





## Flexible Job Shop Scheduling with Job Rejection Policy and Rate-Modifying Preventive Maintenance Activities

Mohammad Ali Nikouei\* 

Maghsoud Amiri\*\* 

Seyyed Mohammad Ali Khatami Firouz Abadi\*\*\* 

Mehdi Yazdani\*\*\*\* 

### Extended Abstract

**Introduction:** The flexible job shop system is one of the most widely used scheduling systems in production environments, consistently attracting researchers' attention due to its diverse applications. Many studies in this field assume fixed and predetermined processing times. However, processing times can increase due to the deterioration effect, and after implementing rate-modifying activities (RMA), these times return to their original values. This study examines the flexible job shop scheduling system, considering job rejection policies, dual resource constraints (human and machine), and RMA maintenance activities.

**Methods:** The objective of flexible job shop scheduling is to assign each operation to a machine and a worker from a set of eligible machines and workers in a way that optimizes the sequence of operations on the machines. A mathematical model based on the mixed-integer linear programming approach was developed for this purpose. Literature review classifies the problem with the stated assumptions as NP-hard, making the use of meta-heuristic methods essential for finding near-optimal solutions. Thus, Variable Neighborhood Search (VNS), Simulated Annealing (SA), and a combined VNS-SA algorithm were employed to solve the problem.

Received: Jun. 06, 2023; Revised: Apr. 07, 2024; Accepted: May. 28, 2024; Published Online: May. 31, 2024.

\* Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

\*\* Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Amiri@atu.ac.ir

\*\*\* Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

\*\*\*\* Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran



**Results and discussion:** Twenty sub-problems were analyzed, categorized into small, medium, and large-sized problems. The characteristics of each problem were defined by parameters such as the number of jobs, machines, workers, total operations, and buckets. Meta-heuristic methods, including VNS, SA, and their combination, were utilized to solve the problem. Seven neighborhood structures based on changes in assigned machines and workers, operation and job replacements, execution of RMA activities, and job acceptance/rejection were developed to enhance solution space exploration. The solution generation structure ensures feasibility within the flexible job shop system's requirements. The parameters of the meta-heuristic methods were tuned using the Taguchi method. Parameters related to the combined VNS-SA algorithm, such as initial temperature, number of neighborhood searches, and shake procedure counter, were reported. The results of the meta-heuristic methods were compared, and for small-sized problems, they were also compared with exact solutions.


**Conclusion:** The results of the twenty sub-problems solved using the three meta-heuristic approaches were compared statistically. The combined method of simulated annealing and variable neighborhood search showed superior performance in solving the problem.


**Keywords:** Deterioration Effect; Dual Resource Constraint; Flexible Job Shop; Job Rejection; Preventive Maintenance.


**How to Cite:** Nikouei, Mohammad Ali; Amiri, Maghsoud; Khatami Firouz Abadi, Seyyed Mohammad Ali; Yazdani, Mehdi (2024). Flexible Job Shop Scheduling with Job Rejection Policy and Rate-modifying Preventive Maintenance Activities. *Ind. Manag. Persp.*, 14(2), 154-180 (In Persian).




## زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با سیاست رد کارها و تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه

محمدعلی نیکوئی\* 

مقصود امیری\*\* 

سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی\*\*\* 

مهدی یزدانی\*\*\*\* 

### چکیده گسترده

**مقدمه و اهداف:** سیستم کار کارگاهی منعطف یکی از پرکاربردترین سیستم‌های زمان‌بندی، در محیط‌های تولیدی است که به علت کاربردهای متنوع در سیستم‌های تولیدی همواره موردتوجه پژوهشگران این حوزه بوده است. در تعداد زیادی از پژوهش‌های این حوزه فرض شده است که زمان‌های پردازش، مقداری ثابت و از پیش مشخص شده هستند. حال آنکه در شرایطی و بر اثر پدیده زوال، زمان‌های پردازش عملیات افزایش می‌یابند و پس از اجرای فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری با نام RMA، زمان‌های پردازش به زمان‌های نرمال اولیه کاهش می‌یابند. موضوع پژوهش حاضر، بررسی سیستم کار کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن سیاست رد کارها و منابع دوگانه محدود انسان - ماشین و پیاده‌سازی فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری RMA است.

**روش‌ها:** هدف از حل مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف، یافتن تخصیص هر عمل به یک ماشین و یک کارگر از میان مجموعه ماشین‌ها و کارگران قابل، به نحوی است که توالی عملیات بر روی ماشین‌آلات بهینه شود. برای این منظور یک مدل ریاضی بر اساس رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط منعطف توسعه داده شده است. مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مسئله با مفروضات فوق‌الذکر در زمره مسائل NP-hard رده‌بندی شده‌اند؛ بنابراین استفاده از روش‌های فراابتکاری برای دستیابی به جواب اجتناب‌ناپذیر است. برای این منظور از روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر، شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ترکیبی این دو برای حل مسئله استفاده شده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱.

\* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

\*\* استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: amiri@atu.ac.ir

\*\*\* استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

\*\*\*\* دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

**یافته‌ها:** در این پژوهش، ۲۰ زیرمسئله موردبررسی قرار گرفته است که بر اساس اندازه، به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ دسته‌بندی می‌شوند. ویژگی‌های هر مسئله موردبررسی بر اساس پارامترهایی نظیر تعداد کارها، تعداد ماشین‌آلات، تعداد کارگران، مجموع کل تعداد عمل‌های کارها و تعداد باکت‌ها مشخص شده است. برای حل این مسئله از روش‌های فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر، شبیه‌سازی تبرید و ترکیب این دو، استفاده شده است؛ همچنین هفت ساختار تولید همسایگی بر پایه تغییر در ماشین‌ها و کارگران تخصیص یافته به هر عمل، تعویض عمل‌ها و کارها، اجرا و یا عدم‌اجرای فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری RMA و درنهایت رد/پذیرش کارها ایجاد می‌شود. این ساختارهای همسایگی با هدف جست‌وجوی بهتر فضای جواب مسئله در روش‌های فراابتکاری، مورداستفاده قرار گرفته است. ساختار تولید جواب‌های جدید به‌صورتی است که ضمن مراعات الزامات سیستم کار کارگاهی منعطف، همواره جواب‌های موجه تولید می‌شود. پارامترهای روش‌های فراابتکاری با استفاده از روش تاگوچی تنظیم شده‌اند و به‌عنوان نمونه، پارامترهای مرتبط با روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبرید گزارش شده است که مشتمل بر پارامترهای دامی اولیه، تعداد جست‌وجوهای همسایگی و شمارنده تکرار حلقه ارتعاش است. در ادامه نتایج حاصل از اجرای روش‌های فراابتکاری مقایسه قرار گرفته و در خصوص مسائل کوچک، با مقدار جواب دقیق به‌دست‌آمده مقایسه شده است.

**نتیجه‌گیری:** در خاتمه، نتایج حاصل از حل ۲۰ زیرمسئله از طریق سه روش‌های فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر، شبیه‌سازی تبرید و روش ترکیبی این دو، با استفاده از روش‌های آماری مقایسه شده است و نتایج حاکی از آن است که روش ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی همسایگی متغیر، عملکرد بهتری در حل این مسئله داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** اثر زوال؛ فعالیت‌های تعمیر و نگهداری؛ کار کارگاهی منعطف سیاست رد کارها؛ منابع دوگانه محدود انسان - ماشین.

**استناددهی:** نیکوئی، محمدعلی؛ امیری، مقصود؛ خاتمی فیروزآبادی، سید محمدعلی؛ یزدانی، مهدی (۱۴۰۳). زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با سیاست رد کارها و تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۲)، ۱۵۴-۱۸۰.



## ۱. مقدمه

امروزه بقای سیستم‌های تولیدی در گرو انطباق‌پذیری بهتر آن‌ها با تحولات بازار و خواسته‌های مشتریان است و پیش‌روبودن در این موضوع از ارکان موفقیت سازمان‌های تولیدی شمرده شده است؛ از این‌رو کاربرد سیستم‌های انعطاف‌پذیر در تولید واجد اهمیت است [۱۲]. سیستم کار کارگاهی منعطف<sup>۱</sup> از پرکاربردترین سیستم‌های تولیدی است که حالت توسعه‌یافته‌ای از چیدمان کار کارگاهی است که در آن کارها بر روی ماشین‌آلات با حفظ ترتیبی خاص، پردازش می‌شوند. هر کار از چندین عمل، تشکیل شده است که مابین آن‌ها روابط پیش‌نیازی برقرار است [۲۲]. این سیستم، شکل توسعه‌یافته سیستم کار کارگاهی است و متشکل از دو زیرسیستم است که هدف از آن‌ها تخصیص عمل‌ها<sup>۲</sup> به ماشین‌های قابل و تعیین توالی کارها در این ماشین‌ها است. این در حالی است که حل زیرمسئله اول در چیدمان کار کارگاهی مطرح نیست؛ بنابراین کار کارگاهی منعطف دارای پیچیدگی بیشتری از کار کارگاهی است. ثابت شده است که سیستم کار کارگاهی منعطف در زمره مسائل NP-Hard دسته‌بندی می‌شود [۱۵]. در محیط‌های واقعی سیستم‌های تولیدی، محدودیت در استفاده از ماشین‌آلات و کارگران اجتناب‌ناپذیر است و در افق زمان‌بندی تولید، به دلایل مختلف استفاده از تجهیزات و نیروی انسانی با محدودیت دسترسی مواجه می‌شود. به دلایل گوناگون نظیر نیاز به تجربه و مهارت‌های موردنیاز، امکان پردازش تعدادی از عملیات به‌وسیله بعضی از کارگران امکان‌پذیر نیست. چنین سیستم‌هایی که در آن‌ها دسترسی به ماشین‌آلات و کارگران به‌صورت بالقوه، با محدودیت‌هایی در دسترسی مواجه است با نام «سیستم‌های با محدودیت دوگانه انسان-ماشین»<sup>۳</sup> نامگذاری شده‌اند.

در سیستم کار کارگاهی منعطف در حالت محدودیت دوگانه انسان - ماشین، موضوعات زیر مطرح است [۴۲]:

الف) اختصاص عمل‌ها به ماشین‌های قابل؛

ب) اختصاص عمل‌ها به کارگرهای قابل؛

پ) تعیین توالی عملیات بر روی ماشین‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های کارگران با هدف بهینه‌سازی معیارهای عملکردی نظیر کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها.

در دهه‌های اخیر در صنعت و در پژوهش‌های دانشگاهی به‌طور گسترده‌ای بر اهمیت سیاست رد کارها تأکید شده است. سازمان‌های تولیدی به دلایل متعددی نظیر وجود محدودیت در ظرفیت‌های تولیدی، با هدف ارائه خدمات به مطلوب‌ترین مشتریان و یا تمرکز بر روی قسمت‌های خاصی از بازار محصولات، از میان سفارش‌های دریافت‌شده تعدادی را برای تولید انتخاب می‌کنند و مابقی سفارش‌ها را رد می‌کنند [۳۰]. به‌کارگیری این سیاست‌ها با هدف ایجاد موازنه بین درآمد حاصل از پذیرش یک سفارش و هزینه‌های حاصل از تولید انجام می‌شود.

به‌طور کلی و در حالت عام، هر مؤسسه تولیدی مایل به پذیرش تمام سفارش‌های دریافتی است. برای نمونه، واحد فروش و ارتباط با مشتریان در شرکت‌های تولیدی علاقه‌مند به حداکثر ساختن پذیرش سفارش‌های دریافتی با هدف رضایت‌مندی مشتریان است. این در حالی است که بخش تولید درصد است تا به برنامه تولید و اهداف آن نظیر تحویل به‌موقع سفارش‌ها وفادار بماند. قبول و اجرای یک سفارش ممکن است موجب ایجاد تأخیر در سایر سفارش‌ها و ایجاد هزینه‌های دیرکرد در ارائه خدمات شود [۳۲]. تضاد در اهداف واحدهای یادشده، عامل ایجاد تأخیر در سفارش‌ها، دیرکرد و یا عدم‌استفاده بهینه از منابع و امکانات تولیدی خواهد بود؛ از این‌رو ضروری است فرآیندهای بررسی سفارش‌های دریافتی و زمان‌بندی تولید به‌صورت توأم و یکپارچه نظر گرفته شوند [۱۲].

در بیشتر مسائل زمان‌بندی تولید و توالی عملیات فرض شده است که زمان‌های پردازش عددی ثابت و از پیش تعیین‌شده است. این در حالی است که در شرایطی، فرض یادشده به دلایل متعدد پذیرفتنی نباشد. در برخی تجهیزات، به مرور زمان و به‌دلیل فرسودگی ماشین‌آلات، زمان‌های پردازش افزایش می‌یابند و به‌تبع آن، بهره‌وری ماشین‌آلات و نیروهای تولید به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. عامل دیگری که در این خصوص می‌توان برشمرد، خستگی اپراتورهای تولید است که بر زمان‌های پردازش مؤثر است؛ بنابراین با توجه به دلایل متعددی نظیر فرسودگی تجهیزات، خستگی اپراتورهای تولید، استفاده نادرست از ابزارآلات، توالی نامناسب کارها، خوردگی ابزار و یا ضایعات در حین تولید، زمان‌های پردازش عملیات از مقدار معمول اولیه بیشتر می‌شوند که در پیشینه پژوهش، این پدیده به نام «اثر زوال»<sup>۴</sup> شناخته شده است [۱۱]. به‌دلیل اثر زوال، به‌طور پیوسته، زمان پردازش عملیات افزایش می‌یابد.

1. Flexible Job Shop Scheduling system  
2. Operations  
3. Dual resource constraints environment  
4. Deterioration effect

در صورت اجرانشدن فعالیت‌های تعمیر و نگهداری بر روی تجهیزات و یا نبود استراحت کافی برای کارگران، انباشتگی خستگی و ناکارآمدی تجهیزات در افق تولید، قابل پیش‌بینی است؛ بنابراین به‌طور اجتناب‌ناپذیر، حداکثر زمان اتمام هر یک از کارها افزایش خواهد یافت. رفع «اثر زوال» حسب مورد، از طریق ایجاد وقفه در کار به‌منظور بازیابی جسمانی کارگران و یا اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری بر ماشین‌آلات امکان‌پذیر است [۲۹]. به فعالیت‌های تعمیر و نگهداری‌ای که موجب رفع اثر زوال و بازگشت زمان پردازش به زمان نرمال اولیه می‌شوند، «فعالیت‌های تعمیر و نگهداری RMA» گفته می‌شود. بر این اساس، زمان‌های پردازش بر اساس اینکه قبل و یا بعد از RMA باشند، تفاوت دارند؛ از این‌رو زمان‌های پردازش وابسته به فاصله زمان شروع عملیات تا نخستین RMA متفاوت خواهد شد.

موضوع این پژوهش، بررسی پدیده‌های «رد کارها بر اساس معیار تحویل در موعد مقرر» و «بررسی اثر زوال» در محیط کار کارگاهی منقطع با درنظرداشتن محدودیت‌های دوگانه انسان - ماشین است. به‌منظور حل این مسئله، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود. از طرفی ثابت شده است که این‌گونه مسائل در زمره مسائل NP-Hard رده‌بندی می‌شوند [۳۵]؛ بنابراین کاربرد روش‌های فراابتکاری در این مسائل اجتناب‌ناپذیر است.

در پژوهش حاضر از الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای بهینه‌سازی این مسئله استفاده شده است. برای ارزیابی صحت عملکرد روش مورد استفاده، از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با سایر روش‌ها استفاده می‌شود. بخش‌های پیش رو به شرح زیر است. در بخش دوم مروری بر مطالعات انجام‌شده در حوزه کار کارگاهی منقطع و سایر مفروضات ارائه‌شده، آورده شده است. در قسمت سوم، شرح مدل برنامه‌ریزی خطی به انضمام مفروضات مدل و حل یک مثال عددی مسئله مورد بررسی ارائه شده است. نتایج پژوهش و مقایسات آن در قسمت چهارم ذکر شده است. بخش پنجم به نتیجه‌گیری و مسیرهای مطالعات آتی اختصاص دارد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

زمان‌بندی تولید و توالی عملیات مبحث مهمی در موضوعات مهندسی صنایع است که همواره توجه پژوهشگران این حوزه را به خود جلب کرده است. منظور از زمان‌بندی، مشخص‌ساختن توالی زمانی کارها و تخصیص آن‌ها به منابع تولید اعم از ماشین‌آلات و اپراتورهای تولید با هدف برآورده‌سازی سفارش‌ها است [۴۰].

مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منقطع از معروف‌ترین مسائل زمان‌بندی است. در این سیستم تولیدی، تعداد  $n$  کار بر  $m$  ماشین با لحاظ‌کردن توالی معین برای هر کار اجرا می‌شوند. هر کار از تعدادی از عمل‌های مختلف تشکیل شده است. عمل‌های هر کار دارای توالی معینی هستند. هدف از پژوهش در محیط کار کارگاهی منقطع، تعیین زمان‌بندی شروع عمل‌ها و مشخص‌ساختن توالی آن‌ها بر تجهیزات با هدف کمینه‌سازی زمان تولید است.

یکی از موضوعات موردعلاقه تولیدکنندگان در سیستم‌های تولیدی برقرارکردن توازن بین سفارش‌های ورودی و منابع محدود تولید است؛ از این‌رو ضروری است با درنظرگرفتن بهینه‌سازی معیارهای عملکردی، به‌ناچار برخی از سفارش‌ها رد شوند؛ بنابراین در پذیرش سفارش‌ها باید زمان‌بندی کارها در نظر گرفته شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی مسئله زمان‌بندی و پذیرش سفارش در سیستم تولیدی کار کارگاهی منقطع با امکان رد کارها است. سفارش‌هایی که امکان تحویل در موعد مقرر را نداشته باشند، پذیرفته نمی‌شوند [۶]. درحقیقت پذیرش سفارش بر اساس میزان در دسترس بودن ظرفیت‌های کافی تولید و امکان پردازش کارها و تحویل تا پیش از موعد تحویل انجام می‌شود. عموماً فرآیند رد کار در خصوص شرایطی است که سیستم تولیدی با تقاضای بیش‌ازحد و نامنظم مواجه می‌شود. تصمیم به رد کارها می‌تواند در لحظه ورود هر سفارش و یا پس از ورود تعداد معینی از سفارش‌ها صورت گیرد [۴۴].

همان‌طور که گفته شد، به دلایل مختلف نظیر وجود نوسانات در تعداد سفارش‌ها و ثابت‌بودن ظرفیت‌های منابع تولید، پذیرش تمام سفارش‌های دریافتی برای یک سیستم تولیدی امکان‌پذیر نیست. گاهی پذیرش و تولید تمام سفارش‌ها موجب کاهش سود و بدتر از آن، موجب زیان و یا رویگردانی مشتریان خواهد شد؛ از این‌رو سیاست رد کار در محیط‌های تولیدی اجتناب‌ناپذیر است.

یکی از نخستین پژوهش‌ها در زمینه محدودیت دوگانه انسان - ماشین، توسط نلسون<sup>۱</sup> (۱۹۶۷) انجام شده است [۱۹]. محدودیت دوگانه انسان- ماشین موضوع جذابی است که در پژوهشی دیگر و در محیط کار کارگاهی منعطف، مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، کمیته‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها و مجموع تأخیرها است [۱۰].

صنعت ریخته‌گری، یکی از صنایعی است که با مصرف بالای حامل‌های انرژی همراه است، است. با هدف توازن خط تولید و لزوم توجه به توسعه پایدار دوستدار محیط‌زیست، پژوهشی انجام شده است که در آن، سیستم کار کارگاهی منعطف با محدودیت دوگانه انسان-ماشین مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، زمان‌های حمل‌ونقل به انضمام اثر یادگیری نیز بررسی شده است. هدف از پژوهش، کاهش مصرف انرژی است. برای حل این مسئله، مدل ریاضی چندهدفه‌ای ارائه شده و از روش فراابتکاری الگوریتم رقابت استعماری در حالت چندهدفه به همراه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شده است. هدف از کاربرد روش شبیه‌سازی تبرید غلبه بر همگرایی زودرس در الگوریتم رقابت استعماری است. چهار ساختار همسایگی متفاوت برای خروج از نقاط بهینه محلی و یافتن جواب مناسب‌تر ایجاد شده و مورد استفاده قرار گرفته است. کارایی الگوریتم با بررسی نتایج تأیید شد [۲۳].

در محیط‌های تولیدی، در صورت وقفه در تأمین منابع اولیه تولید، به‌ناچار سفارش‌ها بر اساس میزان اهمیت آن‌ها اولویت‌بندی می‌شود و سفارش‌های مهم‌تر پذیرفته می‌شوند. سان<sup>۲</sup> و همکاران، مسئله کار کارگاهی منعطف را در حالت اختلال در تأمین منابع تولید و اولویت‌بندی سفارش‌های دریافت‌شده، با هدف کاهش حداکثر زمان تکمیل کارها و کاهش زمان مجموع پردازش ماشین‌آلات مطالعه کردند. آن‌ها برای حل مسئله از روش دومرحله‌ای فراابتکاری الگوریتم مورچگان بهره گرفتند [۲۸].

یانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، مسئله کار کارگاهی منعطف را در حالت محصولات با ساختار چندسطحی بررسی کردند و روشی کارا برای کمیته‌سازی دیرکردها و حداکثر زمان تکمیل کارها ارائه دادند. عملکرد این روش، با روش‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و جست‌جوی همسایگی متغیر مقایسه شده است [۳۹].

برنامه‌ریزی منابع موردنیاز در تولید، توالی عملیات و تخصیص عملیات به ماشین‌آلات موضوعات مهمی در مبحث سیستم‌های تولیدی است. علاوه بر آن، عدم قطعیت نیز موضوع مهمی است که باید به آن توجهی ویژه کرد. صوفی و همکاران (۲۰۲۱)، اثر خرابی ماشین‌آلات و عدم قطعیت در تولید را در سیستم کار کارگاهی منعطف بررسی کردند. آن‌ها با توجه به ماهیت مسئله، از روش شبیه‌سازی احتمالی مبتنی بر سناریو بهره گرفتند؛ همچنین از مبحث نظریه فازی و قاعده امکان برای بیان زمان‌های پردازش فازی استفاده کردند. در این پژوهش از برنامه‌ریزی استوار فازی برای تحلیل و بررسی اختلالات به‌وجودآمده در کار و تحلیل ریسک‌های عملیاتی و زمان‌های پردازش غیرقطعی استفاده شده و برای غلبه بر پیچیدگی‌های محاسباتی مسئله، از روش‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات استفاده شده است [۲۷].

همان‌طور که ذکر شد، انجام فعالیت‌های تعمیر و نگهداری RMA بر روی ماشین‌آلات موجب برطرف‌شدن اثر زوال، کاهش زمان پردازش عملیات و بازگشت آن به زمان نرمال می‌شود. کیم<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، در سیستم تولیدی تک‌ماشینی پژوهشی انجام دادند که در آن، محصولات تولیدی به‌صورت دسته‌ای تولید شده‌اند. زمان پردازش هر دسته از محصولات، وابسته به زمان شروع پردازش و زمان آخرین RMA است. هدف از این پژوهش تعیین هم‌زمان تعداد دسته‌های تولیدی و تعداد فعالیت‌های RMA در افق تولید است؛ به‌نحوی که حداکثر زمان تکمیل کارها کمیته شود. بدین منظور یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده و از روش‌های فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده شده است [۱۳]. وو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، در چیدمان ماشین‌های موازی، اجرای فعالیت‌های RMA را بررسی کردند. هدف از این پژوهش، کمیته‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها بود. بدین منظور مدل ریاضی عدد صحیح مختلط توسعه داده شد. روش حل بدین صورت است که مسئله موردبررسی به چندین مسئله کوچک‌تر تقسیم شد که حل آن‌ها از طریق روش‌های شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک صورت گرفت [۳۵].

در پژوهشی دیگر و در سیستم تک‌ماشینی، اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری بررسی شده است. با اجرای این فعالیت‌ها معیارهای سنجش عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. مثالی از این معیارها، کاهش مجموع زمان‌های پردازش عملیات و یا مجموع کل دیرکردها است. این مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا حل شده است [۱۸]. اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری موجب ایجاد تأخیر در زمان

1. Nelson  
2. Sun  
3. Yang  
4. Kim  
5. Woo

شروع فعالیت‌ها می‌شود و از این طریق زمان اتمام کارها را طولانی‌تر می‌کند، از طرفی با کاهش زمان پردازش نقش مهمی در کاهش حداکثر زمان تکمیل کارها دارد؛ بنابراین بررسی توأم توالی عملیات و تعیین زمان اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری مابین آن‌ها ضروری است. لی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، اثر اجرای RMA را در چیدمان ماشین‌های موازی یکسان بررسی کردند. نتایج پژوهش به چیدمان ماشین‌های نامرتب<sup>۲</sup> نیز قابل‌تعمیم است [۱۴]. در پژوهش رنا و همکاران (۲۰۲۰)، تخصیص کارگران به کارها به‌وسیله نظریه بازی‌ها انجام شده است. چیدمان مورد مطالعه در این پژوهش، کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در شرایط محدودیت منابع دوگانه انسان-ماشین است. آن‌ها از الگوریتم گیل-شپلی<sup>۳</sup>، برای تشکیل یک زوج متشکل از یک کارگر و یک ماشین استفاده کردند. در ادامه از روش شبیه‌سازی برای ارزیابی و مقایسه نتایج مدل بهره‌گرفتند. هدف از این پژوهش، ارائه یک رویکرد جدید برای حل مسئله تخصیص کارگر در محیط‌های کارگاهی دارای محدودیت دوگانه است. روش ارائه‌شده، از نظر محاسباتی به‌راحتی قابل‌اجرا بوده و نتایج آن برای تصمیم‌گیری در بازه زمانی کوتاه‌مدت، اثربخش است [۲۴].

در پژوهش مارتینس<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۳)، هدف از پژوهش، ارائه الگوریتمی برای زمان‌بندی مؤثر آزمون‌های آزمایشگاهی شیمی زمینه کنترل کیفیت برای تولید داروها است. این مسئله به‌عنوان توسعه‌ای از یک مسئله زمان‌بندی کارگاه انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه برای تخصیص منابع ماشین‌ها و تحلیل‌گران برای فعالیت‌های آزمایشگاهی شیمی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی شده است. روش حل پیشنهادی متشکل از یک روش ابتکاری پویای سه‌سطحی بوده و در آن از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای مقایسه نتایج استفاده شده است. پارامترهایی که هر آزمایش را مشخص می‌کند، مشتمل بر تعداد کارها، تعداد ماشین‌آلات، تعداد اپراتورها و میزان انعطاف‌پذیری است. در این پژوهش، تعداد کارها برابر با ۵، ۱۰ و ۷۰ در نظر گرفته شده است. از نمونه‌های کوچک‌تر برای ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم ابتکاری در مقایسه با راه‌حل‌های بهینه به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است.

مسائل با تعداد ۱۰ کار، نمایانگر حجم کاری روزمره در یک آزمایشگاه کنترل کیفیت است. مسائل با ۷۰ کار، نشان‌دهنده روزهای پرکار آزمایشگاهی است. نتایج نشان می‌دهد که صحت روش ابتکاری ارائه‌شده با سایر روش‌ها برای نمونه‌های با اندازه متوسط قابل‌رقابت است و از سایر روش‌ها در خصوص نمونه‌های با اندازه بزرگ بهتر عمل کرده است؛ درحالی‌که روش ابتکاری در مدت‌زمان بسیار کوتاهی اجرا می‌شود و استفاده از آن را برای محیط واقعی مناسب کرده است [۱۶].

توسعه مدل ریاضی چندهدفه و الگوریتم تکاملی برای مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه با امکان انعطاف‌پذیری در توالی عملیات موضوع پژوهش ویتال سوتو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۳) است. مسئله مورد بررسی شامل زمان‌بندی کارها در چندین ماشین با زمان‌های پردازش و نیازهای منابع مختلف است. روش حل پیشنهادشده امکان اولویت‌بندی اهداف حداکثر زمان تکمیل کارها، زمان تحویل، تحویل به‌موقع و حجم کار کارگران را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌کند که می‌تواند به کاهش هزینه‌های مربوط به جریمه‌های تأخیر در تحویل و اضافه‌کاری کمک کند. مدل ریاضی توسعه‌یافته در این پژوهش، ماهیت چندهدفه را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات تجربی نشان داد که روش حل پیشنهادی می‌تواند برای تعریف یا به‌روزرسانی برنامه‌های روزانه با توجه به اولویت‌بندی‌ها استفاده شود. این روش، انعطاف‌پذیری بیشتری را در خصوص زمان‌بندی‌ها فراهم می‌کند. به کمک نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش هزینه‌های نیروی کار مرتبط با اضافه‌کاری، کاهش نارضایتی کارگران و افزایش بهره‌وری دست یافت؛ در نتیجه مدل ریاضی چندهدفه پیشنهادی و الگوریتم تکاملی، یک روش حل کارآمد برای مسئله کار کارگاهی منعطف با محدودیت دوگانه و با انعطاف‌پذیری توالی ارائه می‌کند [۳۳].

پژوهش ژانگ<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، مبتنی بر مدل کار کارگاهی منعطف و منابع دوگانه محدود با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل است که شاخصی مهم برای ارزیابی کارایی سیستم تولید به‌شمار می‌رود. ویژگی این پژوهش نسبت به سایر پژوهش‌ها، در تفاوت مهارت‌های اپراتورها است. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک کوانتومی برای حل استفاده شده است. باین‌حال، این مدل تقاضا و

1. Li  
2. Unrelated machines  
3. Gale-Shapley  
4. Martins  
5. Vital-Soto  
6. Zhang



سفارش‌های پویا را در نظر نگرفته است که می‌تواند موضوع پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده قرار گیرد. این پژوهش در یک شرکت تجهیزات لجستیک تولیدی صورت گرفته است [۴۱].

در ادامه، روش حل جدیدی برای مسئله کار کارگاهی منعطف و منابع دوگانه محدود بر مبنای کاربرد روش فراابتکاری بهینه‌سازی مگس میوه<sup>۱</sup> و حل مدل عدد صحیح مختلط ارائه شده است. تأکید این پژوهش بر ارائه روش حل جدید برای این مسئله است. اثربخشی این روش با مقایسه نتایج آن با الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر بررسی شد. تأثیر تنظیم پارامتر بر عملکرد روش حل و یافتن بهترین مقادیر پارامترها، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (۲۰۲۱)، بر مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با جست‌وجوی همسایگی متغیر بهتر عمل می‌کند [۴۳]. پژوهش‌ها و همکاران (۲۰۲۱)، بر مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت منابع دوگانه با در نظر داشتن زمان‌های بارگیری و تخلیه تمرکز دارد. در این پژوهش، مدل‌سازی مسئله در قالب مدل ریاضی چندهدفه با هدف به حداقل رساندن زمان تکمیل کارها و کل زمان راه‌اندازی انجام شده است و توسعه یک الگوریتم زمان‌بندی مؤثر که بتواند زمان اتمام کارها و کل زمان راه‌اندازی را به حداقل برساند، مدنظر قرار گرفته است. پژوهشگران یک الگوریتم زمان‌بندی مبتنی بر شباهت را برای کاهش زمان‌های راه‌اندازی و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای حل پیشنهاد کرده‌اند. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم تکاملی چندهدفه بر اساس تکامل تفاضلی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II از دیگر الگوریتم‌ها در همگرایی، توزیع و تنوع راه‌حل بهتر عمل کرده است و می‌تواند زمان‌های بارگیری و تخلیه را کمینه کند [۳۶].

آن و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه برای برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری در یک محیط کارگاه انعطاف‌پذیر را توسعه داده‌اند که این مدل، استراتژی پذیرش سفارش و یا رد کار و همچنین یک مدل تعمیر و نگهداری چندسطحی را در نظر گرفته است. پژوهشگران مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای برای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی تولید توسعه دادند. هدف این مدل کمینه‌سازی حداکثر زمان اتمام کارها، کاهش بی‌ثباتی در برنامه زمان‌بندی و به حداکثر رساندن سود کل بود. برای حل مسئله بهینه‌سازی، از یک الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مغلوب بهبودیافته با بردارهای مرجع تطبیقی استفاده شد. اثربخشی الگوریتم پیشنهادی از طریق تحلیل داخلی الگوریتم و مقایسه تجربی با پنج الگوریتم پیشرفته نشان داده شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی از نظر همگرایی و تنوع نسبت به سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل کرده است. پژوهشگران همچنین یک تحلیل حساسیت جامع را برای نشان‌دادن تأثیر چندین پارامتر کلیدی بر مدل بهینه‌سازی یکپارچه انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که مدل تعمیر و نگهداری پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی از مدل‌های موجود بهتر عمل می‌کند و استراتژی پذیرش سفارش/رد کار می‌تواند بخشی از انحرافات از برنامه زمان‌بندی تولید به دلیل اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری را مرتفع کند. به‌طور کلی این پژوهش یک چارچوب جامع برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری را در یک محیط کارگاه انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهد. مدل و الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به افزایش کارایی تولید کمک کند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش دهد [۲].

هدف از پژوهش دیگر آن و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی تولید، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای ابزارهای برش و کمینه‌سازی مصرف کل انرژی بود. آن‌ها یک استراتژی نگهداری پیشنهاد کردند که اثر زوال را در ابزارهای برش و به تبع آن افزایش زمان کارها بررسی می‌کند و پیاده‌سازی استراتژی تعمیر و نگهداری برای ابزارهای برش را با در نظر گرفتن سطوح قابلیت اطمینان در نظر می‌گیرد. در این مدل، مصرف کل انرژی مشتمل بر مصرف انرژی فرآیند برش، مصرف انرژی در حالت زمان بی‌کاری ماشین‌ها و مصرف انرژی حمل‌ونقل است. این مطالعه همچنین نشان داد که پارامترهای مختلف نرخ زوال، تأثیرات متفاوتی بر مدل بهینه‌سازی یکپارچه دارند. مدل و الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثر مصرف انرژی را کاهش دهد و شاخص‌های تولید با رویکرد محیط‌زیست را ارتقا بخشد [۳].

هدف از پژوهش تیان و همکاران (۲۰۲۳)، توسعه یک مدل زمان‌بندی صرفه‌جویی مصرف انرژی سیستم کار کارگاهی منعطف بود که کاهش مصرف انرژی ماشین‌ها را در نظر گرفته است. مدل پیشنهادی درصد بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید به‌منظور کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های تولید و درعین حال حفظ کارایی تولید است. پژوهشگران یک روش حل را با استفاده از الگوریتم NSGA-II برای حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهاد کردند. این مدل، توان ماشین‌کاری و عمر ابزار هر یک از تجهیزات را در کارگاه در مدل پژوهش در نظر گرفته است که پارامترهای آن از طریق آزمایش‌های تجربی به‌دست آمده‌اند. این پژوهش همچنین محدودیت‌های عملی مانند حمل‌ونقل، بستن و باز کردن گیره‌ها، مونتاز، خرابی‌های ناگهانی و ورود کارهای با قید فوریت را در مدل بهینه‌سازی ادغام کرده است. در

مدل‌سازی، تأثیر پدیده زوال در افزایش زمان‌های پردازش و تغییرات در مصرف انرژی به همراه رویکردهای صرفه‌جویی انرژی در تعویض ابزار برش و روشن/ خاموش کردن تجهیزات گنجانده شده است. اهداف این مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، به حداقل رساندن زمان اتمام کارها، کمینه‌سازی هزینه‌های مصرف انرژی، سایش ابزار و سایر هزینه‌های تولید است. الگوریتم حل مسئله، جواب‌های بهینه پارتو را تولید می‌کند و تصمیم‌گیرنده می‌تواند با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره جواب مناسب را انتخاب کند. نتایج مطالعه نشان داد که مدل و الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به‌طور مؤثر بین چهار مقدار هدف، توازن ایجاد کند؛ همچنین در این پژوهش، انرژی کل مصرفی نسبت به روش زمان‌بندی‌های گذشته بیش از ۱۰ درصد کاهش یافته است و هزینه‌های تولید نیز تا ۸ درصد کاهش داشته و در عین حال بازده تولید حفظ شده است [۳۱].

هدف از پژوهش یان و همکاران (۲۰۲۲)، بررسی و حل سیستم کار کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه از طریق رویکردهای یادگیری ماشین بود. آن‌ها یک چارچوب حل مبتنی بر روش یادگیری تقویتی را توسعه دادند تا از این طریق، رفتار سیستم در صورت بروز اختلالات نامشخص در روند تولید و اجرای فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری مطالعه شود. مدل ارائه‌شده، در چارچوب سیستم مبتنی بر درخت تصمیم است که تصمیم‌گیری در خصوص تولید و تعمیر و نگهداری را به‌صورت توأم در نظر گرفته است [۳۸].

هدف از پژوهش آن و همکاران (۲۰۲۳)، توسعه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه برنامه‌ریزی تولید و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه وابسته به شرایط، با در نظر گرفتن تأثیر عامل ضایعات ماشین‌آلات در یک کارگاه انعطاف‌پذیر بود. این مدل تأثیر ایجاد ضایعات در حین تولید بر زمان‌بندی را بررسی می‌کند و در آن، فرآیند تولید به مراحل مختلفی بر اساس بازه‌های تعمیرات و نگهداری تقسیم شده است. مدل مورد بررسی از راهبرد زمان‌بندی مجدد در محیط پویای تولید با مدنظر قراردادن موضوع بهره‌وری استفاده می‌کند [۱].

هدف از پژوهش غالب و همکاران (۲۰۲۱)، بررسی ادغام برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری بود. در این مطالعه یک طرح تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شد که در آن ماشین‌ها در معرض اثر زوال، خرابی‌های تصادفی، تعمیرات و تعمیرات و نگهداری هستند. هدف، کمینه‌سازی هزینه کل سیستم، از جمله هزینه تأخیرها و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری بود. مدل توسعه‌داده-شده ماهیتی پویا و احتمالی دارد. مدل یادشده برای تعیین برنامه‌های نگهداری بهینه مبتنی بر شرایط، به‌روزرسانی برنامه‌ها در هنگام ایجاد تأخیرات در برنامه و تعیین تخصیص‌های ماشین‌آلات و کارگران و همچنین توالی عملیات است. در نتایج حاصل از پیاده‌سازی مسئله، به‌طور متوسط حدود ۲۷ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌ها گزارش شد. نتایج همچنین بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده برای سناریوها و استراتژی‌های مختلف، سیاست‌های متعددی را برای هر یک از موضوعات جدید در این تحقیق پیشنهاد می‌کند. در این مدل، رویکردها و سیاست‌های کاری پیشنهادشده را می‌توان در یک مطالعه موردی در دنیای واقعی از صنعت برای تخمین عملکرد به‌کار برد [۸]. مروری بر مطالعات انجام‌شده در سیستم کار کارگاهی منعطف، با حداقل یکی از مفروضات این پژوهش در جدول ۱، آورده شده است. با توجه به این جدول، تاکنون پژوهشی دقیقاً مشابه پژوهش حاضر انجام نشده است که نمایانگر نوآوری این پژوهش است.

جدول ۱. مروری بر مطالعات پیشین در سیستم کار کارگاهی منعطف

| ارجاع مقاله | مفروضات مسئله |     |     | روش حل        |                | تایخ هدف               |         |
|-------------|---------------|-----|-----|---------------|----------------|------------------------|---------|
|             | رد کار        | RMA | DRC | سایر          | شبه‌سازی       | مدل‌سازی و فراابتنکاری | چندهدفه |
| [۲۴]        |               |     | ✓   | نظریه بازی‌ها |                |                        | ✓       |
| [۱۶]        |               |     | ✓   |               |                | TS                     |         |
| [۴۲]        |               |     | ✓   |               |                | IMA                    |         |
| [۳۳]        |               |     | ✓   |               |                | NSGAI                  | ✓       |
| [۳۹]        |               |     | ✓   |               |                | VNS, GA                | ✓       |
| [۴۱]        |               |     | ✓   |               |                | NSGAI                  | ✓       |
| [۴۳]        |               |     | ✓   |               |                | FOA                    | ✓       |
| [۳۶]        |               |     | ✓   |               |                | NSGAI                  | ✓       |
| [۴۴]        |               |     |     |               |                |                        | ✓       |
| [۲]         |               |     |     |               | انشعاب و تحدید |                        | ✓       |
| [۳]         |               | ✓   |     |               |                | NSGAI                  | ✓       |
|             |               |     |     |               |                | NSGA-III               | ✓       |

| ارجاع مقاله | مفروضات مسئله |     |     | روش حل |               | تابع هدف              |         |
|-------------|---------------|-----|-----|--------|---------------|-----------------------|---------|
|             | رد کار        | RMA | DRC | سایر   | شبیه‌سازی     | مدل‌سازی و فراابتکاری | چندهدفه |
| [۳۱]        |               | ✓   |     |        |               | NSGA-II               | ✓       |
| [۳۸]        |               |     | ✓   |        | یادگیری ماشین |                       | ✓       |
| [۱]         | ✓             |     |     |        |               | NSGAI                 | ✓       |
| [۸]         |               | ✓   |     |        | روش ابتکاری   |                       | ✓       |
|             |               | ✓   | ✓   |        |               | VNS,SA                | ✓       |

در این قسمت مروری بر پیشینه پژوهش سیستم تولیدی کار کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن محدودیت دوگانه انسان - ماشین ارائه شد. نوآوری این پژوهش در نظر گرفتن امکان ردک ارها بر اساس امکان تحویل در موعد مقرر و لحاظ کردن فعالیت‌های تعمیر و نگهداری RMA است. بنا به مطالعات انجام‌شده، تاکنون پژوهش مشابهی در سیستم کار کارگاهی منعطف با در نظر گرفتن سیاست رد کارها و اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری RMA و محدودیت دوگانه انسان - ماشین انجام نشده است که این موضوع نشان‌دهنده نوآوری موضوع پژوهش است. در بخش آتی، مدل‌سازی ریاضی مسئله به انضمام مفروضات مدل ارائه خواهد شد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**شرح مسئله.** در مسئله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با محدودیت دوگانه انسان-ماشین، تعداد  $n$  کار وجود دارد که بر روی  $m$  ماشین به‌وسیله  $l$  کارگر انجام می‌شود. مجموعه کارها، ماشین‌ها و کارگران به ترتیب به صورت  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$  و  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  نشان داده می‌شود. منابع تولید در این مسئله ماشین‌آلات و اپراتورهای تولید هستند. هر کار  $J_i$  از  $O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ini}$  عمل تشکیل شده است. هر عمل  $O_{ij}$  می‌تواند به‌وسیله یک ماشین و یک کارگر قابل از مجموعه ماشین‌ها و کارگران قابل  $M_{ij1}, M_{ij2}, \dots, M_{ijn}$  و  $W_{ij1}, W_{ij2}, \dots, W_{ijn}$  پردازش شود [۳۷]. منظور از  $M_{ijl}$  ماشینی است که می‌تواند عمل  $O_{ij}$  را به‌وسیله اپراتور  $l$  پردازش کند. منعطف‌بودن کارگران در سیستم تولیدی به دو صورت است: گروه اول کارگرانی هستند که به دلیل توانمندی و مهارت، امکان کار بر روی تمام ماشین‌ها را دارا هستند؛ ولی دسته دوم کارگرانی هستند که به دلایل مختلف، نظیر کمبود مهارت و آموزش، صرفاً امکان انجام کار بر روی تعدادی از ماشین‌ها را دارند. دسته‌بندی دوم به محیط واقعی سیستم‌های تولیدی نزدیک‌تر است. در این پژوهش از کارگران غیرهمگن، یعنی گروه دوم، استفاده شده است. بدیهی است، امکان دارد تعداد کارگرانی که می‌توانند بر روی یک ماشین خاص کار کنند با تعداد کارگران قابل یک ماشین دیگر، متفاوت باشند.

مفروضات مدل به شرح زیر است:

- هر کار متشکل از چندین عمل است که پردازش آن‌ها مستلزم توالی خاصی است؛
- هر کار دارای موعد تحویل توافق‌شده با مشتری است. در صورت عدم امکان تحویل محصول تا موعد زمانی مقرر، کار رد می‌شود؛
- از این رو دیرکرد امکان‌پذیر نیست، ولی زودکرد امکان‌پذیر است؛
- تمام کارها امکان پردازش از زمان صفر زمان‌بندی تولید را دارند؛
- تمام ماشین‌آلات از ابتدای زمان تولید، در دسترس هستند؛
- هر ماشین در هر لحظه، حداکثر امکان پردازش یک عمل را دارد؛
- هر کارگر در هر لحظه، حداکثر امکان پردازش یک عمل را دارد؛
- تخصیص عمل به ماشین و کارگر قابل تا اتمام کار برداشته نمی‌شود؛
- امکان توقف عمل‌ها یا بریدگی کارها وجود ندارد؛
- زمان پردازش هر عمل از دو بخش تشکیل شده است: زمان نرمال پردازش و زمان افزوده‌شده؛
- زمان نرمال پردازش هر عمل، مقداری معین و قطعی است؛

- زمان افزوده شده هر عمل، به فاصله زمان شروع آن عمل از نزدیک‌ترین بستگی RMA دارد. هر عملی که بلافاصله پس از RMA، قرار گرفته باشد، مقدار زمان پردازش افزوده آن برابر با صفر است؛ در غیر این صورت، میزان افزوده شده برابر با حاصل ضرب نرخ زوال<sup>۱</sup> که پارامتر ثابتی است، در فاصله زمانی شروع فعالیت تا نخستین RMA است؛

- هر پردازش، نیازمند هر دو منبع ماشین و اپراتور تولید است؛

- به دلایل فنی، حداکثر تعداد فعالیت‌های ممکن تعمیر و نگهداری RMA در سیستم تولیدی مقداری معلوم و معین است؛

- زمان‌های راه‌اندازی و جابه‌جایی بین تجهیزات در زمان پردازش نرمال هر عمل گنجانده شده است.

هدف از این مسئله، تخصیص هر عمل به یک ماشین و یک کارگر از میان تجهیزات و کارگران قابل است. در گام بعدی، توالی انجام عمل‌ها بر روی هر تجهیز مشخص می‌شود؛ به نحوی که حداکثر زمان تکمیل کارها کمینه شود. انعطاف‌پذیری این مسئله، ارتباط تنگاتنگی با انعطاف‌پذیری اپراتورهای تولید و ماشین‌آلات دارد. انعطاف‌پذیری مسئله در صورتی کامل است که تمام ماشین‌آلات و تمام کارگران توانایی پردازش عمل‌ها را داشته باشند؛ در غیر این صورت، انعطاف‌پذیری جزئی است.

**مدل‌سازی ریاضی.** بر اساس مفروضات بالا، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله کار کارگاهی منعطف با محدودیت دوگانه انسان - ماشین و امکان رد کارها بر اساس گذر از موعد تحویل ارائه شده است که در آن زمان‌های پردازش به فاصله زمان شروع از آخرین RMA وابسته است.

#### اندیس‌ها

i: اندیس کارها

j: اندیس عمل‌های کارها

k: اندیس ماشین‌ها

b: اندیس باکت‌ها

#### پارامترها

$d_i$ : موعد تحویل کار i

$n_i$ : تعداد عمل‌های کار i

$\beta_{ij}$ : زمان اضافه شده بر پردازش عمل  $O_{ij}$  به دلیل اثر زوال

$\alpha_{ij}$ : زمان اولیه (نرمال) پردازش عمل  $O_{ij}$

$\tau$ : مدت‌زمان اجرای هر نت

n: تعداد کارها

m: تعداد ماشین‌ها

B: تعداد باکت‌ها

L: تعداد کارگران

#### متغیرها

$Y_{klb}^{ij}$ : متغیر صفر و یک. برابر با یک است؛ اگر عمل  $O_{ij}$  به ماشین  $k$  با کارگر  $l$  در باکت  $b$  تخصیص داده شده باشد.

$C_{ij}$ : زمان تکمیل کار  $O_{ij}$

$C_{i,n_i}$ : زمان تکمیل کار i

$r_i$ : متغیر صفر و یک. برابر با یک است؛ اگر کار  $i$ ام پذیرفته شود.

$P_{klb}^{ij}$ : زمان پردازش عمل  $O_{ij}$

$C_{max}$ : حداکثر زمان تکمیل کارها

$C_{k,b}$ : زمان تکمیل باکت  $b$  از ماشین  $k$

$C_{k,b}$ : زمان تکمیل ماشین  $k$

$S_{ij}$ : زمان شروع عمل  $O_{ij}$

$x_{rs}^{ij}$ : متغیر صفر و یک. برابر با یک است؛ اگر عمل  $O_{ij}$  قبل از عمل  $O_{rs}$  پردازش شود.

$y_{kb}$ : متغیر صفر و یک. برابر با یک است؛ اگر ماشین  $k$  دارای باکت  $b$  است.

$RC_{i,n}$ : متغیر پیوسته

$PY_{klb}^{ij}$ : متغیر پیوسته

$e_i$ : زودکرد کار  $i$

بر این اساس، مدل‌سازی مسئله موردبررسی به‌صورت زیر است:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n e_i + C_{max} \quad \text{رابطه (۱)}$$

رابطه ۱، تابع هدف مدل را نشان می‌دهد. هدف از این رابطه، کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها و مجموع زودکردها است [۳]. بنا بر مفروضات مسئله، در پژوهش حاضر دیرکرد امکان‌پذیر نیست و در صورت گذر از موعد تحویل، کار رد می‌شود؛ ولی زودکرد امکان‌پذیر است و هدف تابع هدف این پژوهش، بهینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها و زودکردها است.

$$\sum_{b=1}^B \sum_{k \in M_{ij}} \sum_{l \in W_{ijk}} Y_{klb}^{ij} = r_i \quad \forall i, j \quad \text{رابطه (۲)}$$

رابطه ۲، نشان می‌دهد که به شرط پذیرش کار  $i$ ام، حداکثر برای هر عمل  $O_{ij}$ ، یک باکت، یک ماشین قابل و یک کارگر قابل تخصیص داده می‌شود.

$$C_{i,n_i} \leq d_i r_i \quad \forall i, n_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$C_{i,n_i} - d_i + M(1 - r_i) \leq e_i \quad \forall i, n_i \quad \text{رابطه (۴)}$$

روابط ۳ و ۴، رد کار در سیستم را امکان‌پذیر می‌کند.

$$\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^L \sum_{b=1}^B Y_{klb}^{ij} = r_i n_i \quad \forall i \quad \text{رابطه (۵)}$$

از آنجاکه در سیستم کار کارگاهی منعطف، یک کار از مجموعه‌ای از عمل‌ها تشکیل شده است، تولید تنها تعدادی از عمل‌ها منطقی نیست. رابطه ۵، نشان می‌دهد که عمل‌های یک کار مشخص، یا همگی با هم تولید می‌شوند و یا هیچ‌کدام تولید نمی‌شوند.

$$C_{i,j} \geq S_{ij} + P_{klb}^{ij} Y_{klb}^{ij} \quad \forall i, j, k, l, b$$

نامساوی بالا درصدد نشان‌دادن این مطلب است که زمان تکمیل هر عمل بزرگ‌تر از زمان شروع به‌علاوه زمان پردازش است. در حالت فعلی، ضرب یک متغیر صفر و یک در یک متغیر پیوسته موجب غیرخطی شدن رابطه بالا شده است. با معرفی متغیر جدید پیوسته  $PY_{klb}^{ij}$  برای خطی‌سازی  $P_{klb}^{ij} * Y_{klb}^{ij}$  محدودیت‌های ۶ تا ۹، موضوع بالا را در حالت خطی شده، نشان می‌دهد.

$$C_{i,j} \geq S_{ij} + PY_{klb}^{ij} \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$PY_{klb}^{ij} \leq P_{klb}^{ij} \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$PY_{klb}^{ij} \leq MY_{klb}^{ij} \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$PY_{klb}^{ij} \geq P_{klb}^{ij} - ((1 - Y_{klb}^{ij})M) \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۹)}$$

زمان اجرای هر عمل توسط روابط ۱۰ و ۱۱، مشخص شده است. در پژوهش حاضر، زمان هر عمل ثابت نیست و وابسته به فاصله زمانی شروع هر عمل تا آخرین فعالیت تعمیر و نگهداری RMA است.

$$P_{klb}^{ij} \geq \alpha_i + \beta_i(S_{ij} - C_{k,b-1} - \gamma) - M(1 - r_i) \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$P_{klb}^{ij} \leq \alpha_i + \beta_i(S_{ij} - C_{k,b-1} - \gamma) + M(1 - r_i) \quad \forall i, j, k, l, b \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$C_{k,b} \geq 0 \quad C_{i,j} \geq 0 \quad S_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j, k, b \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$S_{i,j} \geq C_{i,j-1} \quad \forall i, j \quad j > 1 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

نامساوی‌های رابطه ۱۲، بدیهی بوده و نمایانگر نامنفی بودن زمان‌های شروع و تکمیل کار عمل‌ها و باکت‌ها هستند. محدودیت ۱۳، نشان می‌دهد که زمان شروع عمل آتی از یک کار، بزرگ‌تر از زمان تکمیل عمل‌های قبلی همان کار است و به‌نوعی ضمانت توالی درست عمل‌های یک کار را نشان می‌دهد. تعیین توالی دو عمل از دو کار متفاوت در یک ماشین به‌وسیله روابط ۱۴ و ۱۵، انجام می‌شود.

$$S_{i,j} \geq C_{r,s} - M + Mx_{ij}^{rs} - M(2 - \sum_{l \in W_{i,j,k}} Y_{klb}^{ij} - \sum_{l' \in W_{r,s,k}} Y_{klb}^{rs}) \quad \forall i, j, l, b \\ k \in \{M_{i,j} \cap M_{r,s}\} \quad i \neq r, j \neq s \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$S_{r,s} \geq C_{i,j} - Mx_{ij}^{rs} - M(2 - \sum_{l \in W_{i,j,k}} Y_{klb}^{ij} - \sum_{l' \in W_{r,s,k}} Y_{klb}^{rs}) \quad \forall i, j, l, b \\ k \in \{M_{i,j} \cap M_{r,s}\} \quad i \neq r, j \neq s \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

تعیین توالی دو عمل از دو کار متفاوت با کارگر یکسان توسط دو محدودیت ۱۶ و ۱۷، بیان می‌شود.

$$S_{i,j} \geq C_{r,s} + Mx_{ij}^{rs} - M(2 - \sum_{k \in M_{ijl}} Y_{klb}^{ij} - \sum_{k' \in M_{rsl}} Y_{klb}^{rs}) \quad \forall i, j, r, s, b \quad \forall l \in \{W_{i,j} \cap W_{r,s}\} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$S_{r,s} \geq C_{i,j} - Mx_{ij}^{rs} - M(2 - \sum_{k \in M_{ijl}} Y_{klb}^{ij} - \sum_{k' \in M_{rsl}} Y_{klb}^{rs}) \quad \forall i, j, r, s, b \quad \forall l \in \{W_{i,j} \cap W_{r,s}\} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\sum_{b=1}^B Y_{kb} \leq b \quad \forall k \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$Y_{k,b+1} \leq Y_{kb} \quad \forall k, b \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$C_{ij} - C_{kb} \leq M(1 - Y_{klb}^{ij}) \quad \forall k, b, i, j, l \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

به فاصله زمانی انجام کار بین دو تعمیر و نگهداری متوالی در یک ماشین، در میان‌نظری پژوهش باکت گفته شده است [۹]. محدودیت ۱۸، نشان می‌دهد که تعداد باکتهای ممکن در یک ماشین، حداکثر برابر با  $b$  است. رابطه ۱۹، نشان می‌دهد در صورتی باکت آتی وجود دارد که باکت قبلی آن وجود داشته باشد. محاسبه زمان تکمیل باکتهای با رابطه ۲۰، انجام می‌شود. محدودیت ۲۱، رابطه بین متغیرهای صفر و یک مدل را نشان می‌دهد.

$$x_{rs}^{ij} + x_{ij}^{rs} \geq 1 - M(2 - \sum_{l \in W_{i,j,k}} Y_{klb}^{ij} - \sum_{l' \in W_{r,s,k}} Y_{klb}^{rs}) \quad \forall i, j, r, s, l, b \quad i \neq r, j \neq s \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

الزام بزرگ‌تر بودن زمان شروع هر کار در باکت جلوتر، از مجموع زمان‌های تکمیل باکت قبلی و زمان تعمیر و نگهداری در رابطه ۲۲، نشان داده شده است.

$$S_{ij} - C_{k,b-1} - \gamma \geq M(Y_{klb}^{ij} - 1) \quad \forall i, j, kl, b \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

روابط بین متغیرهای صفر و یک در روابط ۲۳، ۲۴ و ۲۵، ارائه شده است.

$$Y_{klb}^{ij} \leq Y_{kb} \quad \forall i, j, kl, b \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$Y_{kb} \leq M \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{l=1}^L Y_{klb}^{ij} \quad \forall k, b \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

$$x_{rs}^{ij} + x_{ij}^{rs} \leq 1 \quad \forall i, j, r, s \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$C_{max} \geq RC_{i,n} \quad \forall i, n \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$RC_{i,n} \leq C_{i,n} \quad \forall i, n \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$RC_{i,n} \leq Mr_i \quad \forall i, n \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

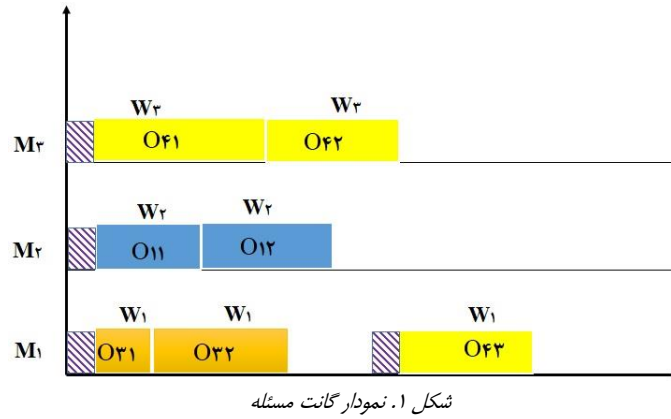
$$RC_{i,n} \geq C_{i,n} - M(1 - r_i) \quad \forall i, n \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

روابط ۲۶ تا ۲۹، برای محاسبه حداکثر زمان تکمیل کارها،  $C_{max}$ ، کاربرد دارد. منظور از  $C_{i,n}$  زمان تکمیل آخرین عمل از کار  $i$ ام است، که طبیعتاً زمان تکمیل کار  $i$ ام نیز هست.  $RC_{i,n}$  متغیری پیوسته است که برای خطی‌سازی ضرب متغیر صفر و یک پذیرش کار در زمان تکمیل کار استفاده شده است.

$$x_{rs}^{ij}, Y_{klb}^{ij}, Y_{kb} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, r, s, k, b \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

در ادامه، مثال عددی حل‌شده مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده است. در نمونه ارائه‌شده، در چیدمان تولیدی، سه ماشین موجود است و بر روی هر ماشین امکان اجرای حداکثر دو RMA است که به حداکثر سه باکت منجر خواهد شد. فعالیت RMA، در اول هر باکت انجام می‌شود. سه کارگر در سیستم تولید وجود دارند که دارای مهارت‌های گوناگون هستند که توانایی‌های آن‌ها در پردازش عمل‌ها و زمان آن‌ها در جدول ۲، آورده شده است. در صورتی که یک کارگر قادر به پردازش یک عمل نباشد، در سلول متناظر علامت “-” قرار داده شده است. زمان انجام RMA برابر ۵ است. چهار سفارش کار به سیستم وارد شده است. کار اول شامل دو عمل، کار دوم شامل سه عمل، کار سوم شامل دو عمل و کار چهارم شامل سه عمل است که به ترتیب به صورت ۱۱، ۱۲، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۳۱، ۳۲، ۴۱، ۴۲ و ۴۳ نشان داده شده‌اند. نرخ زوال ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۲، عمل  $O_{11}$  بر روی ماشین ۱ قابل اجرا نیست. عمل  $O_{21}$  بر روی ماشین ۳ قابل اجرا نیست. عمل  $O_{31}$  به وسیله کارگر ۲ قابل اجرا نیست. به جز این، تمام ماشین‌ها و کارگران

توانایی انجام مابقی عمل‌ها را دارند. موعدهای تحویل کارها به‌ترتیب ۱۵۰، ۵۰، ۱۴۰ و ۱۸۰ در نظر گرفته شده است. کار دوم به‌دلیل آنکه امکان تحویل آن در موعد مقرر ممکن نیست، رد شده است و سفارش بقیه کارها موردپذیرش قرار گرفته است. نمودار گانت حل مسئله در شکل ۱ و نتایج آن بر حسب ماشین و کارگر به‌ترتیب در جداول ۳ و ۴، آورده شده است.



جدول ۲. زمان‌های پردازش (زمان پایه)

| عمل | ماشین ۱ |         |         | ماشین ۲ |         |         | ماشین ۳ |         |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | کارگر ۱ | کارگر ۲ | کارگر ۳ | کارگر ۱ | کارگر ۲ | کارگر ۳ | کارگر ۱ | کارگر ۲ | کارگر ۳ |
| ۱۱  | -       | -       | -       | ۴۰      | ۴۰      | ۴۰      | ۴۰      | ۴۰      | ۴۰      |
| ۱۲  | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      |
| ۲۱  | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | -       | -       | -       |
| ۲۲  | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      | ۳۰      |
| ۲۳  | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      |
| ۳۱  | ۲۰      | -       | ۲۰      | ۲۰      | -       | ۲۰      | ۲۰      | -       | ۲۰      |
| ۳۲  | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      |
| ۴۱  | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      | ۶۰      |
| ۴۲  | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      |
| ۴۳  | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      | ۵۰      |

جدول ۳. نتایج بر حسب ماشین‌ها

| عمل | ماشین | کارگر | باکت | زمان شروع | زمان پایان |
|-----|-------|-------|------|-----------|------------|
| ۳۱  | ۱     | ۱     | ۱    | ۵         | ۲۵         |
| ۳۲  | ۱     | ۱     | ۱    | ۲۵        | ۷۶         |
| ۴۳  | ۱     | ۱     | ۲    | ۱۱۸       | ۱۶۸        |
| ۱۱  | ۲     | ۲     | ۱    | ۵         | ۴۵         |
| ۱۲  | ۲     | ۲     | ۱    | ۴۵        | ۹۷         |
| ۴۱  | ۳     | ۳     | ۱    | ۵         | ۶۵         |
| ۴۲  | ۳     | ۳     | ۱    | ۶۵        | ۱۱۸        |

مسئله مهم در جواب به‌دست‌آمده، رعایت توالی عمل‌های مربوط به هر کار است؛ همچنین خروجی مدل به‌نحوی است که تا حد امکان و رعایت الزامات عملکردی، تخصیص عمل‌ها به ماشین‌ها و کارگران به‌صورت مناسب انجام شود. علاوه بر آن، یک ماشین و یا یک کارگر -در آن واحد- به دو عمل تخصیص داده نشوند.



جدول ۴. نتایج بر حسب کارگرها

| عمل | کارگر | ماشین | باکت | زمان شروع | زمان پایان |
|-----|-------|-------|------|-----------|------------|
| ۳۱  | ۱     | ۱     | ۱    | ۵         | ۲۵         |
| ۳۲  | ۱     | ۱     | ۱    | ۲۵        | ۷۶         |
| ۴۳  | ۱     | ۱     | ۲    | ۱۱۸       | ۱۶۸        |
| ۱۱  | ۲     | ۲     | ۱    | ۵         | ۴۵         |
| ۱۲  | ۲     | ۲     | ۱    | ۴۵        | ۹۷         |
| ۴۱  | ۳     | ۳     | ۱    | ۵         | ۶۵         |
| ۴۲  | ۳     | ۳     | ۱    | ۶۵        | ۱۱۸        |

توضیح مجدد آنکه، عمل  $O_{11}$  بر روی ماشین ۱ قابل اجرا نیست. عمل  $O_{21}$  بر روی ماشین ۳ قابل اجرا نیست. عمل  $O_{31}$  به وسیله کارگر ۲ قابل اجرا نبوده است. مدل توانسته است، محدودیت‌های دوگانه انسان - ماشین را در خروجی مراعات کند؛ همچنین به دلیل آنکه کار دوم در موعد تحویل مقرر قابل اجرا نبوده است، به درستی سفارش انجام کار رد شده است و تمام عمل‌های مرتبط با کار دوم نیز پردازش نشده‌اند.

**روش‌های حل.** برای حل این مسئله از روش‌های فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی همسایگی متغیر استفاده شده است. **الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.** الگوریتم شبیه‌سازی تبرید همانند سایر روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت، سعی بر شبیه‌سازی تغییرات انرژی سیستم تا رسیدن به یک حالت پایدار دارد. نام دیگر این الگوریتم، «الگوریتم بازپخت» است. این روش می‌تواند برای جست‌وجوی درون جواب‌های موجه یک مسئله بهینه‌سازی که به جوابی بهینه همگرا می‌شود، استفاده شود. شبیه‌سازی تبرید را می‌توان روشی فراابتکاری بر مبنای جست‌وجوی محلی دانست که در آن، زیرمجموعه‌ای از جواب‌های موجه با حرکت مداوم از جواب فعلی به یک جواب در همسایگی آن بررسی می‌شوند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یکی از روش‌های جست‌وجوی تصادفی است که به دلیل پذیرش حرکت‌های غیربهبوددهنده تابع هدف، بر خلاف سایر روش‌های جست‌وجوی موضعی به نقطه شروع اولیه و جواب اولیه وابسته نیست و توانایی این را دارد که از دام نقاط بهینه موضعی رهایی یابد. گام اولیه این الگوریتم با تعریف ساختار مسئله و پارامترهای آن آغاز می‌شود؛ سپس جواب‌های حاصل از ساختارهای همسایگی به‌طور مداوم با جواب موجود مقایسه می‌شوند و بهترین جواب همواره حفظ می‌شود. این فرآیند در طی یک حلقه به‌صورت مداوم تکرار می‌یابد تا با کاهش دما و رسیدن از دمای اولیه به دمای نهایی فرآیند به انتها برسد شبیه‌کرد روش شبیه‌سازی تبرید در شکل ۲، نشان داده شده است [۴]. مطابق با شکل ۲، شرط توقف در الگوریتم، شرط زمانی است. حداکثر مقدار زمان اجرای الگوریتم‌ها در این پژوهش، در خصوص مسائل کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ ثانیه است و پس از آن، اجرای الگوریتم متوقف می‌شود. در ابتدا مقادیر جواب‌های اولیه و دمای ابتدایی در روش شبیه‌سازی تبرید مشخص می‌شوند (مقادیر  $S$  و  $T_k$ )؛ سپس از طریق فرآیندهای ساختار همسایگی که در ادامه معرفی خواهند شد، جواب‌های جدید  $(N(S))$  تولید و با مقایسه مقادیر تابع هدف آن‌ها با جواب فعلی، بهترین جواب ذخیره می‌شود. این در حالی است که در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با هدف تنوع‌بخشی به جواب‌ها، امکان پذیرش جواب با مقدار ناپهینه نیز وجود دارد. با هر بار اجرای حلقه تکرار، مقدار دما به‌روزرسانی می‌شود و تا رسیدن به شرط توقف، این فرآیند ادامه خواهد داشت.

```

Rtime ← set run time
While run time < Rtime do
  S ← Generate initial solution
  K ← 0
  Tk ← set initial temperature
  While termination conditions not met do
    S' ← Pick neighbor at random (N(S))
    If f(S') ≤ f(S) then
      S ← S'
    else
      Accept S' as new solution with probability p(S'|Tk, S)
    end if
  Adapt temperature
end while
Sbest ← S
Output: Sbest
end while

```

شکل ۲. شبه‌کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید [۴]

**الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر.** الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر یکی دیگر از الگوریتم‌های فراابتکاری است که بر پایه تغییرات منظم ساختار همسایگی بوده و برای جست‌وجوی جواب بهینه در مسائل گوناگون از جمله بهینه‌سازی ترکیباتی مورد استفاده قرار گرفته است. تغییرات منظم از طریق تغییر موقعیت از یک همسایگی به همسایگی دیگر جواب اولیه انجام می‌شود. این الگوریتم می‌تواند ساختارهای همسایگی گوناگونی را به کار بگیرد و جست‌وجوی جواب در نواحی مختلفی از فضای موجه انجام می‌شود. شبه‌کد روش جست‌وجوی همسایگی متغیر و روش ترکیبی الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی همسایگی متغیر در شکل‌های ۳ و ۴، نشان داده شده است [۴].

مطابق با شکل ۳، شرط توقف در الگوریتم، شرط زمانی است. حداکثر مقدار زمان اجرای الگوریتم در این پژوهش، در خصوص مسائل کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ ثانیه است و پس از آن، اجرای الگوریتم متوقف می‌شود. همان‌طور که شکل ۳، نشان می‌دهد، اجزای اصلی این الگوریتم مشتمل بر دو جز اصلی با نام‌های فرآیند ارتعاش<sup>۱</sup> و فرآیند جست‌وجوی محلی<sup>۲</sup> است. مطابق با شکل ۳، در ابتدا مقدار جواب اولیه با نماد  $S^*$  نشان داده می‌شود. حلقه تکرار روش جست‌وجوی همسایگی متغیر شامل دو فرآیند ارتعاش و جست‌وجوی محلی است. از طریق رویکرد ارتعاش، جواب همسایگی جدید  $S'$  به دست می‌آید و پس از آن با استفاده از ساختارهای همسایگی جواب جدید  $S'$  ایجاد می‌شود. این الگوریتم در ابتدا پس از تولید یک جواب اولیه، به‌طور مکرر جواب فعلی را با جواب‌های حاصل از ساختارهای تولید همسایگی مقایسه کرده و بهترین جواب را به‌عنوان بهترین راه‌حل انتخاب می‌کند. این فرآیند تا زمانی که معیار توقف برآورده نشود، ادامه می‌یابد.

در روش الگوریتم ترکیبی (شکل ۴)، ماهیت اصلی الگوریتم، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید است و روش جست‌وجوی همسایگی متغیر برای یافتن جواب‌های جدید و مقایسه با جواب فعلی انتخاب شده است.

```

Rtime ← set run time
While run time < Rtime do
  Find an initial solution S*
  l ← 1
  for iterations ← 1 to a maximum number of iterations do
    S ← S*
    Shake procedure: find a random solution S' ∈ Nl(S)
    Perform a local search on Nl(S') to find a solution S''
    If f(S'') ≤ f(S*) then
      S* ← S''
      l ← 1
    end if
    l ← l+1
  end for
end while

```

شکل ۳. شبه‌کد الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر [۴]

```

Rtime ← set run time
While run time < Rtime do
  S* ← Generate initial solution
  l ← 1
  for iterations ← 1 to a maximum number of iterations do
    S ← S*
    k ← 0
    Tk ← set initial temperature
    Tf ← set final temperature
    while current temperature > Tf do
      Shake procedure: find a random solution S' ∈ Nl(S)
      Perform a local search on Nl(S') to find a solution S
      If f(S*) ≤ f(S') then
        S* ← S'
        l ← 1
      else
        Accept S' as new solution with probability p(S'|Tk, S)
      end if
      Adapt temperature Tk
    end while
    l ← l+1
  end for
  verify for global or local best
end while

```

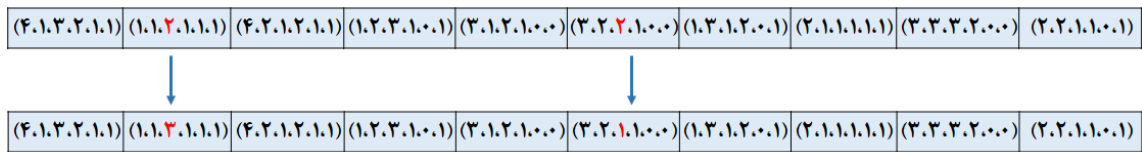
شکل ۴. شبه‌کد الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی همسایگی متغیر [۴]

شیوه نمایش جواب و ساختارهای همسایگی. برای نمایش یک جواب شدنی از ساختار  $(i, j, k, l, b, r)$  استفاده شده است. برای مثال  $(1, 1, 3, 4, 1, 1)$  نشان می‌دهد که عمل اول از کار دوم بر روی ماشین سوم به‌وسیله کارگر چهارم پردازش می‌شود و پیش از آن یک فعالیت RMA اجرا خواهد شد. آخرین رقم نمایانگر آن است که عمل دوم برای پردازش موردپذیرش قرار گرفته است. شکل ۵، ساختار یک جواب شدنی را نشان می‌دهد.

|               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| (۴.۱.۳.۲.۱.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۱) | (۱.۲.۳.۱.۰.۱) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰) | (۱.۳.۱.۲.۰.۱) | (۲.۱.۱.۱.۱.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰) | (۲.۲.۱.۱.۰.۱) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|

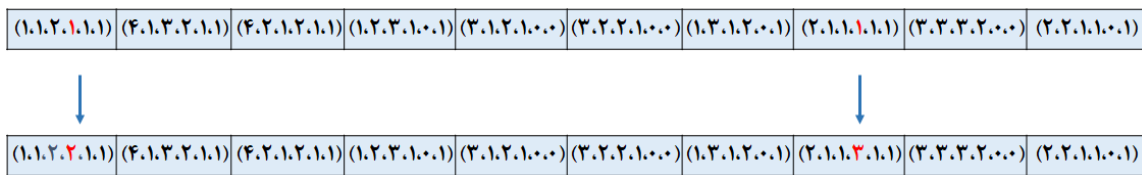
شکل ۵. ساختار نمایش یک جواب

**ساختار همسایگی NS1: تغییر ماشین‌های پردازنده.** به فرآیند گذر از یک جواب شدنی و تبدیل آن به مجموعه مشخصی از جواب‌های شدنی دیگر که در مجاورت آن قرار دارند، «ساختار همسایگی» گفته می‌شود [۳۴]. جواب‌های همسایگی با تغییر در تعداد محدودی از ویژگی‌های جواب اولیه ایجاد می‌شوند. در این پژوهش، ۷ ساختار همسایگی مورداستفاده قرار گرفته است. ساختار همسایگی NS1 به‌طور تصادفی از میان عمل‌های یک جواب،  $d$  عمل را انتخاب می‌کند و مجدداً به یک ماشین قابل تخصیص می‌دهد؛ به‌نحوی که جواب تولیدشده همواره شدنی باقی می‌ماند. در خصوص مسائل کوچک، متوسط و بزرگ به‌ترتیب مقدار پارامتر  $d$  برابر با ۱، ۲ و ۳ انتخاب شده است. شکل ۶، عملکرد ساختار همسایگی NS1 را نشان می‌دهد. مقدار پارامتر  $d$  در این مثال مقدار ۲ است. به‌طور تصادفی عمل  $O_{11}$  مندرج در سلول دوم و عمل  $O_{32}$  در سلول ششم، انتخاب شده است و مجدداً به‌طور تصادفی به یکی از ماشین‌های قابل برای پردازش این دو عمل، تخصیص یافته است.



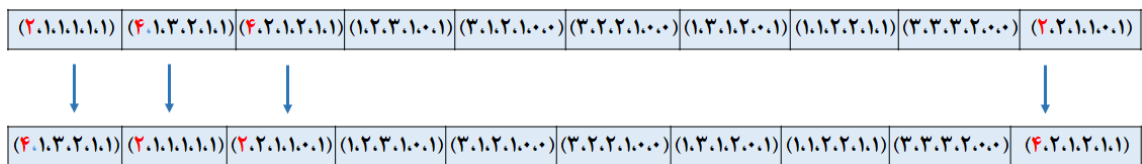
شکل ۶. ساختار همسایگی NS1

**ساختار همسایگی NS2: ایجاد تغییر در کارگران.** ساختار همسایگی NS2،  $d$  عمل را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند و مجدداً به یک کارگر قابل تخصیص می‌دهد؛ به‌نحوی که جواب تولیدشده همواره شدنی باقی می‌ماند. مقادیر عددی پارامتر  $d$  در این مثال، مقدار ۲ است؛ یعنی دو سلول تغییر می‌کند. عملکرد ساختار همسایگی NS2 در این مثال، در شکل ۷، نشان داده شده است. همانند قبل، انتخاب عمل‌ها به‌صورت تصادفی است و به یکی از کارگرهای قابل برای پردازش، مجدداً تخصیص می‌یابند.



شکل ۷. ساختار همسایگی NS2

**ساختار همسایگی NS3: تغییر در عمل‌های کارها.** در ساختار همسایگی NS3،  $d$  بار، دو کار به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند و موقعیت‌های عمل‌های آن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شوند. مقادیر عددی پارامتر  $d$  در این حالت برای مسائل کوچک، متوسط و بزرگ به‌ترتیب ۱، ۲ و ۳ است. عملکرد ساختار همسایگی NS3 در شکل ۸، نشان داده شده است که عمل‌های دو کار با یکدیگر تعویض شده‌اند.



شکل ۸. ساختار همسایگی NS3

**ساختار همسایگی NS4: تغییر در چینش عمل‌ها.** ساختار همسایگی NS4، چینش کل عمل‌ها را معکوس<sup>۱</sup> می‌کند؛ به‌نحوی که الزامات سیستم کار کارگاهی منقطع نیز مراعات شود. شکل ۹، عملکرد ساختار همسایگی NS4 را نشان می‌دهد. توضیح آنکه در مثال ارائه‌شده، آخرین عمل،  $O_{22}$  است که در حالت جدید، در نخستین سلول در سمت چپ قرار گرفته و بنا به الزامات تولید کارگاهی منقطع به  $O_{21}$  مبدل شده است.

|                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۱.۱.۲.۲.۱.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|



|                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۳.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۱.۲.۱.۰.۱) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۴.۱.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۲.۳.۲.۱.۰.۱) | (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

شکل ۹. ساختار همسایگی NS4

**ساختار همسایگی NS5: تغییر در باکت‌ها.** هدف از ساختار همسایگی NS5 تولید جواب‌های همسایگی با تغییر در باکت‌ها است. بدین منظور تعداد  $d$  مرتبه، یک عمل انتخاب می‌شود و پنجمین عدد در هر سلول که مقدار صفر یا یک را داراست و نشانگر اجرا و یا عدم اجرای فعالیت RMA قبل از آن است، تغییر پیدا می‌کند. مقدار  $d$  در این ساختار همسایگی و ساختارهای همسایگی بعدی مشابه با ساختار همسایگی NS1 است. شکل ۱۰ عملکرد ساختار همسایگی NS5 را نشان می‌دهد.

|                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|



|                 |                 |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

شکل ۱۰. ساختار همسایگی NS5

**ساختار همسایگی NS6: تعویض عمل‌ها.** مطابق شکل ۱۱، هدف از اجرای ساختار همسایگی NS6 تعویض دو عمل دلخواه به تعداد  $d$  بار با رعایت الزامات سیستم کار کارگاهی منعطف است.

|                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|



|                 |                 |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

شکل ۱۱. ساختار همسایگی NS6

**ساختار همسایگی NS7: تغییر در رد/پذیرش کارها.** مطابق شکل ۱۲، هدف از اجرای ساختار همسایگی NS7 تعویض رد/پذیرش عمل‌های کاری دلخواه که به صورت تصادفی انتخاب شده است، به تعداد  $d$  بار است. به‌عنوان نمونه در شکل ۱۲، وضعیت عمل‌های کار سوم از رد به پذیرش تغییر یافته است. مقادیر پارامتر  $d$  نظیر ساختار همسایگی NS1 است.

|                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|



|                 |                 |                   |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| (۲.۲.۱.۱.۰.۰.۱) | (۳.۳.۳.۲.۰.۰.۰) | (۲.۱.۱.۱.۱.۰.۰.۱) | (۱.۳.۱.۲.۰.۰.۱) | (۳.۲.۲.۱.۰.۰.۰) | (۳.۱.۲.۱.۰.۰.۰) | (۱.۲.۳.۱.۰.۰.۱) | (۴.۲.۱.۲.۱.۰.۱) | (۴.۱.۳.۲.۱.۰.۱) | (۱.۱.۲.۱.۱.۰.۱) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

شکل ۱۲. ساختار همسایگی NS7

به‌منظور مقایسه ساختارهای همسایگی این مقاله با مبانی نظری، به پژوهش‌مگ و همکاران (۲۰۱۹) در حوزه کار کارگاهی با فرض محدودیت دوگانه منابع انسان - ماشین اشاره می‌شود. ایجاد ساختارهای همسایگی در این پژوهش بر اساس ایجاد تغییرات در توالی عملیات، ماشین‌ها و کارگران است.

از سه ساختار همسایگی مورد استفاده به‌منظور ایجاد تغییرات در توالی عملیات، دو ساختار آن مشابه با ساختارهای NS4 و NS6 است که ساختار جدید از طریق جابه‌جایی دوبه‌دو و وارونگی انجام شده است.

الگوریتم ایجاد تغییرات در تخصیص ماشین‌ها و کارگران دقیقاً مشابه با ساختارهای NS1 و NS2، یک ماشین یا یک کارگر از میان سایر ماشین‌های قابل و کارگران قابل به عمل مجدداً تخصیص داده شده است. به دلیل تفاوت ماهیت مسئله منگ و همکاران (۲۰۱۹) با پژوهش حاضر، مقایسه سایر ساختارهای همسایگی دو مقاله موضوعیت ندارد [۱۷].

**تنظیم پارامتر.** جدول‌های ۵ و ۶، تعداد عوامل و سطوح هر یک از آن‌ها را در طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی نشان می‌دهد. در این پژوهش، هدف از انجام طراحی آزمایش به روش تاگوچی، تنظیم پارامترهای روش‌های فرآینتکاری مورد استفاده در این پژوهش است. برای نمونه، در روش فرآینتکاری ترکیبی، پارامترهای مورد بررسی به ترتیب دمای اولیه، تعداد جست‌وجوهای همسایگی و شمارنده تکرار حلقه ارتعاش است که با نمادهای A، B و C در این جدول نشان داده شده است. سطوح پارامتر دمای اولیه به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ در نظر گرفته شده است. این مقدار برای پارامتر تعداد همسایگی به ترتیب ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ و در خصوص پارامتر شمارنده تکرار حلقه ارتعاش برابر با ۳، ۴، ۵ و ۶ است. مروری بر مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که روش‌های گوناگونی برای تنظیم پارامترها و یافتن پارامترهای بهینه، استفاده شده است [۲۱]. مشابه با پژوهش‌های پیشین در پژوهش حاضر، از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترها استفاده شده است [۲۵]. روش تاگوچی عامل‌ها را به دو دسته عامل‌های قابل کنترل و نوپز دسته‌بندی می‌کند [۴۵].

از مزیت‌های این روش، امکان یافتن جواب بهینه با تعداد آزمایش‌های محدود است. با توجه به اینکه حذف کامل عوامل نوپز عموماً غیرممکن است، هدف روش تاگوچی بر مبنای کمینه‌سازی اثر عوامل نوپز و یافتن بهترین مقدار عامل‌های قابل کنترل استوار شده است. اساس محاسبات روش تاگوچی بر نسبت مقدار سیگنال به نویز بنا نهاده شده که خود مقداری برای سنجش میزان تغییرات است [۲۶]. در این سنجه، منظور از سیگنال مقدار مطلوب یا میانگین متغیر پاسخ است و منظور از نویز، مقدار نامطلوب یا میزان انحراف معیار است؛ از این رو نسبت سیگنال به نویز، میزان تغییرات موجود در متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. این نسبت در اهداف کمینه‌سازی به صورت رابطه ۳۰، است [۵]:

$$S/N \text{ ratio: } -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

رابطه (۳۰)

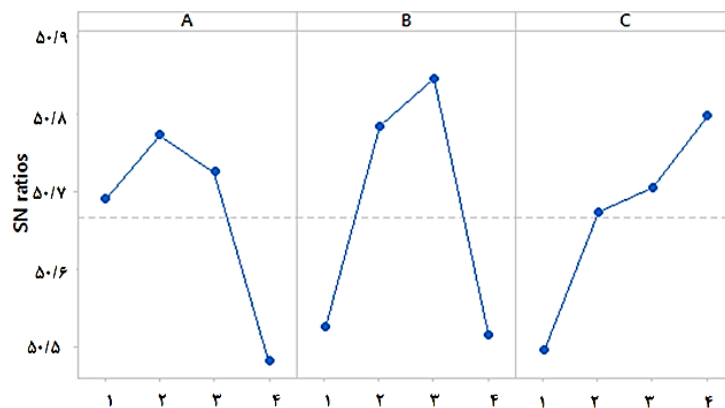
| جدول ۶. طرح آزمایش L16 |      |      |       | جدول ۵. عوامل و سطوح آن‌ها در طراحی آزمایش |      |                                      |
|------------------------|------|------|-------|--|------|--------------------------------------|
| C                      | B    | A    | تکرار | سطح  | نماد | عامل                                 |
| A(1)                   | B(1) | C(1) | ۱     | A(1):10                                    | A    | دمای اولیه                           |
| A(1)                   | B(2) | C(2) | ۲     | A(2):20                                    |      |                                      |
| A(1)                   | B(3) | C(3) | ۳     | A(3):30                                    |      |                                      |
| A(1)                   | B(4) | C(4) | ۴     | A(4):40                                    |      |                                      |
| A(2)                   | B(1) | C(2) | ۵     | B(1):100                                   | B    | تعداد جست‌وجوهای همسایگی در هر تکرار |
| A(2)                   | B(2) | C(1) | ۶     | B(2):150                                   |      |                                      |
| A(2)                   | B(3) | C(4) | ۷     | B(3):200                                   |      |                                      |
| A(2)                   | B(4) | C(3) | ۸     | B(4):250                                   |      |                                      |
| A(3)                   | B(1) | C(3) | ۹     | C(1):3                                     | C    | شماره تکرار حلقه ارتعاش              |
| A(3)                   | B(2) | C(4) | ۱۰    | C(2):4                                     |      |                                      |
| A(3)                   | B(3) | C(1) | ۱۱    | C(3):5                                     |      |                                      |
| A(3)                   | B(4) | C(2) | ۱۲    | C(4):6                                     |      |                                      |
| A(4)                   | B(1) | C(4) | ۱۳    |  |      |                                      |
| A(4)                   | B(2) | C(3) | ۱۴    |  |      |                                      |
| A(4)                   | B(3) | C(2) | ۱۵    |  |      |                                      |
| A(4)                   | B(4) | C(1) | ۱۶    |  |      |                                      |

در رابطه ۳۰، منظور از  $y_i$  متغیر پاسخ و منظور از  $n$  تعداد آزمایش‌ها است. یادآوری این نکته لازم است که مقدار این نسبت در مقیاس دسی‌بل نشان داده می‌شود و هدف بیشینه‌سازی این نسبت است [۷].

برای نمونه، طرح آزمایش در جداول ۴ و ۵، نشان داده شده است. مطابق با طرح آزمایش تاگوچی L16 نتایج در قالب شکل ۱۳، ارائه شده است. مقادیر انتخاب شده برای پارامترها به صورت زیر است:

$$A(2) = 20; \quad B(3) = 200; \quad C(4) = 6$$

از این رو مقادیر پارامترهای دمای اولیه، تعداد جست‌وجوهای همسایگی در هر تکرار و شمارنده تکرار حلقه ارتعاش به ترتیب برابر با ۲۰، ۲۰۰ و ۶ انتخاب می‌شوند.



شکل ۱۳. نمودار طراحی آزمایش

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

مسئله کار کارگاهی منعطف در رده مسائل NP-hard دسته‌بندی می‌شود [۱]؛ بنابراین استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل این مسئله اجتناب‌ناپذیر است [۴]. دودسته از ساختارهای همسایگی در روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر استفاده می‌شوند که «ساختار همسایگی فرآیند ارتعاش» و «ساختار همسایگی فرآیند جست‌وجوی محلی» نام دارند. ساختارهای همسایگی مورد استفاده در روش‌های فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر، شبیه‌سازی تبرید و روش ترکیبی در جدول‌های ۷ و ۸، نشان داده شده است.

جدول ۷. طرح ساختارهای همسایگی در فرآیند ارتعاش

| ساختار همسایگی | تکرار |
|----------------|-------|
| NS4+ NS1       | ۱     |
| NS4+ NS2       | ۲     |
| NS4+ NS3       | ۳     |
| NS4+ NS5       | ۴     |
| NS4+ NS6       | ۵     |
| NS4+ NS7       | ۶     |

ساختار همسایگی مورد استفاده در روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر و روش ترکیبی شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی همسایگی متغیر، به صورت زیر است:

در فرآیند ارتعاش، ساختار همسایگی مطابق با جدول ۷، از نوع ترکیبی است و با افزایش شمارنده تکرار حلقه ادامه می‌یابد. مطابق با جدول ۸، در خصوص ساختار همسایگی جست‌وجوی محلی در ابتدا عددی تصادفی مابین ۱ تا ۵ تولید می‌شود و سپس یکی از ساختارهای همسایگی متناظر با این عدد برای تولید همسایگی جدید برگزیده می‌شود. ساختار همسایگی مورد استفاده در روش شبیه‌سازی تبرید مطابق با ساختار همسایگی جدول ۸، است. شبه‌کد الگوریتم‌های فراابتکاری در شکل‌های ۲، ۳ و ۴، نشان داده شده است [۴].

جدول ۸. طرح ساختارهای همسایگی در فرآیند جستجوی محلی

| مقدار عدد تصادفی | ساختار همسایگی |
|------------------|----------------|
| ۱                | NS1            |
| ۲                | NS2            |
| ۳                | NS3            |
| ۴                | NS5            |
| ۵                | NS6            |

برای حل مسئله از نرم‌افزار متلب نسخه R2022a استفاده شده است. مشخصات رایانه شخصی مورد استفاده Core i5 با ۸ گیگا بایت، مقدار حافظه RAM است. برای حل مسئله در مجموع تعداد ۲۰ مسئله در ابعاد کوچک (سطرهای ۱ تا ۷ جدول ۸)، متوسط (سطرهای ۸ تا ۱۴ جدول ۸) و بزرگ (سطرهای ۱۵ تا ۲۰ جدول ۸) مدنظر قرار گرفته است. زمان‌های پردازش در محدوده [۱, ۱۵۰] و به صورت تصادفی تعیین شده است. فهرست ماشین‌ها و کارگرهای قابل برای انجام عمل‌ها و سایر داده‌های اولیه مسئله نیز به طور کاملاً تصادفی ایجاد شد. در این جدول، ستون‌های دوم تا پنجم از سمت راست حاوی اطلاعات هر مسئله است. پارامتر زمان اجرای RMA، ۲۵ در نظر گرفته شد. به دلیل وجود ماهیت تصادفی در تولید جواب‌ها و با هدف یافتن پاسخ‌های بهتر، میانگین پنج تکرار به عنوان جواب در هر مسئله ثبت شده است. در جدول ۸، منظور از بهترین جواب، بهترین جواب حاصل از الگوریتم‌های فراابتکاری است. برای یافتن جواب دقیق از نرم‌افزار GAMS استفاده شده که مسائلی که حل آن با این نرم‌افزار امکان‌پذیر بوده است، در این جدول گزارش شده است. برای مقایسه کارایی روش‌ها از معیار درصد انحراف نسبی به صورت رابطه ۳۱، استفاده شد [۲۰]:

$$RPD = 100 \left( \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \right) \tag{۳۱}$$

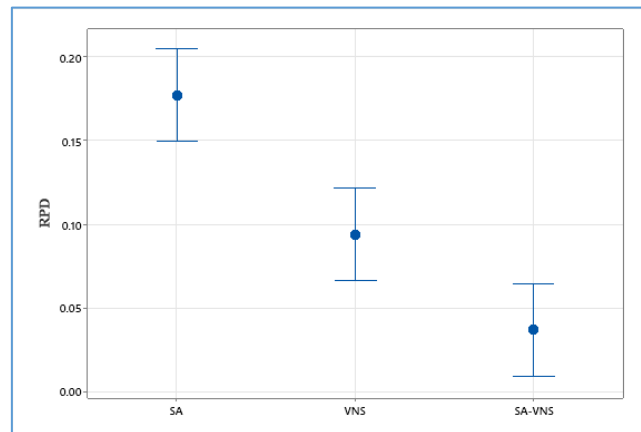
مقادیر درصد انحراف نسبی روش‌های فراابتکاری VNS، SA و SA-VNS به ترتیب در ستون‌های نهم تا یازدهم جدول ۹، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی SA-VNS عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر دارد. مقادیر میانگین درصد انحراف نسبی ( $RPD$ ) برای هر سه روش SA، VNS و SA-VNS به ترتیب برابر با ۱۷/۷۳، ۹/۴۰ و ۳/۶۷ به دست آمد. از آزمون تحلیل واریانس در نرم‌افزار مینی‌تب به منظور تحلیل نتایج آماری استفاده شده است. نتایج آزمون نمایانگر وجود تفاوت معنادار بین مقادیر RPD در سه روش مورده استفاده است. نمودار فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای مقادیر RPD در شکل ۱۴، مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش ترکیبی الگوریتم‌های فراابتکاری در بهبود کیفیت جواب‌ها مؤثر بوده است.

جدول ۹. نتایج الگوریتم‌ها

| شماره | تعداد کار | تعداد ماشین | تعداد کارگر | تعداد عمل‌ها | تعداد باکت | تعداد GAMS | بهترین جواب | RPD      |          |    |
|-------|-----------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|----------|----------|----|
|       |           |             |             |              |            |            |             | VNS      | SA-VNS   | SA |
| ۱     | ۳         | ۲           | ۲           | ۸            | ۳          | ۳۱۰        | ۰/۰۳۰۳۲۳    | ۰/۰۲۸۷۱۰ | ۰/۰۴۶۴۵۲ |    |
| ۲     | ۴         | ۳           | ۲           | ۱۰           | ۳          | ۳۳۶        | ۰/۰۵۱۱۹۰    | ۰/۰۵۱۱۹۰ | ۰/۰۳۶۳۱۰ |    |
| ۳     | ۴         | ۳           | ۲           | ۱۲           | ۳          | ۴۶۱        | ۰/۰۷۹۳۹۳    | ۰/۰۵۴۲۳۰ | ۰/۰۱۸۶۵۵ |    |
| ۴     | ۶         | ۴           | ۲           | ۱۸           | ۳          | ۵۷۶        | ۰/۰۴۳۱۰۳    | ۰/۰۵۱۰۳۴ | ۰/۰۷۴۸۲۸ |    |
| ۵     | ۶         | ۴           | ۳           | ۲۵           | ۳          | ۷۳۸        | ۰/۰۷۴۴۲۵    | ۰/۰۴۴۱۱۴ | ۰/۰۳۷۸۸۹ |    |
| ۶     | ۸         | ۴           | ۳           | ۳۵           | ۳          | ۸۵۴        | ۰/۰۹۳۴۴۳    | ۰/۰۴۸۴۷۸ | ۰/۰۵۰۵۸۵ |    |
| ۷     | ۸         | ۴           | ۴           | ۴۰           | ۳          | ۷۷۵        | ۰/۱۱۴۸۰۱    | ۰/۰۵۲۷۶۷ | ۰/۰۲۷۵۴۲ |    |
| ۸     | ۱۰        | ۵           | ۳           | ۴۵           | ۴          | ۱۱۰۳       | ۰/۱۹۱۷۲۷    | ۰/۰۲۵۰۰۰ | ۰/۱۳۸۳۰۹ |    |
| ۹     | ۱۰        | ۵           | ۴           | ۵۰           | ۴          | ۱۰۰۸       | ۰/۱۷۵۸۸۹    | ۰/۰۳۱۰۲۸ | ۰/۰۹۲۸۸۵ |    |
| ۱۰    | ۱۰        | ۵           | ۴           | ۵۵           | ۴          | -          | ۰/۱۶۹۴۷۱    | ۰/۰۲۵۰۳۹ | ۰/۰۶۳۸۳۳ |    |
| ۱۱    | ۱۲        | ۵           | ۴           | ۶۰           | ۴          | -          | ۰/۲۰۵۳۱۴    | ۰/۰۳۷۶۸۱ | ۰/۱۵۶۳۶۱ |    |
| ۱۲    | ۱۲        | ۶           | ۳           | ۷۰           | ۴          | -          | ۰/۱۸۷۱۵۳    | ۰/۰۲۹۱۶۷ | ۰/۰۶۵۲۷۸ |    |
| ۱۳    | ۱۲        | ۶           | ۵           | ۸۰           | ۴          | -          | ۰/۲۷۵۴۷۴    | ۰/۰۴۶۶۱۲ | ۰/۱۵۹۰۷۹ |    |



| شماره | تعداد کار | تعداد ماشین | تعداد کارگر | تعداد عمل‌ها | تعداد باکت | GAMS | بهترین جواب | RPD      |          |          |
|-------|-----------|-------------|-------------|--------------|------------|------|-------------|----------|----------|----------|
|       |           |             |             |              |            |      |             | SA       | SA-VNS   | VNS      |
| ۱۴    | ۱۲        | ۶           | ۶           | ۹۰           | ۴          | -    | ۱۴۸۷        | ۰/۲۸۰۹۶۸ | ۰/۰۲۷۶۶۰ | ۰/۱۶۹۶۰۳ |
| ۱۵    | ۱۵        | ۸           | ۵           | ۱۰۰          | ۵          | -    | ۱۶۶۹        | ۰/۲۷۲۰۱۹ | ۰/۰۲۷۹۸۷ | ۰/۱۸۶۸۱۸ |
| ۱۶    | ۱۵        | ۸           | ۶           | ۱۰۰          | ۵          | -    | ۱۴۵۶        | ۰/۲۲۷۳۳۵ | ۰/۰۲۲۶۶۵ | ۰/۰۹۵۶۰۴ |
| ۱۷    | ۲۰        | ۸           | ۶           | ۱۲۰          | ۵          | -    | ۱۵۹۱        | ۰/۲۲۷۱۵۳ | ۰/۰۱۰۰۵۷ | ۰/۰۷۵۹۲۷ |
| ۱۸    | ۲۰        | ۸           | ۸           | ۱۵۰          | ۵          | -    | ۱۵۹۵        | ۰/۲۸۹۹۰۶ | ۰/۰۴۶۳۹۵ | ۰/۱۴۵۷۰۵ |
| ۱۹    | ۳۰        | ۱۰          | ۸           | ۱۵۰          | ۵          | -    | ۱۶۴۶        | ۰/۳۰۸۰۱۹ | ۰/۰۱۷۰۱۱ | ۰/۱۷۳۷۵۵ |
| ۲۰    | ۴۰        | ۱۰          | ۱۰          | ۲۰۰          | ۵          | -    | ۱۶۶۰        | ۰/۲۴۸۱۹۳ | ۰/۰۱۷۹۵۲ | ۰/۰۶۵۰۶۰ |



شکل ۱۴. نمودار فاصله اطمینان برای مقادیر RPD

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

موضوع این پژوهش، مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منقطع با محدودیت‌های دوگانه انسان-ماشین و اجرای فعالیت‌های تعمیر و نگهداری RMA است. اجرای RMA موجب رفع اثر زوال می‌شود و مدت‌زمان پردازش عمل‌ها به میزان زمان نرمال آن‌ها بازمی‌گردد. برای حل این مسئله، یک مدل ریاضی متناسب با مفروضات مسئله توسعه داده شده است. از مزیت‌های مدل ریاضی ارائه‌شده می‌توان به قابلیت تعمیم آن به مسائل مشابه اشاره کرد.

در این پژوهش، با ترکیب کردن توانایی جست‌وجوی همسایگی متغیر در ایجاد جواب‌های متنوع و روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید، تلاش شد تا با هدف ایجاد تعادل بین فرآیندهای تنوع‌بخشی در جواب‌ها و تشدید، یک الگوریتم ترکیبی کارآمد ارائه شود. به‌منظور جست‌وجوی بهتر فضای جواب مسئله، ۷ ساختار ایجاد همسایگی جدید ارائه شده است. پیش از استفاده از روش‌های فراابتکاری تنظیم پارامتر ضروری است. بدین منظور از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها استفاده شد.

معیار ارزیابی سنجش کارایی روش‌ها، معیار درصد انحراف نسبی است. مقادیر میانگین درصد انحراف نسبی ( $RPD$ ) برای هر سه روش شبیه‌سازی تبرید، جست‌وجوی همسایگی متغیر و الگوریتم ترکیبی به ترتیب برابر با  $۱۷/۷۳$ ،  $۹/۴۰$  و  $۳/۶۷$  به‌دست آمد؛ بنابراین الگوریتم ترکیبی، عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر در ارائه نتایج بهتر داشته است.

موارد زیر برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

- لحاظ کردن عوامل دیگری در مدل که آن را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند، نظیر در نظر گرفتن عامل خستگی کارگران؛
- حل مسئله موردبررسی در حالت چندهدفه با توابع هدف مختلف؛
- در نظر گرفتن زمان‌های پردازش به‌صورت اعداد فازی؛
- لحاظ کردن زمان‌های آماده‌سازی در مسئله موردبررسی به‌ویژه به‌صورت وابسته به توالی؛
- در نظر گرفتن هزینه‌های مصرف انرژی.

**تعارض منافع.** برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به‌عنوان شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

## منابع

1. An, Y., Chen, X., Gao, K., Zhang, L., Li, Y., & Zhao, Z. (2023a). A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving an adaptive flexible job-shop rescheduling problem with real-time order acceptance and condition-based preventive maintenance. *Expert systems with applications*, 212, 118711.
2. An, Y., Chen, X., Gao, K., Zhang, L., Li, Y., & Zhao, Z. (2023b). Integrated optimization of real-time order acceptance and flexible job-shop rescheduling with multi-level imperfect maintenance constraints. *Swarm and Evolutionary Computation*, 77, 101243.
3. An, Y., Chen, X., Zhang, J., & Li, Y. (2020). A hybrid multi-objective evolutionary algorithm to integrate optimization of the production scheduling and imperfect cutting tool maintenance considering total energy consumption. *Journal of cleaner production*, 268, 121540.
4. Behnamian, J., Zandieh, M., & Ghomi, S. F. (2009). Parallel-machine scheduling problems with sequence-dependent setup times using an ACO, SA and VNS hybrid algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 9637-9644.
5. Caldeira, R. H., Gnanavelbabu, A., & Vaidyanathan, T. (2020). An effective backtracking search algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling considering new job arrivals and energy consumption. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106863.
6. Dabiri, M., Yazdani, M., Naderi, B., & Haleh, H. (2022). Modeling and solution methods for hybrid flow shop scheduling problem with job rejection. *Operational Research*, 1-45.
7. Gabi, D., Ismail, A. S., Zainal, A., & Zakaria, Z. (2019). Quality of service task scheduling algorithm for time-cost trade off scheduling problem in cloud computing environment. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 18(5), 448-469.
8. Ghaleb, M., Taghipour, S., & Zolfagharinia, H. (2021). Real-time integrated production-scheduling and maintenance-planning in a flexible job shop with machine deterioration and condition-based maintenance. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 423-449.
9. Golpîra, H., & Tirkolaee, E. B. (2019). Stable maintenance tasks scheduling: A bi-objective robust optimization model. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106007.
10. He, Z., Tang, B., & Luan, F. (2022). An Improved African Vulture Optimization Algorithm for Dual-Resource Constrained Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Sensors*, 23(1), 90.
11. Kim, H., & Kim, B.-I. (2022). Optimal sequence for single server scheduling incorporating a rate-modifying activity under job-dependent linear deterioration. *European Journal of Operational Research*, 298(2), 439-450.
12. Kim, T., Kim, Y.-w., & Cho, H. (2020). Dynamic production scheduling model under due date uncertainty in precast concrete construction. *Journal of cleaner production*, 257, 120527.
13. Kim, Y. J., Jang, J. W., Kim, D. S., & Kim, B. S. (2022). Batch loading and scheduling problem with processing time deterioration and rate-modifying activities. *International Journal of Production Research*, 60(5), 1600-1620.
14. Li, X.-J., & Wang, J.-J. (2018). Parallel machines scheduling based on the impact of deteriorating maintenance. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 21(3), 729-741.
15. Luan, F., Li, R., Liu, S. Q., Tang, B., Li, S., & Masoud, M. (2022). An improved sparrow search algorithm for solving the energy-saving flexible job shop scheduling problem. *Machines*, 10(10), 847.
16. Martins, M. S., Viegas, J. L., Coito, T., Firme, B., Costigliola, A., Figueiredo, J., Sousa, J. M. (2023). Minimizing total completion time in large-sized pharmaceutical quality control scheduling. *Journal of Heuristics*, 29(1), 177-206.
17. Meng, L., Zhang, C., Zhang, B., & Ren, Y. (2019). Mathematical modeling and optimization of energy-conscious flexible job shop scheduling problem with worker flexibility. *IEEE Access*, 7, 68043-68059.
18. Mosheiov, G., & Oron, D. (2021). A note on scheduling a rate modifying activity to minimize total late work. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107138.
19. Nelson, R. T. (1967). Labor and machine limited production systems. *Management Science*, 13(9), 648-671.
20. Nikouei, M. A., Zandieh, M., & Amiri, M. (2022). A two-stage assembly flow-shop scheduling problem with bi-level products structure and machines' availability constraints. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 39(6), 494-503.
21. Oroujzadeh, M., Nikouei, M. A., Mehdipour-Ataei, S., & Amiri, M. (2022). Materials selection for choosing the best composite blend polymeric membrane for hydrogen/oxygen proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 538, 231566.
22. Pal, M., Mittal, M. L., Soni, G., Chouhan, S. S., & Kumar, M. (2023). A multi-agent system for FJSP with setup and transportation times. *Expert systems with applications*, 216, 119474.

23. Peng, Z., Zhang, H., Tang, H., Feng, Y., & Yin, W. (2021). Research on flexible job-shop scheduling problem in green sustainable manufacturing based on learning effect. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-22.
24. Renna, P., Thürer, M., & Stevenson, M. (2020). A game theory model based on Gale-Shapley for dual-resource constrained (DRC) flexible job shop scheduling. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(2), 173-184.
25. Sadat, S. M., Jahan, S. T., & Haddadi, A. (2016). Effects of size and surface charge of polymeric nanoparticles on in vitro and in vivo applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 7(02), 91.
26. Saidat, S., Junoh, A. K., Wan Muhamad, W. Z. A., & Yahya, Z. (2022). Modified job shop scheduling via Taguchi method and genetic algorithm. *Neural Computing and Applications*, 1-18.
27. Soofi, P., Yazdani, M., Amiri, M., & Adibi, M. A. (2021). Robust fuzzy-stochastic programming model and meta-heuristic algorithms for dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem under machine breakdown. *IEEE Access*, 9, 155740-155762.
28. SUN, A., SONG, Y., YANG, Y., & LEI, Q. (2022). Dual Resource-constrained Flexible Job Shop Scheduling Algorithm Considering Machining Quality of Key Jobs. *China Mechanical Engineering*, 33(21), 2590.
29. Sun, X., Liu, T., Geng, X.-N., Hu, Y., & Xu, J.-X. (2022). Optimization of scheduling problems with deterioration effects and an optional maintenance activity. *Journal of Scheduling*, 1-16.
30. Tafakkori, K., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Siadat, A. (2022). Sustainable negotiation-based nesting and scheduling in additive manufacturing systems: A case study and multi-objective meta-heuristic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 112, 104836.
31. Tian, Y., Gao, Z., Zhang, L., Chen, Y., & Wang, T. (2023). A Multi-Objective Optimization Method for Flexible Job Shop Scheduling Considering Cutting-Tool Degradation with Energy-Saving Measures. *Mathematics*, 11(2), 324.
32. Vahedi-Nouri, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hanzálek, Z., Arbabi, H., & Rohaninejad, M. (2021). Incorporating order acceptance, pricing and equity considerations in the scheduling of cloud manufacturing systems: matheuristic methods. *International Journal of Production Research*, 59(7), 2009-2027.
33. Vital-Soto, A., Baki, M. F., & Azab, A. (2023). A multi-objective mathematical model and evolutionary algorithm for the dual-resource flexible job-shop scheduling problem with sequencing flexibility. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 35(3), 626-668.
34. Wong, K. H., Mason, C. W., Devaraj, S., Ouyang, J., & Balaya, P. (2014). Low temperature aqueous electrodeposited TiO<sub>x</sub> thin films as electron extraction layer for efficient inverted organic solar cells. *ACS applied materials & interfaces*, 6(4), 2679-2685.
35. Woo, Y.-B., & Kim, B. S. (2018). Matheuristic approaches for parallel machine scheduling problem with time-dependent deterioration and multiple rate-modifying activities. *Computers & Operations Research*, 95, 97-112.
36. Wu, X., Peng, J., Xiao, X., & Wu, S. (2021). An effective approach for the dual-resource flexible job shop scheduling problem considering loading and unloading. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 707-728.
37. Xie, J., Gao, L., Peng, K., Li, X., & Li, H. (2019). Review on flexible job shop scheduling. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 1(3), 67-77.
38. Yan, Q., Wang, H., & Wu, F. (2022). Digital twin-enabled dynamic scheduling with preventive maintenance using a double-layer Q-learning algorithm. *Computers & Operations Research*, 144, 105823.
39. Yang, G., Chung, B. D., & Lee, S. J. (2019). Limited search space-based algorithm for dual resource constrained scheduling problem with multilevel product structure. *Applied Sciences*, 9(19), 4005.
40. Youn, S., Geismar, H. N., & Pinedo, M. (2022). Planning and scheduling in healthcare for better care coordination: Current understanding, trending topics, and future opportunities. *Production and Operations Management*, 31(12), 4407-4423.
41. Zhang, S., Du, H., Borucki, S., Jin, S., Hou, T., & Li, Z. (2021). Dual resource constrained flexible job shop scheduling based on improved quantum genetic algorithm. *Machines*, 9(6), 108.
42. Zhang, S., Hou, T., Qu, Q., Glowacz, A., Alqhtani, S. M., Irfan, M., . . . Li, Z. (2022). An Improved Mayfly Method to Solve Distributed Flexible Job Shop Scheduling Problem under Dual Resource Constraints. *Sustainability*, 14(19), 12120.
43. Zheng, X.-l., & Wang, L. (2016). A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 54(18), 5554-5566.
44. Ziaee, M., Mortazavi, J., & Amra, M. (2022). Flexible job shop scheduling problem considering machine and order acceptance, transportation costs, and setup times. *Soft Computing*, 1-17.
45. Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.