i,s} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i,s} = 1 \quad \forall s = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i,s-1} \geq \sum_{j=1}^n X_{j,s} \quad \forall s = 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^m Y_{i,s,l} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{i,s,l} \leq 1 \quad \forall s = 1, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{i,s-1,l} \geq \sum_{j=1}^n Y_{j,s,l} \quad \forall s = 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$CF_s \geq CF_{s-1} + \sum_{i=1}^n pf_i * X_{i,s} \quad \forall s = 2, \dots, n, \quad (8)$$

$$CF_1 \geq \sum_{i=1}^n pf_i * X_{i,1} \quad (9)$$

$$CS_1 \geq \sum_{i=1}^n ps_i * X_{i,1} \quad (10)$$

$$CS_s \geq CS_{s-1} + \sum_{i=1}^n ps_i * X_{i,s} \quad \forall s = 2, \dots, n \quad (11)$$

$$CS_s \geq CF_s + \sum_{i=1}^n ps_i * X_{i,s} \quad \forall s = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$CT_{s,l} \geq CT_{s-1,l} + \sum_{i=1}^n pt_i * Y_{i,s,l} - A * \left(1 - \sum_{i=1}^n Y_{i,s,l}\right) \quad \forall l = 1, 2, \dots, m; s = 2, \dots, n \quad (13)$$

$$CT_{s,l} \geq CS_r + pt_i * Y_{i,s,l} - A * (2 - Y_{i,s,l} - X_{i,r}) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n; s, r = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$C_{max} \geq CT_{s,l} \quad \forall s = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

$$X_{i,s} \in \{0, 1\}, Y_{i,s} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; s = 1, \dots, n \quad (16)$$

$$CF_s, CS_s, CT_{s,l} \geq 0 \quad \forall s = 1, \dots, n; l = 1, \dots, m \quad (17)$$

رابطه ۱ تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد که کمینه‌کردن بیشینه زمان تکمیل کارهاست. محدودیت ۲ نشان می‌دهد هر کار فقط به یک پوزیشن در مراحل اول و دوم تخصیص می‌یابد. محدودیت ۳ مشخص می‌کند که به هر پوزیشن در مراحل اول و دوم، حتماً یک کار تخصیص می‌یابد. محدودیت ۴ تعیین می‌کند که در مراحل اول و دوم، یک پوزیشن زمانی تکمیل می‌شود که پوزیشن قبلی آن، توسط یک کار اشغال شده باشد. محدودیت ۵ مشخص می‌کند که در مرحله سوم، هر کار را فقط یک ماشین پردازش می‌کند و امکان توقف در پردازش و جابه‌جایی بین ماشین‌ها وجود ندارد. محدودیت ۶ نشان می‌دهد به هر پوزیشن هر ماشین، حداکثر یک کار تخصیص می‌یابد. محدودیت ۷ مشخص می‌کند در مرحله سوم، یک پوزیشن زمانی تکمیل می‌شود که پوزیشن قبلی آن، توسط یک کار اشغال شده باشد. محدودیت ۸ نیز زمان تکمیل کارها را در مرحله اول مشخص می‌کند. محدودیت ۹ زمان تکمیل کاری را معین می‌کند که در اولین پوزیشن مرحله اول قرار دارد. محدودیت ۱۰ زمان تکمیل کار را در پوزیشن اول و در مرحله دوم مشخص می‌کند. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، ۱۳ و ۱۴، زمان تکمیل کارها را در مرحله دوم معین می‌کنند. محدودیت ۱۵ نشان می‌دهد بیشینه زمان تکمیل کار باید از زمان تکمیل هر یک از کارها بیشتر باشد. محدودیت ۱۶ متغیرهای باینری و محدودیت ۱۷، محدوده متغیرهای پیوسته را تعیین می‌کند.

۴- روش حل

به منظور حل مسئله در این بخش، از دو روش استفاده شده است: ۱- حل دقیق مسئله به وسیله الگوریتم شاخه و کران در ابعاد کوچک، با استفاده از نرم‌افزار گمز و ۲- حل مسئله در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

۴-۱- حل دقیق مسئله

حل مسئله در ابعاد کوچک با استفاده از مدل امکان‌پذیر است. در این مقاله، نتایج حل مدل به صورت دقیق و با استفاده از حل‌کننده سیپلکس در نرم‌افزار گمز بررسی شده است. مدل ارائه شده بر مبنای پوزیشن و به این صورت

است که پوزیشن کارها بر ماشین‌ها در هر مرحله مشخص می‌شود. جانسون^{۲۷} (۱۹۵۴) اثبات کرد که مسئله جریان کارگاهی سه مرحله‌ای، در صورتی که تابع هدف بیشینه زمان تکمیل کارها باشد ($F3/C_{max}$)، یکسان در نظر گرفتن توالی کارها در همه مراحل نیز، شامل جواب بهینه می‌شود و به تغییر توالی کارها در هر یک از مراحل، برای رسیدن به جواب بهینه نیازی نیست؛ بنابراین اگر تعداد ماشین‌ها در هر یک از مراحل برابر ۱ باشد، در نظر گرفتن یک متغیر برای مدل کافی است؛ مثلاً برای مراحل اول و دوم فقط یک متغیر در نظر گرفته شده است. به منظور کاهش تعداد متغیرهای مسئله و همچنین کاهش زمان حل، توالی پردازش کارها در مرحله دوم یکسان در نظر گرفته شده است. برای بررسی عملکرد مدل، شرط توقف اجرا ۳۶۰۰ ثانیه است و در صورتی که مدل قبل از این زمان به جواب بهینه برسد، اجرا متوقف می‌شود؛ در غیر این صورت، جواب به دست آمده تا این زمان (۳۶۰۰ ثانیه)، بهترین جواب مدل در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- الگوریتم ژنتیک

چن^{۲۸} (۱۹۹۵) برای مسئله جریان کارگاهی دو مرحله‌ای با ماشین‌های موازی در یک مرحله و تابع هدف بیشینه زمان تکمیل کارها، نشان داد مسئله با زمان چندجمله‌ای NP-سخت^{۲۹} است. با توجه به اینکه مسئله بررسی شده در این مقاله، جریان کارگاهی سه مرحله‌ای با ماشین‌های موازی در مرحله سوم و پیچیده‌تر از مسئله ارائه شده توسط چن (۱۹۹۵) است، بنابراین NP-سخت است. حل مسائل NP-سخت در ابعاد بزرگ، با توجه به محدودیت زمانی و ظرفیت پردازنده به صورت دقیق امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین به منظور دستیابی به جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه، از روش فراابتکاری استفاده شده است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله، با استفاده از نرم‌افزار جاوا استفاده شده است.

الگوریتم ژنتیک یکی از شناخته شده‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که اولین بار هلند^{۳۰} (۱۹۷۵) آن را ارائه کرد. این الگوریتم بر مبنای جمعیت^{۳۱} و الهام گرفته از طبیعت است. در جواب هر مسئله، یک کروموزوم شناخته می‌شود و از ترکیب ژن‌ها به وجود می‌آید. از طریق ایجاد تغییرات، در هر کروموزوم یک جواب جدید ایجاد می‌شود. الگوریتم ژنتیک شامل عملگرهای جهش و تقاطع به منظور ایجاد جمعیت جدید است. الگوریتم ارائه شده شامل چند قسمت است که عبارت‌اند از: ۱- ارائه نمایش جواب به منظور کدنویسی مسئله؛ ۲- رمزگشایی مسئله از نحوه نمایش در مرحله سوم ۳- ایجاد جمعیت اولیه به میزان N_{pop} ؛ ۴- انتخاب تصادفی جواب‌ها از جمعیت موجود، به منظور انجام عملیات تقاطع با احتمال P_{cr} ؛ ۵- انتخاب تصادفی جواب‌ها برای انجام عملیات جهش با احتمال P_{mt} در این مقاله، یک الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. در ادامه، مراحل الگوریتم تا تولید جواب جدید شرح داده شده است.

۴-۲-۱- نمایش جواب

هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک با استفاده از یک نحوه نمایش در کدنویسی مشخص می‌شود. با فرض اینکه تعداد ۶ کار وجود داشته باشد، نمایش جواب در الگوریتم ژنتیک ارائه شده در این مقاله، مطابق شکل ۱ و براساس توالی پردازش کارهاست. در این نمایش، جواب توالی پردازش کارها در مرحله اول مشخص می‌شود. در مرحله سوم با توجه به اینکه ماشین‌های موازی وجود دارند، توالی پردازش بر هر ماشین با استفاده از رمزگشایی مشخص می‌شود.

۴	۳	۵	۲	۱	۶
---	---	---	---	---	---

شکل ۱- نمایش جواب

Fig. 1- Solution representation

۴-۲-۲- رمزگشایی

پس از تعیین توالی کارها در مراحل اول و دوم، با توجه به اینکه مرحله سوم شامل ماشین‌های موازی است، توالی پردازش کارها متفاوت خواهد بود. به این منظور، بعد از اتمام پردازش یک کار در مرحله دوم، در مرحله سوم کار بر ماشینی پردازش می‌شود که آزاد باشد و یا زودتر از ماشین‌های دیگر آزاد شود.

۴-۲-۳- جمعیت اولیه

به منظور اجرای الگوریتم ژنتیک، باید یک جمعیت اولیه از جواب‌ها به اندازه Npp ، ایجاد و با اعمال تغییرات در هر جواب، جمعیت جدید تولید شود. با توجه به نمایش جواب ارائه شده در بخش قبل، جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید و پس از انجام تغییرات لازم، در هر تکرار به روزرسانی می‌شود.

۴-۲-۴- عملگر تقاطع

به منظور ایجاد جمعیت جدید و بهبود جواب‌ها، عملگر تقاطع در الگوریتم ژنتیک، بر دو جواب اعمال می‌شود که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. برای انجام تقاطع، در این بخش از عملگر تقاطع دو نقطه‌ای استفاده شده است. در این عملگر، دو نقطه به صورت تصادفی بر والدین انتخاب می‌شود. اعداد بین این دو نقطه از والد اول به فرزند دوم و از والد دوم به فرزند اول منتقل می‌شود. برای پرکردن بقیه پوزیشن‌ها در فرزند اول، از والد اول استفاده می‌کنیم.

در صورتی که عدد انتخاب شده بین دو نقطه نباشد، جایگاه پر می‌شود و اگر وجود داشته باشد، عدد بعدی انتخاب می‌شود. یک مثال از این نوع تقاطع در شکل ۲ نشان داده شده است. عملگر تقاطع در الگوریتم ارائه شده با احتمال P_C ، بر یک جواب انجام می‌شود.

والد ۱	۵	۱	۳	۲	۶	۴
والد ۲	۳	۲	۴	۱	۵	۶
فرزند ۱				۱	۵	
فرزند ۲				۲	۶	
فرزند ۱	۳	۲	۶	۱	۵	۴
فرزند ۲	۳	۴	۱	۲	۶	۵

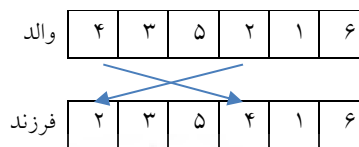
شکل ۲- عملیات تقاطع

Fig. 2- Crossover operation

۴-۲-۵- عملگر جهش

به منظور ایجاد تغییرات جزئی در هر جواب، الگوریتم ژنتیک از عملگر جهش استفاده می‌کند. این عملگر در الگوریتم ژنتیک، با اعمال تغییرات در هر جواب، باعث تولید جواب جدید می‌شود. اگر جواب جدید نسبت به جواب قبلی بهتر باشد، جایگزین آن می‌شود و در غیر این صورت، جواب قبلی بدون تغییر باقی می‌ماند. نویسندگان، حالت‌های گوناگونی را برای انجام جهش مختلف ارائه کرده‌اند. در این مقاله از جهش تعویض^{۳۲} برای جهش استفاده شده و در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این نوع جهش، دو ژن به صورت تصادفی انتخاب و با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند؛ برای مثال مطابق شکل ۳، ژن‌های موجود در سلول‌های ۱ و ۴ به صورت تصادفی انتخاب و با یکدیگر جابه‌جا شده‌اند؛ در نتیجه یک جواب جدید به دست آمده است. عملگر جهش در الگوریتم ارائه شده، با احتمال P_{mt} بر یک جواب انجام می‌شود.



شکل ۳- عملیات جهش

Fig. 3- Mutation operation

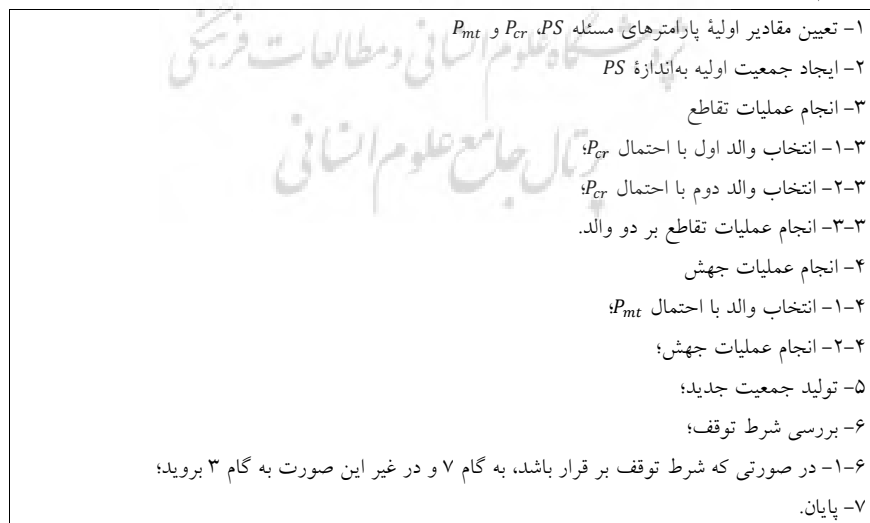
۴-۲-۶- به‌روزرسانی جواب‌ها

پس از انجام عملیات تقاطع و جهش، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. اگر جواب‌های به دست آمده بهتر از جواب فعلی باشد، جواب جدید جایگزین جواب فعلی می‌شود و در غیر این صورت، جواب بدون تغییر باقی می‌ماند.

۴-۲-۷- شرط توقف

به منظور توقف اجرای الگوریتم، از محدودیت زمانی ۶۰۰ ثانیه استفاده شده است.

شبه کد الگوریتم GA به کار گرفته شده، مطابق شکل ۴ است.



شکل ۴- شبه کد الگوریتم GA

Fig. 4- Pseudo code of GA algorithm

۵- یافته‌ها

در این بخش نتایج محاسبات ارائه و مدل مدنظر، در نرم‌افزار گمز^{۳۳} اجرا شده است. همچنین محاسبات برای سایز بزرگ و با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم برابر $PS = 70$ ، $P_{Cr} = 0.7$ و $P_{mt} = 0.1$ این در نظر گرفته شده است. مقادیر مختلف پارامترها برای ایجاد نمونه‌های مختلف، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر مختلف پارامترها به منظور ایجاد سایزهای مختلف مسئله

Table 2- Different values of parameters in order to create different problem sizes

پارامتر	محدوده مقادیر پارامترها	
	سایز کوچک	سایز بزرگ
n	{۴,۵,۶,۷,۹,۱۱,۱۳,۱۵}	{۲۰,۲۵,۳۰,۳۵,۴۰}
m	{۱,۲,۳,۴}	{۱,۲,۳,۴,۵}
pf		U (۱,۱۰۰)
ps		U (۱,۱۰۰)
pt		U (۱,۱۰۰)

در بخش ۳ و در قسمت مفروضات مدل، فرض آخر توالی پردازش کارها در مراحل اول و دوم، یکسان در نظر گرفته شده است که با توجه به مقاله جانسون (۱۹۵۴) (ارائه‌شده در بخش ۴)، این فرض مشکلی در رسیدن به جواب بهینه ایجاد نمی‌کند. به همین منظور دو متغیر را به سبب تعیین توالی پردازش کارها در نظر گرفته‌ایم. یک متغیر برای تعیین توالی کارها در مراحل اول و دوم و یک متغیر برای تعیین توالی کارها بر ماشین‌های موازی در مرحله سوم مشخص شده است.

۵-۱- مثال عددی

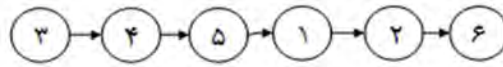
به منظور بررسی صحت عملکرد مدل و همچنین تأثیر وجود ماشین‌های موازی در مرحله سوم، یک مثال با تعداد ۶ کار، ۱ و ۲ ماشین در مرحله سوم در نظر گرفته شده است. زمان‌های پردازش کارها مطابق جدول ۳ است.

جدول ۳- زمان‌های پردازش کارها

Table 3- Job processing times

کار	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳
۱	۹۳	۶۳	۸۶
۲	۹۳	۷۰	۳۱
۳	۲۱	۲۹	۸۳
۴	۴۵	۳۹	۷۴
۵	۱۰	۲۴	۴۰
۶	۸۸	۲۷	۷۰

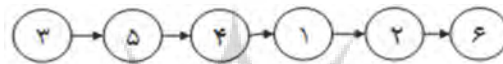
اگر تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم برابر ۱ باشد، مقدار تابع هدف برابر ۴۴۷ به دست می‌آید و در صورتی که تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم، برابر ۲ باشد، مقدار تابع هدف برابر ۴۳۷ است که مقدار آن به میزان ۱۰ واحد بهبود می‌یابد. در حالت اول، یعنی زمانی که تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم برابر ۱ باشد، توالی پردازش کارها مطابق شکل ۵ است.



شکل ۵- توالی پردازش کارها در حالت تک‌ماشینی

Fig. 5- job processing sequence in single machine mode

با توجه به اینکه در مدل ارائه شده، دو متغیر برای تعیین توالی کارها در مراحل اول، دوم و سوم در نظر گرفته شده است، برای مرحله سوم توالی کارها متفاوت است. توالی، مطابق شکل ۶ مشخص شده است که در این حالت نیز، مقدار تابع هدف برابر ۴۴۷ است؛ بنابراین ثابت در نظر گرفتن توالی پردازش کارها در سه مرحله با تابع هدف بیشینه زمان تکمیل کارها، تفاوتی در مقدار بهینه تابع هدف ندارد.



شکل ۶- توالی پردازش کارها در مرحله سوم حالت تک‌ماشینی

Fig. 6- Job processing sequence in the third stage of single machine mod

زمان‌های تکمیل کارها در سه مرحله برای تمامی کارها و براساس توالی به دست آمده، در جدول ۴ نشان داده شده است. زمان تکمیل مرحله سوم به‌عنوان زمان تکمیل هر کار در نظر گرفته می‌شود. بیشترین مقدار مربوط به کار ۶ است که مقدار زمان تکمیل آن برابر ۴۴۷ است و به‌صورت پررنگ نشان داده شده است.

جدول ۴- زمان‌های تکمیل کارها برای ۳ مرحله

Table 4- Job completion times for 3 stages

شماره کار	زمان‌های تکمیل		
	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳
۳	۲۱	۵۰	۱۳۳
۴	۶۶	۱۰۵	۲۰۷
۵	۷۶	۱۲۹	۲۴۷
۱	۱۶۹	۲۳۲	۳۳۳
۲	۲۶۲	۳۳۲	۳۶۴
۶	۳۵۰	۳۷۷	۴۴۷

چنانچه تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم برابر ۲ باشد، توالی به دست آمده برای کارها در مراحل اول و دوم، مطابق شکل ۷ است.



شکل ۷- توالی پردازش کارها در مراحل اول و دوم، با وجود ۲ ماشین در مرحله سوم

Fig. 7- The sequence of processing jobs in the first and second stages with the presence of 2 machines in the third stage

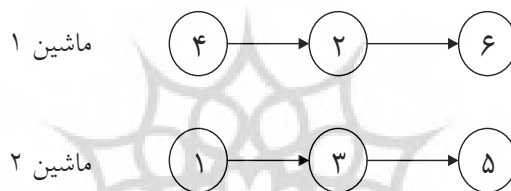
زمان‌های تکمیل کارها در مراحل اول و دوم در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- زمان‌های تکمیل کارها در مراحل ۱ و ۲

Table 5- The completion times of the jobs in stages 1 and 2

شماره کار	زمان‌های تکمیل	
	مرحله ۱	مرحله ۲
۳	۲۱	۵۰
۴	۶۶	۱۰۵
۱	۱۵۹	۲۲۲
۲	۲۵۲	۳۲۲
۶	۳۴۰	۳۶۷
۵	۳۵۰	۳۹۱

توالی پردازش کارها بر هر یک از ماشین‌های مرحله سوم در شکل ۸ مشخص شده است.



شکل ۸- توالی پردازش کارها بر هر یک از ماشین‌ها در مرحله سوم

Fig. 8- The sequence of processing jobs on each of the machines in the third stage

زمان‌های تکمیل کارها در مرحله ۳ در جدول ۶ نشان داده شده است. براساس این جدول، بیشینه زمان تکمیل

کارها مربوط به کار ۶، با مقدار تابع هدف ۴۳۷ است.

جدول ۶- زمان تکمیل کارها در مرحله سوم

Table 6- The job completion time in the third stage

شماره ماشین	شماره کار	زمان تکمیل
ماشین ۱	۴	۱۷۹
	۲	۳۵۳
	۶	۴۳۷
ماشین ۲	۱	۳۰۸
	۳	۳۹۱
	۵	۴۳۱

با توجه به مثال ارائه شده، علاوه بر صحت عملکرد مدل، تأثیر وجود ماشین‌های بیشتر در مرحله سوم نیز

مشخص شد. با افزایش تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم، مقدار تابع هدف بدتر نمی‌شود.

۵-۲- مقایسه نتایج سائز کوچک

به منظور بررسی و مقایسه نتایج گمز و الگوریتم ژنتیک، برای تعداد ۲۶ مسئله در سائزهای مختلف، مدل در نرم افزار گمز و همچنین الگوریتم ژنتیک اجرا شد که نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. حل در نرم افزار گمز با محدودیت زمانی ۳۶۰۰ ثانیه و برای الگوریتم ژنتیک، n ثانیه در نظر گرفته شده است. هر نمونه از الگوریتم ژنتیک نیز، ۵ بار اجرا شده است. برای مقایسه نتایج حل دقیق و الگوریتم ژنتیک، از شاخص میزان انحراف از بهترین^{۳۴} جواب، براساس رابطه ۱۸ استفاده شده است.

$$D = \frac{(S - B)}{B} * 100 \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، D میزان انحراف از بهترین جواب، S جواب الگوریتم و B بهترین جواب به دست آمده از ۵ بار اجرا و جواب گمز است. در جدول ۷، ستون CD^{۳۵} میزان انحراف جواب گمز از بهترین جواب مدل و الگوریتم ژنتیک و ستون «تابع هدف»، مقدار تابع هدف به دست آمده توسط گمز را نشان می دهد. ستون «زمان» حل گمز، «Min» مقدار کمینه انحراف از بهترین جواب، «Avr» میانگین انحراف از بهترین جواب، «Max» مقدار بیشینه انحراف از بهترین جواب و ستون «تابع هدف»، مقدار تابع هدف و ستون «زمان» نیز، زمان اجرای الگوریتم ژنتیک را نشان می دهد.

جدول ۷- مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک و حل دقیق برای سائز بزرگ مسئله

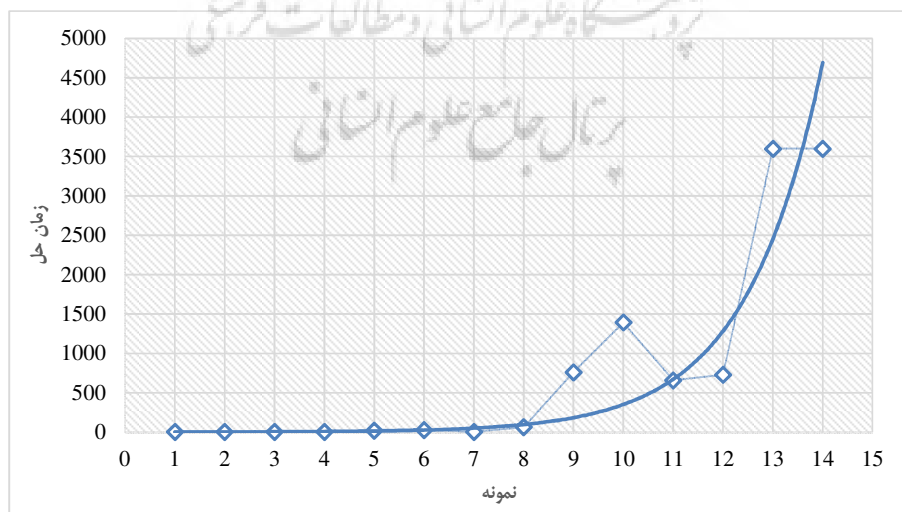
Table 7- Comparison of genetic algorithm results and exact solution for large size problem

نمونه	n	m	CD	گمز			ژنتیک			
				تابع هدف	زمان (ثانیه)	Min	Avr	Max	تابع هدف	زمان (ثانیه)
۱	۴	۲	۰,۰۰۰	۳۵۳	۱,۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۳۵۳	۴
۲	۵	۲	۰,۰۰۰	۳۶۳	۲,۹	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۳۶۳	۵
۳	۵	۳	۰,۰۰۰	۳۶۳	۴,۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۳۶۳	۵
۴	۶	۱	۰,۰۰۰	۴۴۷	۳,۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۴۷	۶
۵	۶	۲	۰,۰۰۰	۴۳۷	۱۶,۹	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۳۷	۶
۶	۶	۳	۰,۰۰۰	۴۳۷	۲۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۳۷	۶
۷	۷	۱	۰,۰۰۰	۴۵۰	۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۵۰	۷
۸	۷	۲	۰,۰۰۰	۴۴۰	۶۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۴۰	۷
۹	۷	۳	۰,۰۰۰	۴۴۰	۷۶۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۴۰	۷
۱۰	۷	۴	۰,۰۰۰	۴۴۰	۱۳۹۳	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴۴۰	۷
۱۱	۹	۱	۰,۰۰۰	۵۳۹	۶۵۷	۰,۰۰۰	۰,۰۷۴	۰,۱۱۷	۵۳۹	۹
۱۲	۹	۲	۰,۰۰۰	۵۲۵	۷۲۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۵۲۵	۹
۱۳	۹	۳	۰,۰۰۰	۵۲۵	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۵۲۵	۹
۱۴	۹	۴	۰,۰۰۰	۵۲۵	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۵۲۵	۹
۱۵	۱۱	۱	۰,۳۱۶ (OM)	۵۷۸	۱۲۱۱	۰,۰۰۰	۰,۰۴۷	۰,۰۹۹	۴۳۹	۱۱
۱۶	۱۱	۲	۰,۰۰۰	۵۶۲	۳۶۰۰	۰,۰۱۴	۰,۰۴۵	۰,۰۹۵	۵۷۰	۱۱
۱۷	۱۱	۳	۰,۰۰۰	۵۶۲	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۱۸	۰,۰۸۹	۵۶۲	۱۱
۱۸	۱۱	۴	۰,۰۰۰	۵۶۲	۳۶۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۲۷	۰,۰۴۶	۵۶۳	۱۱

نمونه	n	m	گمز				ژنتیک			
			CD	تابع هدف	زمان (ثانیه)	Min	Avr	Max	تابع هدف	زمان (ثانیه)
۱۹	۱۳	۱	(OM)۰,۳۰۴	۷۴۵	۵۵۹	۰,۰۰۰	۰,۰۲۷	۰,۰۵۹	۵۷۱	۱۳
۲۰	۱۳	۲	۰,۰۰۰	۷۲۷	۳۶۰۰	۰,۰۰۶	۰,۰۲۰	۰,۰۳۲	۷۳۱	۱۳
۲۱	۱۳	۳	۰,۰۰۸	۷۲۷	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۳۲	۰,۰۶۰	۷۲۷	۱۳
۲۲	۱۳	۴	۰,۰۰۵	۷۲۷	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۳۰	۰,۰۷۶	۷۲۷	۱۳
۲۳	۱۵	۱	(OM)۰,۴۱۷	۷۹۲	۷۸۲	۰,۰۰۰	۰,۰۶۱	۰,۰۸۹	۵۵۹	۱۵
۲۴	۱۵	۲	۰,۱۵۰	۷۷۱	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۳۲	۰,۱۲۵	۷۷۱	۱۵
۲۵	۱۵	۳	(OM)۰,۲۶۵	۷۷۱	۱۹۳۶	۰,۰۰۰	۰,۰۵۹	۰,۱۲۵	۶۰۹	۱۵
۲۶	۱۵	۴	۰,۰۶۵	۷۷۱	۳۶۰۰	۰,۰۰۰	۰,۰۵۸	۰,۱۰۹	۷۷۱	۱۵
میانگین			۰,۰۵۹	-	۱۶۹۸,۱	۰,۰۰۱	۰,۰۲۰	۰,۰۴۳	-	۹,۷

درباره نتایج گمز، همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش سایز، مسئله دسترسی به جواب بهینه کمتر شده است، محدودیت زمانی (۳۶۰۰ ثانیه) باعث توقف اجرا شده و بهترین جواب به دست آمده تا این زمان، ثبت شده است. این موضوع نشان‌دهنده پیچیدگی بالای مسئله ارائه‌شده در این مقاله است و NP-سخت مسئله، اثبات می‌شود. جواب‌های بهینه در جدول ۷، به صورت پررنگ نشان داده شده است و در صورتی که گمز، خطای حافظه^{۳۶} داشته باشد، با نشان OM در داخل پرانتز مشخص شده است. از تعداد ۲۶ سایز، مدل در تعداد ۴ سایز با خطای حافظه روبه‌رو شده است (که با علامت OM نشان داده شده‌اند). تعداد ۱۲ نمونه گمز، به جواب بهینه رسیده و در نهایت در تعداد ۱۰ نمونه، محدودیت زمانی باعث توقف اجرا شده است.

به‌منظور بررسی عملکرد گمز در حل دقیق مسئله، نمودار زمان حل مسئله برای ۱۴ سایز اول مطابق شکل ۹ رسم شده است. با توجه به اینکه برای سایزهای بزرگ‌تر، گمز در ۳۶۰۰ ثانیه متوقف شده و یا خطای حافظه رخ داده است، نمودار برای ۱۴ سایز اول رسم شده است.



شکل ۹- نمودار مقایسه زمان حل سیپلکس در سایزهای مختلف مسئله
 Fig. 9- Comparison of time to solve cplex in different problem sizes

همان طور که از شکل ۹ مشخص است، با افزایش سایز، مسئله زمان حل به صورت نمایی افزایش می یابد؛ بنابراین حل مسئله برای ابعاد بزرگ در زمان معقول امکان پذیر نیست و مسئله NP-سخت است. پس حل مسئله در ابعاد بزرگ، با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده در ۱۲ نمونه اول، حل دقیق به جواب بهینه رسیده و در ۱۱ نمونه، الگوریتم ژنتیک در هر ۵ بار اجرا، به جواب برابر با گمز رسیده است که اعتبار نتایج را نشان می دهد. در مقایسه با نتایج الگوریتم ژنتیک، میانگین زمان حل برای ۲۶ نمونه و برای حل دقیق، برابر ۱۶۹۸٫۱ و برای الگوریتم ژنتیک برابر ۹٫۷ است؛ این نشان دهنده کارایی الگوریتم ژنتیک است. در جدول ۷، ستون CD که به میانگین میزان انحراف نتایج مدل از بهترین جواب مربوط می شود، برابر ۰٫۰۵۹ است؛ در صورتی که برای الگوریتم ژنتیک در ستون Avr، برابر ۰٫۰۲ است، برای الگوریتم ژنتیک کمتر و نشان دهنده اثربخشی الگوریتم است.

۵-۳- مقایسه نتایج سایز بزرگ

پس از مشخص شدن عملکرد الگوریتم در سایز کوچک، مسئله در ۳۰ نمونه و در سایز بزرگ، با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. هر نمونه ۵ بار اجرا شده و میزان انحراف از بهترین جواب، با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه شده است.

جدول ۸- جدول ارزیابی نتایج الگوریتم ژنتیک برای سایز بزرگ مسئله

Table 8- Evaluation table of genetic algorithm results for large problem size

میزان انحراف			m	n	نمونه
Max	Avr	Min			
۰٫۰۳۴	۰٫۰۱۵	۰٫۰۰۰	۱	۲۰	۱
۰٫۰۲۸	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۰	۲	۲۰	۲
۰٫۰۲۷	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۰	۳	۲۰	۳
۰٫۰۳۵	۰٫۰۲۴	۰٫۰۰۰	۴	۲۰	۴
۰٫۱۲۸	۰٫۰۵۰	۰٫۰۰۰	۵	۲۰	۵
۰٫۰۴۴	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۰	۱	۲۵	۶
۰٫۰۴۴	۰٫۰۲۷	۰٫۰۰۰	۲	۲۵	۷
۰٫۰۶۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۰	۳	۲۵	۸
۰٫۰۳۱	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۰	۴	۲۵	۹
۰٫۰۸۶	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۰	۵	۲۵	۱۰
۰٫۰۲۴	۰٫۰۱۶	۰٫۰۰۰	۱	۳۰	۱۱
۰٫۰۵۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۰	۲	۳۰	۱۲
۰٫۰۲۶	۰٫۰۱۳	۰٫۰۰۰	۳	۳۰	۱۳
۰٫۰۳۷	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۰	۴	۳۰	۱۴
۰٫۰۷۸	۰٫۰۳۸	۰٫۰۰۰	۵	۳۰	۱۵
۰٫۰۵۰	۰٫۰۲۴	۰٫۰۰۰	۱	۳۵	۱۶
۰٫۰۳۴	۰٫۰۱۷	۰٫۰۰۰	۲	۳۵	۱۷
۰٫۰۵۵	۰٫۰۲۷	۰٫۰۰۰	۳	۳۵	۱۸
۰٫۰۲۱	۰٫۰۰۸	۰٫۰۰۰	۴	۳۵	۱۹

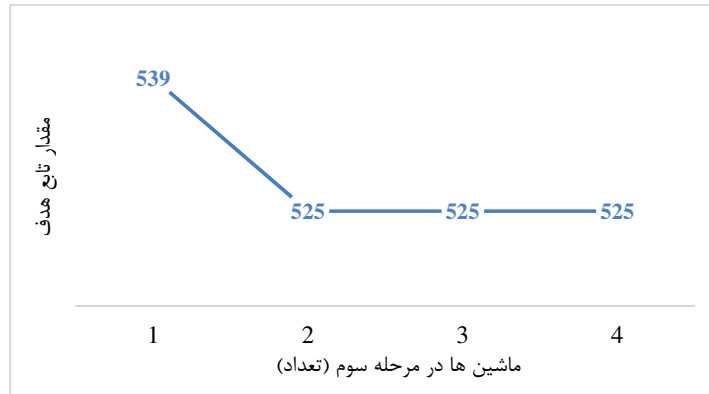
نمونه	n	m	میزان انحراف		
			Max	Avr	Min
۲۰	۳۵	۵	۰,۰۴۸	۰,۰۲۲	۰,۰۰۰
۲۱	۴۰	۱	۰,۰۲۸	۰,۰۱۴	۰,۰۰۰
۲۲	۴۰	۲	۰,۰۳۴	۰,۰۱۲	۰,۰۰۰
۲۳	۴۰	۳	۰,۰۲۴	۰,۰۱۰	۰,۰۰۰
۲۴	۴۰	۴	۰,۰۵۸	۰,۰۲۱	۰,۰۰۰
۲۵	۴۰	۵	۰,۰۱۳	۰,۰۰۷	۰,۰۰۰
۲۶	۴۵	۱	۰,۰۲۷	۰,۰۱۷	۰,۰۰۰
۲۷	۴۵	۲	۰,۰۱۵	۰,۰۰۶	۰,۰۰۰
۲۸	۴۵	۳	۰,۰۲۶	۰,۰۱۶	۰,۰۰۰
۲۹	۴۵	۴	۰,۰۴۷	۰,۰۲۵	۰,۰۰۰
۳۰	۴۵	۵	۰,۰۵۵	۰,۰۳۸	۰,۰۰۰
میانگین			۰,۰۴۳	۰,۰۲۰	۰,۰۰۰

در جدول ۸ مقادیر مینیمم، میانگین و ماکزیمم انحراف از بهترین جواب برای هر نمونه نشان داده شده است. مقدار میانگین انحراف، ۳۰ نمونه برابر ۰,۰۲ و با توجه به پایین بودن آن، نشان‌دهنده همگرایی الگوریتم ژنتیک است. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، مسئله بررسی شده در این مقاله، موضوع جریان کارگاهی سه مرحله‌ای با ماشین‌های موازی در مرحله سوم، برای اورهال تجهیزات است. دیدگاه مدیریت به‌منظور ایجاد یک فضا برای شروع یک فعالیت، کاهش هزینه، کسب درآمد و دستیابی به سود است. برای بررسی بینش مدیریتی درباره مسئله اورهال تجهیزات، به تعداد ماشین‌های مرحله سوم اشاره می‌شود. با توجه به حجم تجهیزات برای انجام اورهال بر آنها، تعداد ماشین‌های مرحله سوم تعیین می‌شود؛ به طوری که می‌توان ماشین‌های اضافه را به‌منظور کاهش هزینه حذف کرد و یا در حالت دیگر، اگر تجهیزات مربوط به مشتریان متفاوت باشند، برای کاهش هزینه‌های انبارش و یا افزایش رضایت مشتریان، اهداف متفاوت در نظر گرفته شود. در اینجا تابع هدف بیشینه زمان تکمیل کارها نیز به همین منظور مدنظر قرار گرفته شده است. چنانچه تجهیزات باید در یک زمان خاص در دسترس باشند، می‌توان اهدافی نظیر مجموع زمان تکمیل کارها را در نظر گرفت.

۶- بحث

به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف پارامترها در مقدار تابع هدف، مقدار تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف یک پارامتر، با ثابت در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای دیگر محاسبه شده است. برای سایزهای مختلف، به‌ویژه سایزهای بزرگ، با افزایش تعداد ماشین‌های مرحله سوم، مقدار تابع هدف بهبود می‌یابد. در این حالت برای کاهش هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، مناسب‌ترین تعداد ماشین، با توجه به اهداف تعیین شده توسط مدیریت مشخص می‌شود. با استفاده از تحلیل نتایج، مناسب‌ترین تعداد ماشین انتخاب می‌شود؛ برای مثال، برای تعداد ۹ کار مطابق شکل ۱۰، اگر تعداد ماشین‌های مرحله سوم برابر با ۱ باشد، مقدار تابع هدف ۵۳۹ است و برای ۲ ماشین، مقدار تابع هدف بهبود می‌یابد و برابر ۵۲۵ می‌شود. چنانچه تعداد ماشین‌ها برابر با ۳ یا ۴ باشد، مقدار تابع هدف

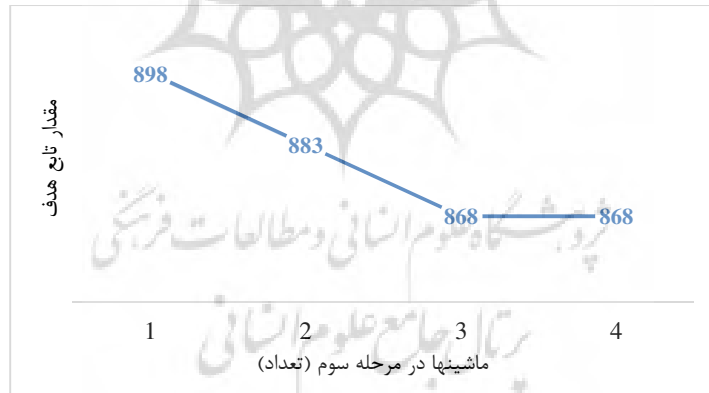
ثابت می‌ماند و بهبودی ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین به‌منظور کاهش هزینه می‌توان تعداد ماشین‌ها را برابر با ۲ در نظر گرفت.



شکل ۱۰- نمودار تأثیر مقادیر مختلف تابع هدف به‌ازای تعداد ۹ کار

Fig. 10- The effect of different values of the objective function for the number of 9 jobs

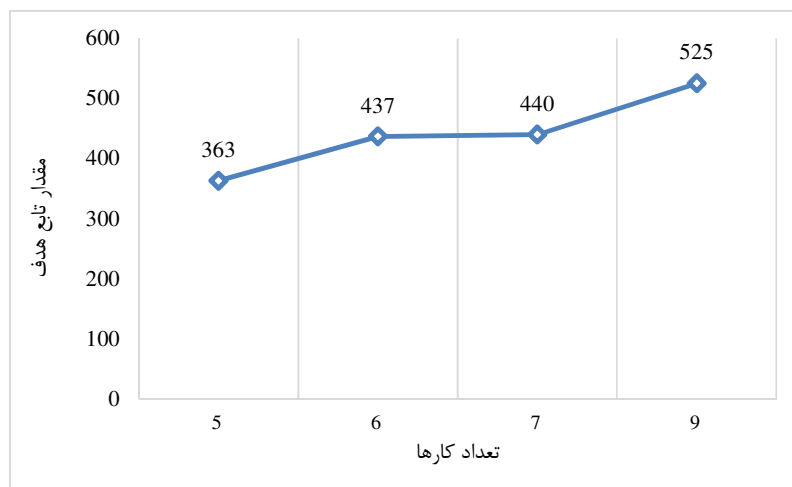
همچنین برای تعداد ۱۷ کار، مقادیر مختلف تابع هدف در مدت‌زمان اجرای ۳۶۰۰ ثانیه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش تعداد ماشین‌ها در مرحله سوم، مقدار تابع هدف تا تعداد ۳ ماشین بهبود می‌یابد، ولی در مقادیر ۳ و ۴ ثابت می‌ماند؛ به این معنی که می‌توان برای مدیریت هزینه، تعداد ۳ ماشین را برای مرحله سوم در نظر گرفت.



شکل ۱۱- نمودار تأثیر مقادیر مختلف تابع هدف به‌ازای تعداد ۱۷ کار

Fig. 11- The effect of different values of the objective function for the number of 17 jobs

برای بررسی تأثیر مقادیر مختلف کارها بر مقدار تابع هدف، برای تعداد ۲ ماشین در مرحله سوم، مقدار تابع هدف برای تعداد ۵، ۶، ۷ و ۹ کار، به ترتیب برابر ۳۶۳، ۴۳۷، ۴۴۰ و ۵۲۵ شده است که نمودار آن مطابق شکل ۱۲ است.



شکل ۱۲- نمودار تأثیر مقادیر مختلف تابع هدف به‌ازای تعداد مقادیر مختلف کارها و ۲ ماشین در مرحله سوم

Fig. 12. The impact of different values of the objective function for the number of different values of jobs and 2 machines in the third stage

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مسئله زمان‌بندی و تخصیص جریان کارگاهی برای اورهال تجهیزات در نظر گرفته شده است. در قسمت زمان‌بندی، توالی پردازش کارها در ماشین‌ها مشخص و در قسمت تخصیص، عملیات تخصیص کارها به ماشین‌ها انجام می‌شود. هدف انجام عملیات زمان‌بندی و تخصیص کارها به صورتی است که بیشینه زمان تکمیل کارها کمینه شود. یک مدل ریاضی برای این مسئله ارائه شد که براساس پوزیشن کارها و به این صورت است که هر کار به یک پوزیشن تخصیص می‌یابد و براساس پوزیشن مربوطه، پردازش می‌شود. به‌منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل ارائه‌شده، مثال‌های عددی ارائه شد. مدل مربوطه در نرم‌افزار گمز اجرا و نتایج آن بررسی، تجزیه و تحلیل شد. با توجه به NP-سخت بودن مسئله، حل آن برای مسائل با سایز بزرگ‌تر در زمان معقول (کمتر از ۳۶۰۰ ثانیه) امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین الگوریتم ژنتیک، حل مسئله در ابعاد بزرگ را انجام داده است. در راستای به‌کارگیری بینش مدیریتی در مسئله مورد بررسی در این مقاله و با توجه به اینکه هزینه‌های سرمایه‌گذاری و همچنین توان پاسخگویی به درخواست‌های متقاضیان با تعداد ماشین‌های مرحله سوم مرتبط است، مقدار تابع هدف براساس تعداد ماشین‌های مرحله سوم، تجزیه و تحلیل شده است. تأثیر مقادیر مختلف تعداد ماشین‌ها برای دو نمونه بررسی و تعداد بهینه ماشین‌ها به‌منظور دستیابی به بهترین مقدار تابع هدف مشخص شد. با توجه به مسئله ارائه‌شده، پیشنهادهایی برای تکمیل موضوع و یا در نظر گرفتن شرایط متفاوت به شرح زیر ارائه می‌شود: در نظر گرفتن ماشین‌های موازی در هر یک از مراحل، به‌کارگیری توابع هدف دیگر با توجه به شرایط مختلف و استفاده از الگوریتم‌های تقریبی دیگر به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تر.

References

- Bahrami, K., Karimi Gashkaraki, M., Kholjani, J. (2017). Identification of key factors for agility in the overhaul industry (overhaul) of Shahid Zarharan Nezaja Industries. *Amad Scientific Research*, 17(66), 103-120. (In Persian).
- Bozorgnejad, F., Asdi Gangraj, E., and Paydar, M. (2018). Development of meta-heuristic methods to solve the problem of manpower scheduling in the workshop flow environment. *Modeling in Engineering*, 16(54), 283-293. (In Persian). <https://doi.org/10.22075/jme.2017.11223.1087>
- Chang, H. M., & Abdullah, K. (2014). The Operation Management Model of Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Business. *International Journal of Trends in Economics Management & Technology (IJTEMT)*, 3(3), 21-28.
- Chen, B. (1995). Analysis of classes of heuristics for scheduling a two-stage flow shop with parallel machines at one stage. *Journal of the Operational Research Society*, 46(2), 234-244. <https://doi.org/10.1057/jors.1995.28>
- Guo, Y., Cao, J., Chen, C., & Zhang, C. (2022, July). Research on Task Scheduling of Emergency Repair Team in Wartime Based on Improved Genetic Algorithm. In *6th International Technical Conference on Advances in Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE 2021)* (pp. 897-906). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3927-3_87
- Hassani, A., (2017). A hybrid meta-heuristic algorithm for solving a robust dual-objective model of a two-stage flexible flow shop with a dedicated assembly line under uncertainty. *Modeling in Engineering*, 15(50), 25-47. (In Persian). <https://doi.org/10.22075/jme.2017.2741>
- Hessam, A., Emami, E., and Nemati Keshtali, R., (2019). Scheduling of maintenance and repair activities in the environment of unrelated parallel machines. *Modeling in Engineering*, 17(58), 233-247. (In Persian). <https://doi.org/10.22075/jme.2019.14959.1483>
- Holland, J (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, (53), 183.
- Huang, Z., Ding, J., Song, J., Shi, L., & Chen, C. H. (2016, March). Simulation optimization for the MRO scheduling problem based on multi-fidelity models. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1556-1561). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7474992>
- Johnson, S. M. (1954). Optimal two and three stage production schedules with setup times included. *Naval research logistics quarterly*, 1(1), 61-68. <https://doi.org/10.1002/nav.3800010110>
- Khodabakhshian Kargar, R., Shakeri, M., Baradaran Moti, J., (2007). Preventive net engineering and condition monitoring in road construction machines. *5th International Conference on Maintenance and Repairs*. (In Persian).
- Liu, P., Zhang, X., Shi, Z., & Huang, Z. (2017). Simulation optimization for mro systems operations. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 34(02), 1750003. <https://doi.org/10.1142/S0217595917500038>
- Li, H., Mi, S., Li, Q., Wen, X., Qiao, D., & Luo, G. (2020). A scheduling optimization method for maintenance, repair and operations service resources of complex products. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 1673-1691. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1400-4>
- Mayto, M. W., Suryadhini, P. P., & Astuti, M. D. (2016). Job Shop Scheduling at In-House Repair Department in Cold Section Module Ct7 Engine to Minimize Makespan Using Genetic Algorithm At Pt Xyz. *Telkom University, SI Industrial Engineering*, 17.04.089. 670
- Ramezani, S., Taheri, M., Yousefi, M., Nojavan, M., (2012). Designing a model to measure the readiness of military equipment, with a hierarchical approach. *Scientific Journal of Supply Chain Management*, 13(32). (In Persian).
- Reményi, C., & Staudacher, S. (2014). Systematic simulation based approach for the identification and implementation of a scheduling rule in the aircraft engine maintenance. *International Journal of Production Economics*, 147, 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.022>

- Tran, L. V., Huynh, B. H., & Akhtar, H. (2019). Ant colony optimization algorithm for maintenance, repair and overhaul scheduling optimization in the context of industrie 4.0. *Applied Sciences*, 9(22), 4815. <https://doi.org/10.3390/app9224815>
- Lenahan, T. (2011). *Turnaround, shutdown and outage management: Effective planning and step-by-step execution of planned maintenance operations*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6787-6.X5000-7>
- Rahman, A., Kuswoyo, A., Prabowo, A. R., & Suharyo, O. S. (2020). Developing strategy of maintenance, repair and overhaul of warships in support of navy operations readiness. *JOURNAL ASRO*, 11(2), 146-151. <https://doi.org/10.37875/asro.v11i2.277>

¹ Lenahan

² Chang & Abdullah

³ Major Maintenance

⁴ Rebuild

⁵ Swap Out

⁶ Flow shop

⁷ Bahrami et al.

⁸ Ramezani et al.

⁹ Khodabakhshian et al.

¹⁰ Reményi & Staudacher

¹¹ MRO (maintenance, repair and overhaul)

¹² scheduling

¹³ Job shop

¹⁴ Huang et al.

¹⁵ Maytoet al.

¹⁶ Genetic Algorithm (GA)

¹⁷ Hassani

¹⁸ Liu et al.

¹⁹ Bozorgnejad et al.

²⁰ Hessam et al.

²¹ Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

²² Tran et al.

²³ Ant Colony Optimization (ACO)

²⁴ Li et al.

²⁵ Rahman et al.

²⁶ Guo (2022)

²⁷ Johnson

²⁸ Chen

²⁹ Non-deterministic Polynomial-time hard (NP-hard)

³⁰ Holland

³¹ population based

³² Swap mutation

³³ GAMS

³⁴ Deviation

³⁵ Cplex Deviation

³⁶ Out of Memmory

