Ind. Manag. Persp. 2023, 13(3), 223-248; doi: 10.48308/JIMP.13.3.223

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times in Multi-Factory Production Network: Modeling and Algorithm

Sara Kamran*, Javad Behnamian**

Abstract

Today, due to some challenges and competition, such as external pressures, factories are forced to reduce production time, traditional centralized production scheduling is not flexible enough to respond to rapid market changes. In such an environment, factories decide to merge and form a multi-factory production network to work more closely together. In this research, the multi-factory scheduling problem is considered, which factories belong to a company. The problem is assigning the jobs to appropriate factory and scheduling jobs on machines in each factory. In this paper, it is assumed machines in each factory are unrelated parallel machines. For scheduling jobs on machines sequence-dependent setup times are considered. After proposing a novel mixed integer linear programming model for the problem which is a combination of two types of modeling based on sequence and assignment, we developed an evolutionary metaheuristic namely imperialist competitive algorithm (ICA) to minimize the maximum completion time or makespan among the factories. We compare the obtained solutions using the proposed ICA with those using an adopted genetic algorithm to show the efficiency of the proposed algorithm. Finally, the results are reported. Numerical results show that the proposed algorithm has good performance.

Keywords: Multi-Factory Production Scheduling; Unrelated Parallel Machines; Sequence-Dependent Setup Times; Mathematical Modeling; Imperialist Competitive Algorithm.

How to Cite: Kamran, Sara; Behnamian, Javad (2023). Unrelated Parallel Machine Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times in Multi-Factory Production Network: Modeling and Algorithm, *Ind. Manag. Persp.*, 13(3), 223-248 *(In Persian)*.

Received: Apr. 23, 2022; Revised: Oct. 15, 2022; Accepted: Jun. 17, 2023; Published Online: Aug. 18, 2023.

* Msc, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
** Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Corresponding author. Email: behnamian@basu.ac.ir

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۳، شماره ۳، صص ۲۲۳ – ۲۴۸، doi: 10.48308/JIMP.13.3.223

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=fa

نوع مقاله: پژوهشی

زمان‌بندی ماشین موازی نامرتبط با زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی در شبکه تولید چندکارخانه‌ای: مدل‌سازی و الگوریتم حل

سارا کامران*، جواد بهنامیان**

چکیده

امروزه به‌دلیل برخی چالش‌ها، تولید متمرکز سنتی به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیر نیست تا بتواند به تغییرات سریع بازار پاسخ دهد. در چنین محیطی، کارخانه‌ها تصمیم می‌گیرند ادغام شوند و یک شبکه تولید چندکارخانه‌ای را برای همکاری نزدیک‌تر با یکدیگر تشکیل دهند. در این راستا، در پژوهش حاضر به زمان‌بندی تولید چندکارخانه‌ای پرداخته می‌شود که در آن چند کارخانه متعلق به یک شرکت در قالب یک شبکه تولید چندکارخانه‌ای مشارکتی با یکدیگر فعالیت می‌کنند تا تابع هدف کلی سیستم بهبود یابد. در اینجا فرض شده است که ماشین‌ها در هر کارخانه به‌صورت موازی غیرمرتبط با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی، کارها را پردازش کرده بطوریکه در روند حل، در یک فرآیند دو تخصیصی، ابتدا کار به کارخانه مناسب و سپس به ماشین مناسب در آن کارخانه تخصیص می‌یابد. پس از پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جدید بر پایه ترکیب دو نوع مدل‌سازی بر پایه توالی و تخصیص، در اینجا الگوریتم رقابت استعماری برای حداقل‌کردن حداکثر زمان تکمیل کارها پیشنهاد شده است. درنهایت نیز کارایی الگوریتم با انجام آزمایش‌ها با الگوریتم ژنتیک مقایسه و نتایج گزارش شده است. نتایج عددی و تحلیل‌های آماری انجام‌شده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک از کارایی بهتری برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی چندکارخانه‌ای؛ ماشین‌های موازی غیرمرتبط؛ زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی؛ مدلسازی ریاضی؛ الگوریتم رقابت استعماری.

استناددهی: کامران، سارا؛ بهنامیان، جواد (۱۴۰۲). زمان‌بندی ماشین موازی نامرتبط با زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی در شبکه تولید چندکارخانه‌ای: مدل‌سازی و الگوریتم حل. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۳)، ۲۲۳-۲۴۸.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵.

* کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

** دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

نویسنده مسئول: Email: behnamian@basu.ac.ir

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

تخصیص منابع برای انجام مجموعه‌ای از کارها در طول زمان را «زمان‌بندی» می‌نامند. خروجی زمان‌بندی، یک برنامه زمانی است که در آن نقاط زمانی آغاز و پایان انجام هر کار و منبع (منابع) تخصیص‌یافته برای انجام آن مشخص می‌شود. نظر به اینکه زمان همواره به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین محدودیت‌های بشر مطرح بوده است، زمان‌بندی بهینه کارها و فعالیت‌ها به‌منظور بهره‌گیری مؤثر از منابع محدود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲۳]. از طرفی امروزه نیازهای مشتریان بسیار پیچیده شده است و تنها تعداد کمی از کارخانه‌ها قادر به دستیابی به نتایج مناسب خود و رفع نیازهای مشتریان هستند؛ همچنین برخی چالش‌ها و رقابت‌ها مانند فشارهای خارجی کارخانه‌ها را مجبور به کاهش زمان تولید محصولات می‌کند. ازآنجاکه بازار در سراسر جهان پراکنده شده است، فعالیت‌های تولیدی نیز در یک محل واحد محدود نمی‌شوند و در سطح جهانی گسترش یافته‌اند. برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی متمرکز سنتی برای پاسخ به تغییرات سریع بازار به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیر نیست. در چنین محیطی، کارخانه‌های تولیدی به‌تنهایی در شکل کلاسیک آن ممکن است به علت بروز یک مشکل در نقطه‌ای خاص، تولید کلی را متوقف کنند. این دلایل باعث می‌شود که کارخانه‌ها برای همکاری نزدیک‌تر با یکدیگر ادغام شوند و یک شبکه تولید چندکارخانه‌ای[1] تشکیل دهند [۶]. به بیان دقیق‌تر منظور از سیستم تولید چندکارخانه‌ای، قرارگرفتن چندین کارخانه در مناطق مختلف جغرافیایی برای دستیابی به سود و منفعت کلی بیشتر و رسیدن به روند جهانی‌شدن، است. این ادغام اجازه می‌دهد تا کارخانه‌ها به مشتریان خود نزدیک‌تر شوند، کارمندان حرفه‌ای استخدام کنند، تطابق بیشتری با قوانین محلی داشته باشند، محصولات مؤثرتر تولید کنند و به تغییرات بازار واکنش سریع‌تری نشان دهند. تفاوت‌های اساسی بین تولید تک‌کارخانه‌ای و چندکارخانه‌ای این است که در تولید تک‌کارخانه‌ای، محصولات به‌وسیله یک نهاد تولید می‌شوند و سپس به بازار عرضه می‌شوند؛ اما در تولید چندکارخانه‌ای، محصولات در چند کارخانه تولید می‌شوند که شاید این کارخانه‌ها در مناطق مختلف واقع شده باشند؛ بنابراین گاهی اوقات ممکن است بتوانند از فواید چنین ادغامی سود ببرند [۳]. علاوه بر این کارخانه‌ها توانایی انجام‌دادن همه نوع کاری را ندارند؛ به‌عبارت‌دیگر در انجام برخی کارها شایستگی کارخانه‌ای وجود دارد. اساساً دو نوع مسئله زمان‌بندی توزیع‌شده در محیط‌های چندکارخانه‌ای وجود دارد. در نوع نخست، همه کارخانه‌ها به یک شرکت تعلق دارند. آن‌ها برای افزایش سود کلی مجموع کارخانه‌ها با یکدیگر همکاری می‌کنند. آن‌ها حاضر هستند ضررهای فردی داشته باشند؛ ولی شرکت کل سود داشته باشد و درآمد کلی شرکت افزایش یابد. نوع دوم «شرکت‌های مجازی» نامیده می‌شود و یک تعداد از شرکت‌های مختلف

1. Production network scheduling

هستند که به یکدیگر ملحق شده و یک شبکه چندکارخانه‌ای را تشکیل می‌دهند که در آن هر کارخانه می‌تواند کارهای اقتصادی و شخصی زیادی را انجام دهد؛ اما در چنین شبکه‌هایی هر شرکت معمولاً بر سود خودش متمرکز است. آن‌ها برای حداکثرکردن سود خودشان برنامه‌ریزی می‌کنند و توجهی به دیگر شرکت‌های درون شبکه ندارند [۹]. پژوهش حاضر شبکه نوع اول را در نظر می‌گیرد که در آن همه کارخانه‌ها به‌طور هم‌زمان کار می‌کنند و برای اجرای یک برنامه تولیدی بهینه مشارکت می‌کنند.

مسئله زمان‌بندی چندکارخانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این نوع از مسائل بدین صورت هستند که در آن‌ها کارها در یک محل و به‌طور متمرکز انجام نمی‌گیرند؛ بلکه در کارخانه‌های مختلف و حتی در نقاط مختلف جغرافیایی پردازش می‌شوند. مسئله‌ای که وجود دارد این است که کارها به کدام کارخانه و در هر کارخانه به کدام ماشین تخصیص می‌یابد. پژوهش‌های گذشته در زمینه تولید چندکارخانه‌ای، کارخانه‌ها با ماشین‌های موازی را موردبررسی قرار داده‌اند؛ ولی در مسئله موردنظر ماشین‌ها در محیط هر کارخانه به‌صورت موازی غیرمرتبط هستند که از این نظر، پژوهش حاضر دارای نوآوری است و درواقع شکاف پژوهشی موجود را پر می‌کند. با درنظرگرفتن زمان‌های آماده‌سازی بین کارها که نه‌تنها به توالی کارها وابسته است، بلکه به ماشینی که کار به آن تخصیص می‌یابد نیز مربوط است و زمان‌های پردازش وابسته به ماشین سعی می‌شود تا مسئله به مسائل دنیای واقعی نزدیک شود [۱]. زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتبط حالت عمومی مسائل کلاسیک زمان‌بندی ماشین‌های موازی به‌شمار می‌آید. در یک مسئله کلاسیک زمان‌بندی ماشین‌های موازی، مجموعه‌ای از کارهای مستقل وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بر روی یکی از ماشین‌های موازی یکسان موجود پردازش می‌شوند. در حالت کلی ماشین‌های موازی به‌صورت نامرتبط در نظر گرفته می‌شوند، اگر زمان پردازش کارها بر روی ماشین‌ها نه‌تنها به نوع کار، بلکه به نوع ماشین نیز وابسته باشد. در این حالت پیکربندی ماشین‌ها یکسان نیست و رابطه مشخصی بین زمان‌های پردازش کارها بر روی ماشین‌های موازی مختلف وجود ندارد. یک نمونه واقعی از کاربرد این مسئله مرتبط با پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) است که در آن هر کار تحت دو فرآیند است: فرآیند تراشکاری و سپس فرآیند سوراخ‌کاری. ابتدا فرآیند تراشکاری توسط یکی از ماشین‌های موازی یکسان انجام می‌شود و سپس یکی از ماشین‌های فرز نامرتبط کار را پردازش می‌کند [۳۱].

در اینجا زمان‌بندی تولید چندکارخانه‌ای موردتوجه قرار گرفته که در آن کارخانه‌های متعلق به یک شرکت در قالب یک شبکه تولید چندکارخانه‌ای مشارکتی با یکدیگر فعالیت می‌کنند تا تابع هدف کلی سیستم که حداکثر زمان تکمیل کارها (C_{max}) است، بهبود یابد. در ضمن در اینجا فرض شده است که ماشین‌ها در هر کارخانه به‌صورت ماشین‌های موازی غیرمرتبط با درنظرگرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی کارها را پردازش می‌کنند و در روند حل

مسئله در یک فرآیند دوتخصیصی، ابتدا کار به کارخانه مناسب و سپس به ماشین مناسب در آن کارخانه تخصیص می‌یابد. کاربردهای زیادی از این مسئله در دنیای واقعی وجود دارد. برای مثال، وستفیلد[1] (۱۹۵۵)، مسئله‌ای را در صنایع تولید نیروی برق بررسی کرد که در آن کارخانه‌های تولیدکننده در مکان‌های مختلف جغرافیایی پراکنده بودند تا بتوانند به مشتریان خود خدمت بهتری ارائه دهند [۲۸]. نمونه کاربردی دیگر از مسئله تولید چندکارخانه‌ای در پژوهش لئونگ[2] و همکاران، آورده شده است [۲۰]. آن‌ها مطالعه‌ای بر روی شرکت چندملیتی تولید لباس در هنگ‌کنگ انجام دادند. نمونه‌های دیگری نیز از تولید چندکارخانه‌ای در صنایع شیمیایی و غذایی یافت می‌شود که تیمپ و کالراس[3] (۲۰۰۰)، به آن پرداخته‌اند [۲۶]. تولید در صنعت خودرو از نمونه‌های دیگر کاربردهای تولید چندکارخانه‌ای است [۱۱]. پژوهش ژنونی[4] و همکاران (۲۰۰۳)، نمونه دیگری از کاربرد شبکه‌های تولید چندکارخانه در صنعت خودرو است که در آن وابستگی بیشتری در بین تأمین‌کنندگان آن وجود دارد [۱۸]. در مثالی دیگر، چن و همکاران (۲۰۰۹)، به پژوهش روی این موضوع در صنعت LCD پرداختند [۱۳]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌دلیل افزایش تقاضاهای مشتریان پایین‌دست، بسیاری از تولیدکنندگان مجبور به ایجاد ظرفیتی اضافه از طریق کارخانه‌های جدید هستند که در آن هر کارخانه در نقطه متفاوت جغرافیایی قرار گرفته است. ازآنجاکه مسئله زمان‌بندی چندکارخانه‌ای معادل زمان‌بندی کلاسیک در شرایطی است که در آن تنها یک کارخانه وجود دارد و مسئله زمان‌بندی کلاسیک ماشین‌های موازی حتی با دو ماشین هم مسئله NP-Hard است؛ بنابراین مسئله زمان‌بندی چندکارخانه‌ای نیز NP-Hard بوده و درنتیجه برای حل آن در زمان معقول، به‌خصوص در ابعاد بزرگ نیاز به استفاده از ابتکاری/ فراابتکاری‌ها است [۲۱]. به این منظور پس از پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط از الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت رقابت استعماری برای نزدیک‌شدن به جواب بهینه استفاده شده است.

در ادامه و پس از ارائه مبانی نظری و مرور پیشنه پژوهش در بخش دوم، در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش مشتمل بر بیان مسئله، مدل‌سازی و الگوریتم حل ارائه خواهد شد. بخش چهارم به تحلیل داده‌ها و و یافته‌های پژوهش اختصاص دارد. درنهایت و در بخش پایانی مقاله، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

1. Westfield
2. Leung
3. Timpe & Kallrath
4. Gnoni

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

روند جهانی‌سازی موجود سبب پیدایش رقابتی شدید برای کسب هر چه بیشتر منافع در میان تولیدکنندگان شده است. از طرفی سیستم‌های تولید سنتی به دلایل زیر قادر به پاسخگویی به بازارهای امروزی نیستند [۱۰].

۱. زمان پاسخ به برآشفتگی‌های تصادفی بزرگ در بازار، به‌دلیل کندبودن سیستم‌های تولید سنتی، رضایت‌بخش نیست؛

۲. اطلاعات ناکافی، نادرست و غیرقابل‌اعتماد به‌دلیل بزرگی جغرافیایی توزیع مشتریان سبب شده است تا تصمیم‌گیرندگان بر پایه حدس و یا اطلاعات بسیار کم تصمیم‌گیری کنند؛

۳. ساختار سازمانی سیستم‌های سنتی ازپیش‌تعیین‌شده و بسیار خشک است و این امر سبب می‌شود که در برابر پیدایش بازارهای جدید و تغییرات آن منعطف نباشند.

کارخانه‌ها در چنین شرایطی برای حفظ شرایط رقابت‌پذیری در چنین بازارهایی، تصمیم به ایجاد شبکه تولید متشکل از چندین کارخانه می‌گیرند. امروزه این ساختار که به آن‌ها «سیستم‌های تولید توزیع‌شده» گفته می‌شود، اهمیت روزافزونی یافته‌اند؛ به‌گونه‌ای که تولید در محیط توزیع‌شده در شبکه تولید چندکارخانه‌ای جزو جذاب‌ترین موضوعات شده است [۷]. یکی از تأثیرات مهم ایجاد چنین شبکه‌هایی دردسترس‌بودن منابع ارزان‌تر، توانایی تولید بالاتر و مواجه سریع‌تر با تغییرات موجود است؛ همچنین از دیگر فواید ایجاد چنین سیستم‌هایی، عدم‌توقف کل روند تولید در صورت خرابی یکی از عوامل است؛ چراکه در حالت تولید متمرکز در یک کارخانه، وقوع توقف در تولید اجتناب‌ناپذیر بوده و ممکن است به بهای ازدست‌رفتن کل سفارش تولید شود. داشتن عکس‌العمل‌های سریع‌تر و بهتر در مقابل تغییرات از دیگر انگیزه‌های اصلی تولیدکنندگان در جهت توسعه کارخانه‌ها از طریق ایجاد شبکه‌های قدرتمند تولید است. از دیگر مزایای ایجاد شبکه‌های تولیدی آن است که اعضا می‌توانند در مواقع نیاز به‌سرعت و به‌صورت کارا منابع تولیدی دردسترس خود را در جهت تولید هرچه‌بهتر کارها در سرتاسر شبکه به‌اشتراک بگذارند [۳].

برای بررسی پژوهش‌های انجام‌شده طی چند سال اخیر روی موضوع موردبحث، یعنی زمان‌بندی چندکارخانه‌ای با ماشین‌های موازی غیرمرتبط، به‌دلیل جدیدبودن موضوع موردبحث، در دو بخش به این کار پرداخته خواهد شد:. بخش نخست به مطالعات انجام‌گرفته روی زمان‌بندی چندکارخانه‌ای اختصاص می‌یابد و بخش دوم به پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه ماشین‌های موازی غیرمرتبط مربوط است. بهنامیان (۲۰۱۷)، یک مدل ریاضی و یک الگوریتم جدید برای حل زمان‌بندی شبکه تولید توزیع‌شده با کارخانه‌های موازی غیرهمگن قرارگرفته در مکان‌های مختلف جغرافیایی ارائه کرد [۷]. وی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات آشفته را برای حداقل‌کردن زمان تکمیل کارها به‌کار گرفت. ایده این الگوریتم از جامعه‌ای گرفته شده است که

در آن اعضا به‌طور آشفته رفتار می‌کنند تا موقعیت خود را بهبود بخشند. این الگوریتم می‌تواند از گیرافتادن در تله‌های بهینگی محلی ممانعت کند. در آخر کارایی بهینه‌سازی گروه ذرات آشفته، بهینه‌سازی گروه ذرات استاندارد و الگوریتم ژنتیک را روی مسائل نمونه‌ای آزمایش کردند. در ارتباط با بخش دوم که مربوط به پیشینه تحقیق زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیر مرتبط است، گلس و همکاران (۱۹۹۴)، برای حل مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط از جست‌وجوی محلی استفاده کردند [۱۷]. شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی ممنوع از روش‌های جست‌وجوی محلی برای پیداکردن جواب‌های تقریبی به یک سری مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی هستند. در این پژوهش از این تکنیک‌ها برای حداقل‌کردن حداکثر زمان تکمیل استفاده شده است. تکنیک‌های یادشده در عملکرد، قابل‌مقایسه با الگوریتم ژنتیک ترکیبی با نزول هستند. ونگ و همکاران (۲۰۰۱)، زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط را با درنظرگرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و تابع هدف زمان تکمیل وزن‌دار بررسی کردند [۲۷]. مطالعه مسئله از یک مسئله صنعتی خدماتی واقعی نشئت گرفت. این مسئله حتی با وجود دو ماشین همسان و عدم‌درنظرگرفتن زمان‌های آماده‌سازی، NP-Hard است. آن‌ها هفت الگوریتم ابتکاری را برای حل مسئله مطرح و آزمایش کردند. نتایج و تحلیل کلیه آزمایش‌های محاسباتی گسترده گزارش شد. توکلی‌مقدم و همکاران (۲۰۰۹)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته دوسطحی جدید برای زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط مطرح کردند [۲۵]. در این تحقیق به عنوان توابع هدف، حداقل سازی تعداد کارهای دارای دیرکرد و زمان تکمیل کل کارها در نظر گرفته شده است. زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت‌های تقدم نیز در مدل در نظر گرفته شدند. به‌دست‌آوردن یک جواب بهینه برای این مسئله پیچیده و بزرگ در زمان محاسباتی منطقی با به‌کارگیری رویکردها یا ابزارهای بهینه‌سازی سنتی خیلی سخت است؛ درنتیجه یک الگوریتم ژنتیک کارا برای حل مسئله دوهدفه پیشنهاد شد.

در حل مسائل زمان‌بندی، روش‌های مختلفی بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهاد شده است که از این میان می‌توان به پژوهش ویلیامز (۱۹۸۱)، اشاره کرد [۱۹]. این مطالعه نخستین پژوهش انجام‌شده در موضوع زمان‌بندی توزیع‌شده چندکارخانه‌ای است. در این پژوهش، ویلیامز (۱۹۸۱)، زمان‌بندی مشترک را در مسئله تولید و توزیع در شبکه‌های پیچیده در نظر گرفت. او به این منظور روشی بر اساس برنامه‌ریزی پویا پیشنهاد داد و برای بررسی کارایی، آن را با روش‌های ابتکاری موجود در محیط تولیدی متمرکز مقایسه کرد. در این پژوهش تابع هدف، حداقل‌کردن هزینه‌های تولید و توزیع در هر دوره زمانی بود. یکی از ضعف‌های پژوهش ویلیامز، ثابت فرض کردن نرخ تقاضا است که این فرض از کاربردی‌بودن آن کاسته است. بهدانی و همکاران (۲۰۱۰)، سازمان چندکارخانه‌ای را در صنایع شیمیایی به‌عنوان یک شرکت پیچیده از تولیدکنندگان توزیع‌شده در نقاط مختلف جغرافیایی که وظیفه تولید و توزیع محصولات خاص را

بر عهده دارند، در نظر گرفتند [۲]. با درنظرگرفتن برخی شرایط غیرعادی و واقعی کننده مسئله، آن‌ها نشان دادند که چگونه مدل‌های بر پایه عوامل می‌توانند رفتار پویای موجود در شبکه چندعاملی را منعکس کنند. به این منظور آن‌ها در این‌گونه مدل‌ها سازوکارهای مختلفی را مقایسه کردند تا رفتار مدل پیشنهادی را در شرایط برابر پویا در دو حالت متمرکز و توزیع‌شده موردمطالعه قرار دهند. در بازار بین‌المللی امروز، هیچ کارخانه کوچکی نمی‌تواند وجود مستقل پایدار داشته باشد و بنابراین در نوع دوم ساختار موازی، تعدادی از شرکت‌های مختلف برای تشکیل یک شبکه تولید یکپارچه می‌شوند. در این حالت، شرکت‌ها می‌توانند از لحاظ اقتصادی به‌طور جداگانه کار کنند. با روند جهانی‌شدن در دنیای واقعی، کارخانه‌ها در سرعت‌های مختلف به‌سوی یکپارچه‌سازی حرکت می‌کنند؛ همچنین توسعه شبکه حمل‌ونقل ارزان و ارتباطات این روند را تسریع می‌دهد [۴]. رویز و همکاران (۲۰۱۹)، دو الگوریتم حریصانه برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی جایگشتی توزیع‌شده ارائه دادند [۲۴]. سیسرلو و اسمیت (۲۰۰۴)، بر مساله پیکربندی ماشین‌های چند منظوره موازی در یک کارخانه برای برآوردن بهترین خواسته‌های محصول در طول زمان در یک سیستم چند عاملی تمرکز کردند. در این تحقیق از الگوریتم بر پایه زنبور برای تعیین اینکه کدام مشاغل جدید باید در صف ماشین پذیرفته شوند، استفاده شد [۱۴]. مسئله درنظرگرفته‌شده در این پژوهش، شبکه تولید و توزیع شامل چندین کارخانه موازی در کشورهای خارجی و یک مرکز توزیع داخلی است. در این شبکه ابتدا کالاها در کارخانه‌ها پردازش و سپس به مرکز توزیع حمل می‌شود تا بین خرده‌فروشان کشورهای دیگر توزیع شوند. با توجه به تنوع در بهره‌وری و هزینه‌ها در کارخانه‌های مختلف، هزینه‌ها و زمان‌های پردازش بسته به آنکه کار در کدام کارخانه انجام شود، متفاوت است. پژوهشگران در این مقاله برای مسئله خود چهار تابع هدف مختلف در نظر گرفتند که همگی آن‌ها شامل زمان‌های تحویل هستند و هزینه‌های پیچیدگی مسئله بررسی و روشی ابتکاری برای آن ارائه شده است. بهنامیان (۲۰۱۴)، برای زمان‌بندی کارخانه‌های موازی توزیع‌شده با اتحاد مجازی یک الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی همسایگی متغیر و جست‌وجوی ممنوع مبتنی بر تجزیه ارائه داد [۵]. شبکه تولید مجازی نوعی سیستم توزیع‌شده است که در آن بخش‌های کوچک‌تر مسئله زمان‌بندی توسط تصمیم‌گیرندگان محلی حل می‌شود که احتمالاً توابع هدف متفاوتی نیز دارند. این شبکه، نوع جدیدی از مشارکت و روابط افقی بین کارخانه‌های مستقل است. کارخانه‌ها در این شبکه می‌توانند همسان یا غیرهمسان باشند. درواقع اتحاد مجازی به این معنا است که چند کارخانه برای تولید یک سفارش با هم همکاری می‌کنند. مسئله به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح آمیخته مدل‌سازی شد و نتایج نشان داد بیشتر جواب‌های الگوریتم مطرح‌شده نسبت به جواب‌های حل‌کننده سیپلکس در جبهه غیرغالب شبکه ایجاد شده‌اند. بهنامیان و فاطمی قمی (۲۰۱۲)، به زمان‌بندی تولید چندکارخانه‌ای پرداختند که در آن مجموعه‌ای از

تولیدکنندگان با مالکیت مستقل به یکدیگر ملحق می‌شوند تا یک شبکه تولید را ایجاد کنند [۸]. در این سیستم تولیدی که به نام «شبکه تولید توزیع‌شده با ارتباطات مجازی» نیز شناخته می‌شود، هر کارخانه به‌عنوان عضوی مجزا معمولاً بر منافع شخصی خود متمرکز است و برای بهبود آن تلاش می‌کند و کمتر دغدغه منافع سایر اعضا را دارد. تابع هدف، مجموع زمان‌های تکمیل پیشنهاد [۲۴] شده است و با وجود تک‌هدفه‌بودن مسئله، بحث جواب‌های غالب و مغلوب برای نخستین بار در فضای مسائل تک‌هدفی مطرح شد. برای حل مسئله الگوریتم ترکیبی بر پایه بهینه‌سازی گروه ذرات و روش هایپرهیوریستیک ارائه شد.

زیدی و حسینی (۲۰۱۵)، یک مدل ریاضی جدید برای زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط با زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی در نظر گرفتند و به‌خاطر پیچیدگی مسئله یک رویکرد فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله طراحی کردند. آن‌ها تابع هدف را حداقل‌کردن هزینه کل دیرکرد و زودکرد در نظر گرفتند [۳۰]. کای و همکاران (۲۰۱۸)، زمان‌بندی جریان کارگاهی توزیع‌شده را با محدودیت‌های حمل‌ونقل موردبررسی قرار دادند [۱۲]. آن‌ها یک مدل ریاضی را با هدف به‌حداقل‌رساندن حداکثر زمان تکمیل، حداکثر تأخیر، هزینه حمل‌ونقل و هزینه‌های راه‌اندازی ارائه دادند. به این منظور و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تر، چندین الگوریتم ابتکاری و یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله چندهدفه در این پژوهش ارائه شد. برای نخستین بار، ینگ و لین (۲۰۱۸)، مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف چندکارخانه‌ای را بررسی کردند [۲۹]. آن‌ها برای حل این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط و یک الگوریتم حریصانه خودتنظیم‌شونده را برای به‌حداقل‌رساندن حداکثر زمان تکمیل پیشنهاد دادند. در الگوریتم پیشنهادی از روش رمزگشایی جدیدی استفاده شد. مردانی و فاطمی قمی (۲۰۱۹)، زمان‌بندی چندکارخانه‌ای در ساختار شبکه را مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. در این پژوهش سعی شد با درنظرگرفتن امکان ارسال دسته‌ای و استفاده از روش حل بر پایه فضای ابری، نگاهی نو به مسئله زمان‌بندی ایجاد شود. در این پژوهش، روشی بر پایه شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده است. به‌تازگی قرائی و جولایی (۲۰۲۱)، با توجه به تصمیمات تحویل دسته‌ای و مسیریابی بین مشتریان، یک مدل ریاضی برای مسئله زمان‌بندی و توزیع یکپارچه در یک محیط چندکارخانه ارائه دادند. با توجه به پیچیدگی مسئله، از الگوریتم کلونی مورچگان در این پژوهش استفاده شد [۱۶]. خلاصه‌ای از پژوهش‌های صورت‌گرفته در جدول ۱، ارائه شده است تا شکاف پژوهشی موجود مشخص شود.

بر این اساس و با توجه به مرور مبانی نظری می‌توان گفت با وجود آنکه پژوهشگران، بسیاری از مسائل زمان‌بندی چندکارخانه‌ای را با درنظرگرفتن توابع هدف مختلف و محدودیت‌هایی که مسائل را به دنیای واقعی نزدیک می‌کنند، بررسی کرده‌اند، اما جای خالی این نوع مسائل در محیط‌هایی با دارابودن ماشین‌های موازی غیرمرتبط (ناهمسان) و زمان‌های

آماده‌سازی وابسته به توالی به‌عنوان یک ویژگی کاملاً بارز و اثرگذار در روند تصمیم‌گیری احساس می‌شود؛ ازاین‌رو پژوهش حاضر به بررسی مسئله زمان‌بندی چندکارخانه‌ای با ماشین‌های موازی غیرمرتبط با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی می‌پردازد تا بخشی از شکاف پژوهشی موجود پر شود. برای مدل‌سازی پژوهش نیز دو نوع مدل‌سازی مرسوم (مدل‌سازی بر اساس تخصیص و توالی) برای نخستین بار یکدیگر ترکیب شده‌اند؛ همچنین به‌دلیل پیچیدگی مسئله موردبررسی، از الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری برای حل مسئله استفاده می‌شود که در پژوهش‌های پیشین کمتر به‌کار گرفته شده است.

جدول ۱. خلاصه مرور مبانی نظری پژوهش

پژوهشگر (سال)	مراکز تولیدی		تابع هدف				روش حل	
	تک‌کارخانه‌ای	چن‌کارخانه‌ای	تک‌هدفه	اهداف چندگانه	ماشین‌های موازی غیرمرتبط	زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی	(فرا) ابتکاری	دقیق
ویلیامز، (۱۹۸۱)		✓	✓					✓
ژانگ و همکاران، (۲۰۲۱)		✓		✓				✓
بهنامیان، (۲۰۱۴)		✓		✓			✓	
بهنامیان، (۲۰۱۴)		✓	✓				✓	
بهنامیان و فاطمی قمی، (۲۰۱۲)		✓		✓			✓	✓
مردانی و فاطمی قمی، (۲۰۱۹)		✓	✓				✓	
گلس و همکاران، (۱۹۹۴)	✓		✓		✓		✓	
توکلی‌مقدم و همکاران، (۲۰۰۹)	✓			✓	✓	✓	✓	
زیدی و حسینی (۲۰۱۵)	✓			✓	✓	✓	✓	
بهدانی و همکاران، (۲۰۱۰)		✓	✓				✓	
رویز و همکاران، (۲۰۱۹)		✓	✓				✓	
چن و همکاران، (۲۰۰۹)		✓	✓				✓	
ونگ و همکاران، (۲۰۰۱)	✓		✓		✓	✓	✓	
ییِنگ و لین، (۲۰۱۸)		✓	✓				✓	
ژانگ و همکاران، (۲۰۲۱)	✓		✓		✓		✓	
سیسرلو و اسمیت، (۲۰۰۴)		✓	✓				✓	
پژوهش حاضر		✓	✓		✓	✓	✓	

۳. روش‌شناسی پژوهش

بیان مسئله و مدل‌سازی. در این پژوهش فرض شده است که مجموعه‌ای از F کارخانه موازی با ساختار ماشین‌های موازی ناهمسان یک شبکه تولید توزیع برای برآورد تقاضای مشتریان ایجاد کرده‌اند. هدف از این پژوهش، زمان‌بندی کارهای تخصیصی به این شبکه با تابع هدف حداقل‌کردن حداکثر زمان انجام کارها است که در آن برای واقعی‌ترشدن مسئله، فرض زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی نیز در نظر گرفته شده است. مفروضات مدل پژوهش عبارت است از: ۱. مسئله F کارخانه موازی با ماشین‌های موازی غیرمرتبط دارد؛ ۲. n کار باید زمان‌بندی شوند که از هم مستقل و بدون اولویت هستند؛ ۳. هر کار باید دقیقاً به یکی از کارخانه‌های تولیدی تخصیص داده شود؛ ۴. زمان آماده‌سازی وابسته به توالی است؛ یعنی با توجه به اینکه کار قبلی چه باشد، تغییر می‌کند و ۵. همه کارها و ماشین‌ها در ابتدای برنامه‌ریزی دردسترس هستند.
مدل مسئله موردنظر با معرفی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها در ادامه شرح داده می‌شود:

شمارنده‌ها

n: تعداد کارها

i , j , k: شمارنده کارها

f : شمارنده کارخانه‌ها

h: شمارنده ماشین‌ها

پارامترها

m^f: تعداد ماشین‌ها در کارخانه f

P_{hj}: زمان پردازش استاندارد کار j روی ماشین h

S_{hij}: زمان آماده‌سازی کار j که بعد از کار i روی ماشین h قرار گرفته است

L: یک عدد بزرگ مثبت

متغیرهای تصمیم

x_{hij}^f: اگر کار j بلافاصله بعد از کار i روی ماشین h در کارخانه f تخصیص داده شود، ۱؛ در غیر این صورت صفر.

y_{hi}^f: اگر کار i به ماشین h در کارخانه f تخصیص داده شود، ۱؛ در غیر این صورت صفر.

C_{hi}^f: زمان تکمیل کار i روی ماشین h در کارخانه f

C_{max}: حداکثر C_{hi}^f

با توجه به تعاریف ارائه‌شده، مدل پیشنهادی به شرح زیر است.

رابطه (۱) $Z= \text{Min } C_{max}$

رابطه (۲) $\text{S.t.:} \sum_{h=1}^{M}\sum_{f=1}^{F} y_{hi}^{f} = 1 \qquad i = 1\ldots n$

رابطه (۳) $\sum_{h=1}^{M}\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{n}\sum_{f=1}^{F} x_{hij}^{f} = 1 \qquad j = 1\ldots n$

رابطه (۴) $\sum_{h=1}^{M}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n}\sum_{f=1}^{F} x_{hij}^{f} \leq 1 \qquad i = 1\ldots n$

رابطه (۵) $\sum_{h=1}^{M}\sum_{f=1}^{F}\left(x_{hij}^{f} + x_{hji}^{f}\right) \leq 1 \qquad i = 1\ldots n-1,\ j > i$

رابطه (۶) $\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{n} x_{hij}^{f} + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq j}}^{n} x_{hjk}^{f} = 2y_{hj}^{f} \quad j = 1\ldots n;\ f = 1\ldots F; h = 1\ldots M$

رابطه (۷) $C_{hj}^{f} + L\left(1 - x_{hij}^{f}\right) \geq C_{hi}^{f} + S_{hij}^{f} + P_{hj}^{f}$

$i = 0\ldots n\ ;\ j = 1\ldots n; h = 1\ldots M;\ f = 1\ldots F$

رابطه (۸) $C_{hi}^{f} \geq 0 \qquad h = 1\ldots M;\ i = 1\ldots n;\ f = 1\ldots F$

رابطه (۹) $C_{max} \geq C_{hi}^{f} \qquad h = 1\ldots M; i = 1\ldots n;\ f = 1\ldots F$

رابطه (۱۰) $x_{hij}^{f}\ , y_{hi}^{f} \in \{0,1\}$

$i = 0\ldots n;\ j = 1\ldots n; h = 1\ldots M;\ f = 1\ldots F;\ j \neq i$

عبارت ۱، تابع هدف است که زمان تکمیل آخرین کار را نشان می‌دهد و باید حداقل شود. محدودیت ۲، مشخص می‌کند که هر کار باید به یک ماشین در یک کارخانه تخصیص داده شود. محدودیت ۳، نشان می‌دهد که هر کار در هر کارخانه دقیقاً روی یک ماشین پردازش می‌شود. محدودیت ۴، مشخص می‌کند که هر کار روی هر ماشین در هر کارخانه می‌تواند حداکثر یک کار را به‌عنوان کار بعدی داشته باشد. محدودیت ۵، از ایجاد جواب‌های غیرموجه بدین نحو که یک کار هم‌زمان کار بعدی و قبلی کار دیگری باشد، جلوگیری می‌کند. محدودیت ۶، نشان می‌دهد اگر کاری به کارخانه‌ای خاص اختصاص یابد، دقیقاً یک کار قبلی و یک کار بعدی در همان کارخانه خواهد داشت و در غیر این صورت هیچ رابطه توالی بین این کارها وجود نخواهد داشت. محدودیت ۷، ارتباط بین زمان تکمیل کارهای i و j را با درنظرگرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی اگر بلافاصله بعد از یکدیگر روی یک ماشین پردازش شوند را نشان می‌دهد. محدودیت ۸، گویای این است که مدت‌زمان انجام هر کار روی ماشین خاص در

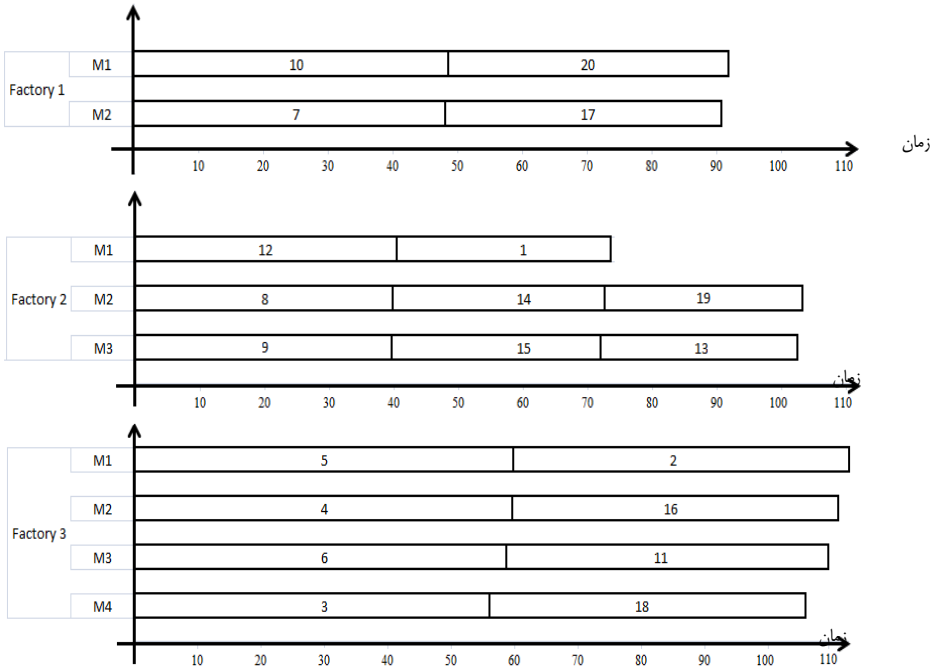
کارخانه خاص مقداری نامنفی است. محدودیت ۹، زمان تکمیل کل کارها را محاسبه می‌کند و محدودیت ۱۰، مربوط به وضعیت باینری متغیرهای مدل است.

برای اعتبار سنجی مدل در این بخش مثال عددی حل شده است. به این منظور مسئله‌ای با سه کارخانه ناهمسان به‌ترتیب با ۲، ۳ و ۴ ماشین و سرعت ۱/۳۴، ۱/۶۹ و ۱/۰۶ در نظر گرفته شده است. جدول ۲، نشان‌دهنده زمان‌های پردازش ۲۰ کاری است که باید به‌وسیله این کارخانه‌ها پردازش شوند.

جدول ۲. زمان پردازش کارها

کار	زمان پردازش	کار	زمان پردازش	کار	زمان پردازش	کار	زمان پردازش
۱	۵۳/۵۹	۶	۸۰/۶۲	۱۱	۲۳/۵۴	۱۶	۲۰/۵۵
۲	۶۷/۵۷	۷	۶۵/۶۵	۱۲	۱۶/۶۸	۱۷	۷۳/۵۷
۳	۷۹/۶۰	۸	۲۳/۶۷	۱۳	۲۶/۵۰	۱۸	۳۷/۵۲
۴	۹۱/۶۳	۹	۸۳/۶۶	۱۴	۲۳/۵۹	۱۹	۲۴/۵۱
۵	۱۹/۶۴	۱۰	۹۵/۶۵	۱۵	۴۶/۵۸	۲۰	۱۷/۵۸

شکل ۱، نمودار گانت این مثال با کاربرد روش ابتکاری پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار گانت حل مسئله با استفاده از نرم‌افزار گمز

الگوریتم پیشنهادی. همان‌طور که عنوان شد، مسئله پژوهش حاضر یک مسئله‌ی NP-Hard است و درنتیجه روش‌های دقیق قادر به حل بهینه آن در زمان معقول نیستند. به این منظور استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌خصوص در ابعاد بزرگ، در این پژوهش موردتوجه قرارگرفته است [۱۵]. در این راستا بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته معطوف به استفاده از الگوریتم ژنتیک بوده است؛ درحالی‌که در این پژوهش به‌منظور استفاده از الگوریتم‌های جدید فراابتکاری، الگوریتم رقابت استعماری که الگوریتمی مبتنی بر جمعیت و مناسب حل مسائل زمان‌بندی است، انتخاب شده است. به‌طورکلی شبه‌کُد الگوریتم مورداستفاده در این پژوهش به شرح الگوریتم ۱ است.

در این الگوریتم، همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، روند جست‌وجو با تولید تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که «کشور» نامیده می‌شوند، آغاز می‌شود؛ سپس تعدادی از بهترین اعضای جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به‌عنوان امپریالیست انتخاب‌شده و باقیمانده جمعیت نیز به‌عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات به سمت خود جذب می‌کنند. در این روند، مبنای کشش قدرت کل هر امپراتوری است که متشکل از دو بخش است: کشور امپریالیست (به‌عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن. در مرحله بعد با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراتوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری موفق عمل کند و بر قدرت خود بیافزاید (یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف می‌شود و باقی استعمارگران قدرت خود را افزایش می‌دهند. درحقیقت در این الگوریتم، بقای یک امپراتوری وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب و به‌سیطره‌درآوردن آن‌ها خواهد بود؛ درنتیجه در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به‌تدریج قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد و امپراتوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراتوری‌ها برای افزایش قدرت خود مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را افزایش دهند.

الگوریتم ۱. شبه‌کُد الگوریتم رقابت استعماری

۱. ورود داده مسئله با توجه به روش نمایش جواب و تنظیم ویژگی‌های الگوریتم؛
۲. چند نقطه تصادفی روی تابع انتخاب کرده و امپراتوری‌های اولیه را تشکیل بده؛
۳. مستعمرات را به سمت کشور امپریالیست حرکت بده (سیاست همسان‌سازی یا جذب)؛
۴. عملگر انقلاب را اعمال کن؛
۵. اگر مستعمره‌ای در یک امپراتوری، وجود داشته باشد که هزینه‌ای کمتر از امپریالیست داشته باشد، جای مستعمره و امپریالیست را با هم عوض کن؛
۶. هزینه کل یک امپراتوری را حساب کن (با در نظر گرفتن هزینه امپریالیست و مستعمرات

آن‌ها)؛
۷. یک (یا چند) مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری انتخاب کرده و آن را به امپراتوری که بیشترین احتمال تصاحب را دارد، بده؛
۸. امپراتوری‌های ضعیف را حذف کن؛
۹. اگر تنها یک امپراتوری باقی‌مانده باشد، توقف کن وگرنه به ۴ برو.

در این پژوهش برای نخستین بار روش نمایش جدیدی برای حل مسئله موردبررسی ارائه شده است. در ادامه اپراتورهای مناسبی برای مراحل جذب و انقلاب در الگوریتم تعبیه شده که جزئیات آن به تفضیل شرح داده می‌شود.

روش نمایش جواب. در این پژوهش یک روش نمایش جواب چندبخشی به‌صورت زیر پیشنهاد شده است. در مرحله نخست یک رشته شامل اعداد بین صفر و یک تصادفی با طول $N + (F-1) + (\sum(M-1))$ است که در آن F تعداد کارخانه، M تعداد ماشین در هر کارخانه و N تعداد کارها است. برای مثال، شکل ۲، مسئله‌ای با دو کارخانه با دو ماشین و دو کار را نشان می‌دهد:

۰/۴۸	۰/۱۳	۰/۵۴	۰/۸۲	۰/۴۴

شکل ۲. رشته جواب

با توجه به مقادیر تولیدشده در مرحله قبل رشته زیر تولید می‌شود. به این منظور کوچک‌ترین عدد شکل رشته تصادفی بالا که ۰/۱۳ است، به نماد ۱ در خانه متناظر در رشته زیر عددگذاری می‌شود.

۳	۱	۴	۵	۲

سپس در رشته حاصل اعداد بزرگ‌تر از N به‌عنوان جداکننده با نماد * در نظر گرفته می‌شوند.

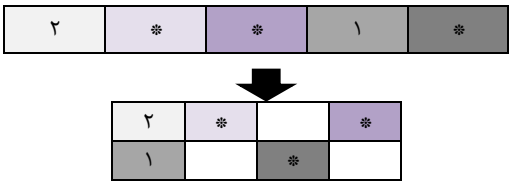
*	۱	*	*	۲

در مرحله بعدی ابتدا یک ماتریس تخصیص با ابعاد F و $\max(M)$ تعریف می‌شود.

$max(M)$

F				

یک خانه از این ماتریس از بالا سمت چپ به‌ترتیب به فضای بین جداکننده‌ها مربوط است؛ بنابراین به‌ترتیب از چپ، مطابق شکل ۳، اعداد وارد ماتریس می‌شوند. بدین ترتیب کارخانه و ماشین هر فعالیت مشخص می‌شود.



شکل ۳. ماتریس تخصیص

این نمایش جواب به یک جواب از مسئله به‌صورت زیر اشاره دارد.

$J=$ ۲	-
$J=$ ۱	-

برای مثال، فرض می‌شود مسئله حاضر زمان‌بندی پنج کار در دو کارخانه با دو ماشین در کارخانه اول و ۳ ماشین در کارخانه دوم باشد. روش نمایش جواب به‌صورت زیر خواهد بود.

ترتیب کارها	۵	۳	۴	۱	۲
کارخانه	۲	۲	۱	۲	۱
ماشین	۲	۳	۲	۱	۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ردیف اول ترتیب کارها را نشان می‌دهد، در ردیف دوم شماره کارخانه‌ای که کار موردنظر در بالای ستون مربوطه در آن پردازش شده است، ذکر می‌شود و در ردیف سوم شماره ماشین مربوطه در آن کارخانه لحاظ می‌شود.

جزئیات به‌کارگیری الگوریتم رقابت استعماری

گام اول: در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسئله است. به این منظور، همان‌طور که در بخش روش نمایش جواب توصیف شد، یک آرایه از متغیرهای مسئله ایجاد می‌شود. در الگوریتم ژنتیک این آرایه، «کروموزوم» نامیده می‌شود. در اینجا نیز آن را یک کشور می‌نامند. در یک مسئله بهینه‌سازی N_{var} بعدی، یک کشور، یک آرایه به طول N_{var} * ۱ است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

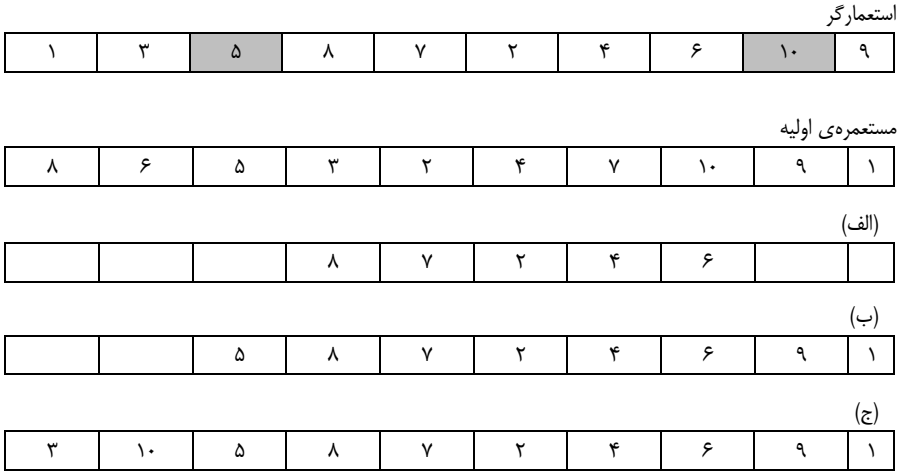
$Country = [p_1, p_2 ... p_{Nvar}]$

برای شروع الگوریتم، به تعداد $N_{country}$ کشور اولیه ایجاد می‌شود. از این میان N_{imp} عضو از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به‌عنوان امپریالیست انتخاب می‌شود و N_{col} کشور باقی‌مانده مستعمرات را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراتوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالست‌ها، به هر امپریالیست تعدادی از مستعمرات که این تعداد، متناسب با قدرت آن امپراتوری است، تخصیص داده می‌شود [۱۲].

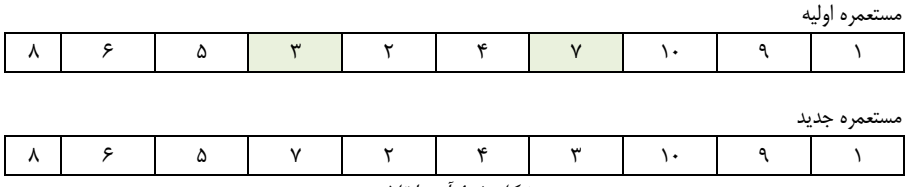
گام دوم: در فرآیندی به نام جذب، حرکت مستعمره‌ها به سمت امپریالیست اتفاق می‌افتد. در الگوریتم ارائه‌شده، در مرحله سیاست جذب به تنوع جواب‌ها اهمیت داده می‌شود و تا جایی که ممکن است بیشتر جواب‌ها بررسی می‌شوند تا تنوع جواب‌ها افزایش یابد. برای معتبربودن نتایج جست‌وجو باید تقریباً اطمینان حاصل شود که همه جواب‌ها بررسی شده‌اند که این کار امکان‌پذیر نیست؛ ولی حداقل می‌توان جواب‌های متنوعی را بررسی کرد تا اعتبار نتایج بالا باشد. در مسئله حاضر در این پژوهش برای اجرای سیاست جذب از عملگر مطابقت جزئی استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا دو خانه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند؛ سپس میان خانه‌های مابین دو خانه از استعمارگر و خانه‌های مابین آن دو خانه از مستعمره تناظر برقرار می‌شود. خانه‌های بین آن دو خانه جابه‌جا شده و خانه‌های باقی‌مانده از روی رابطه تناظر کپی می‌شوند. در شکل ۴، برای یک مثال با ۱۰ کار، فرض می‌شود خانه‌های ۳ و ۹ استعمارگر انتخاب شده‌اند؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خانه‌های مابین خانه‌های ۳ و ۹ استعمارگر در خانه‌های متناظر در مستعمره جذب‌شده کپی شده‌اند (شکل ۴ ـ الف). پس تاکنون در مستعمره جذب‌شده، شماره کارهای {۸، ۷، ۲، ۴ ،۶} کپی شده‌اند. مجموعه کارهای {۱، ۳، ۵، ۹، ۱۰} از استعمارگر در مستعمره جذب‌شده کپی نشده‌اند که با حذف کارهایی که در مجموعه تناظرها موجود هستند، مجموعه کارهای {۹، ۵، ۱} باقی می‌ماند که آن‌ها نیز به همان ترتیب که در مستعمره اولیه ظاهر شده‌اند، در مستعمره جذب‌شده کپی می‌شوند (شکل۴ ـ ب). در پایان نیز مقادیر ۳ و ۱۰ به همان ترتیبی که در مستعمره اولیه قرار دارند، در خانه‌های خالی مستعمره جذب‌شده کپی می‌شوند (شکل ۴ ـ ج).

گام سوم: در مرحله انقلاب، همان‌طور که در شکل ۵، آمده است، ممکن است میزان تنوعی که در مرحله جذب ایجاد شده است، کافی نبوده و نیاز باشد که بخش‌های بیشتری از فضا جست‌وجو شود تا تنوع جواب‌ها افزایش یابد. نحوه رخ‌دادن انقلاب در یک مستعمره به این صورت است که دو خانه به تصادف انتخاب شده و کارهای قرارگرفته در آن دو خانه با هم جابه‌جا می‌شوند. در

شکل ۵، اگر خانه‌های انتخاب‌شده، خانه‌های چهار و هفت باشند، با توجه به مستعمره‌ی اولیه، مستعمره‌ی جدید به‌دست می‌آید.



شکل ۴. فرآیند جذب و نحوه تغییرات در مستعمره اولیه برای حرکت به سمت استعمارگر



شکل ۵. فرآیند انقلاب

گام چهارم: جابه‌جایی موقعیت مستعمره و امپریالیست صورت می‌گیرد.

گام پنجم: رقابت استعماری. قدرت یک امپراتوری به‌صورت قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود. این درصد بین صفر و یک است، که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نقش مستعمره‌ها در قدرت یک امپراتوری افزایش می‌یابد.

گام ششم: سقوط امپراتوری‌های ضعیف. در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه‌ناخواه امپراتوری‌های ضعیف به‌تدریج سقوط می‌کنند و مستعمراتشان به دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراتوری در نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهادشده، یک امپراتوری زمانی حذف‌شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

هدف از این بخش، طراحی آزمایش‌هایی برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی است. به این منظور از حل مدل ریاضی در ابعاد کوچک مسئله و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک الگوریتم رقیب استفاده شده است. برای ارزیابی نتایج الگوریتم رقابت استعماری مطرح‌شده، مسئله موردنظر به سه کلاس با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ دسته‌بندی می‌شود. به این منظور در ابعاد کوچک مسئله از الگوریتم ژنتیک و خروج گمز برای اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج استفاده شده است [۸]. در ابعاد متوسط و بزرگ نیز از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی مورچگان استفاده شد [۸، ۱۶]. لازم به ذکر است که تمامی الگوریتم‌ها ۱۰ بار اجرا شده و میانگین آن‌ها در قالب جداول ۱ تا ۳ گزارش شده است. تمامی الگوریتم‌ها در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۴ تحت ویندو ۷ در سیستم ۷ هسته‌ای اجرا شد و حل مدل ریاضی نیز توسط نرم‌افزار گمز صورت گرفت.

در روند پیاده‌سازی هر الگوریتم، نخستین گام تنظیم پارامترهای آن است. به این منظور برای الگوریتم ژنتیک از پژوهش بهنامیان و فاطمی قمی (۲۰۱۲) و برای الگوریتم کلونی مورچگان از پژوهش قرائی و جولایی (۲۰۲۱)، استفاده شده است [۸، ۱۶]. درضمن برای الگوریتم پیشنهادی با اجراهای متعدد، از طریق رویکرد تجربی، در یک جمعیت ۲۰ عضوی، ۵ امپراتوری در نظر گرفته شده است. احتمال انقلاب با نرخ ۵ درصد اعمال شده است.

نتایج عددی. در این بخش نتایج عددی به تفکیک ابعاد مسئله به ترتیب در جدول‌های ۳ تا ۵، برای مسائل کوچک، متوسط و بزرگ گزارش شده است. درضمن در اینجا شرط توقف الگوریتم، زمان توقف الگوریتم لحاظ شده است؛ به این صورت که زمان اجراها در هر یک از حالات (کوچک، متوسط و بزرگ) برای الگوریتم‌های موردمقایسه به‌صورت برابر در نظر گرفته شده است. یادآوری این نکته لازم است که اعداد داخل پرانتز در ستون ماشین، به‌ترتیب از چپ به راست، نشان‌دهنده تعداد ماشین‌ها موازی ناهمسان در هر یک از کارخانه‌ها است.

جدول ۳. نتایج محاسباتی کلاس مسائل کوچک

کارخانه	کار	ماشین	گمز	رقابت استعماری	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم کلونی مورچگان
۲	۲	(۲،۲)	۷	۷	۷/۲	۸/۱
۳	۳	(۲،۲،۱)	۷	۷	۸/۲	۱۰/۳
۲	۳	(۲،۲)	۷	۷/۶	۷/۹	۷/۸
۳	۳	(۳،۳،۱)	۷	۷	۸	۸/۸
۲	۵	(۲،۳)	۷	۹/۳	۱۲/۴	۱۳/۱
۴	۵	(۴،۳،۱،۴)	۷	۷/۷	۸/۹	۹/۲
۳	۹	(۳،۳،۳)	۷/۹	۱۳/۷	۱۵/۸	۱۵/۱

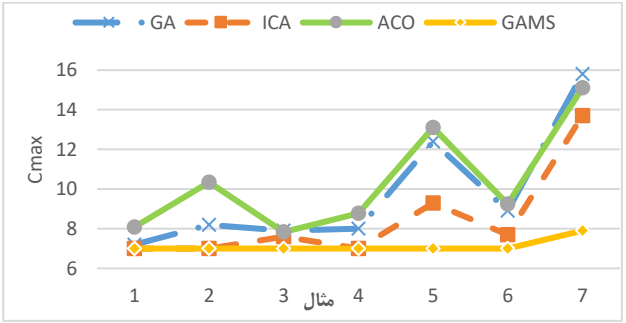
جدول ۴. نتایج محاسباتی کلاس متوسط

کارخانه	کار	ماشین	رقابت استعماری	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم کلونی مورچگان
۲	۲۵	(۳،۳)	۵۲/۲	۵۸/۷	۸۶/۹
۳	۲۵	(۳،۳،۳)	۳۸	۴۵/۹	۷۷
۵	۲۵	(۳،۳،۳،۳،۳)	۳۲	۳۵/۲	۷۱/۳
۵	۲۵	(۲،۳،۲،۳،۲)	۳۳/۷	۴۱/۷	۵۶/۸
۵	۲۵	(۵،۵،۵،۵،۵)	۲۴/۲	۲۷	۳۱/۹
۲	۵۰	(۳،۳)	۹۷/۶	۱۴۵	۱۹۸/۵
۳	۵۰	(۳،۳،۳)	۷۵/۷	۱۵۴	۱۵۲/۵
۵	۵۰	(۵،۵،۵،۵،۵)	۴۲/۳	۶۷	۶۵
۵	۵۰	(۲،۳،۲،۳،۲)	۶۱/۷	۱۵۳	۲۰۷/۸

جدول ۵. نتایج محاسباتی کلاس مسائل بزرگ

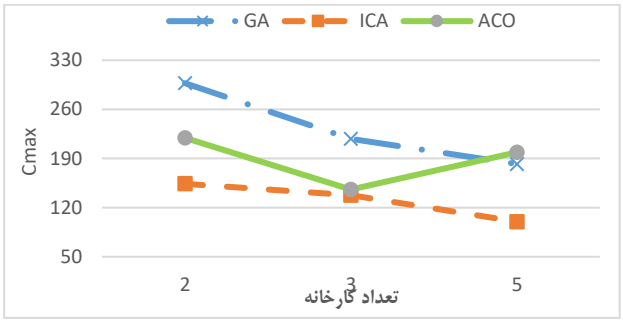
کارخانه	کار	ماشین	رقابت استعماری	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم کلونی مورچگان
۲	۱۰۰	(۳،۳)	۱۹۴/۲	۵۰۸/۶	۲۵۹
۵	۱۰۰	(۲،۳،۲،۳،۲)	۱۲۴/۲	۳۱۸	۳۹۴/۲
۵	۱۰۰	(۳،۳،۳،۳،۳)	۱۰۶/۲	۲۰۹	۲۵۰/۸
۵	۱۰۰	(۵،۵،۵،۵،۵)	۸۴	۱۵۰	۱۱۴
۵	۲۰۰	(۵،۵،۵،۵،۵)	۱۵۷/۸	۲۸۷	۴۲۳/۹
۲	۲۰۰	(۵،۵)	۲۷۱/۸	۴۷۷	۳۳۳
۳	۲۰۰	(۳،۳،۳)	۲۹۹/۶	۴۵۳/۹	۲۰۸
۵	۲۰۰	(۳،۳،۳،۳،۳)	۲۰۴/۹	۴۶۳	۴۳۱/۶
۵	۲۰۰	(۲،۳،۲،۳،۲)	۲۲۹/۵	۲۵۳	۱۴۱/۵

تحلیل نتایج بر اساس عامل تعداد کارخانه‌ها. ابتدا نتایج حاصل از حل مسائل در ابعاد کوچک در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶. نمودار میانگین C_{max} در کلاس مسائل کوچک

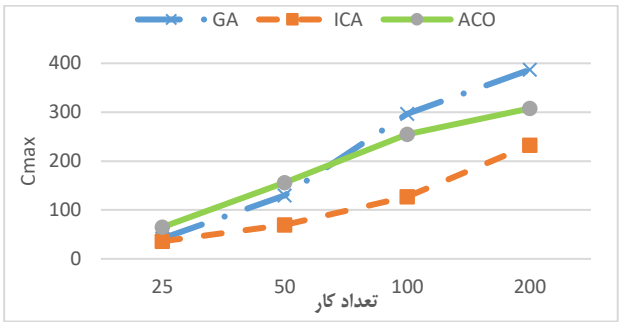
در ادامه با توجه به تعداد کارخانه‌ها در هر کلاس از مسئله، مسائل دسته‌بندی شدند و میانگین هر دسته به‌عنوان شاخص برای مقایسه در نظر گرفته شد. به این منظور برای کلاس مسائل متوسط و بزرگ، مطابق شکل ۷، دسته‌بندی‌ها شامل ۲، ۳ و ۵ کارخانه هستند.



شکل ۷. نمودار میانگین C_{max} برای اثر متقابل تعداد کارخانه‌ها بر روی الگوریتم‌ها در کلاس مسائل متوسط و بزرگ

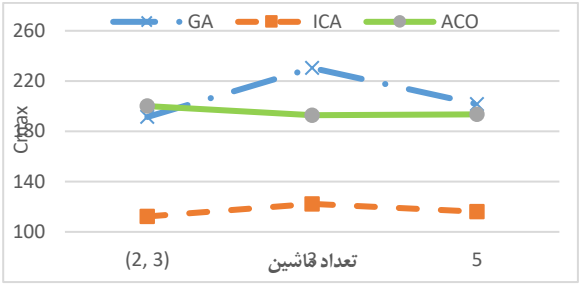
در این کلاس با افزایش تعداد کارخانه‌ها میانگین C_{max}ها عموماً روند کاهشی داشته است و در کل عملکرد الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادشده بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است.

تحلیل نتایج بر اساس عامل تعداد کارها. طبق روال عامل قبلی، مسائل با توجه به تعداد کارها در هر کلاس، دسته‌بندی شدند و میانگین هر دسته به‌عنوان شاخص برای مقایسه در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۸، مشاهده می‌شود، در هر سه الگوریتم با افزایش تعداد کارها میانگین C_{max} نیز افزایش می‌یابد و باز هم کارایی الگوریتم رقابت استعماری بهتر از بقیه است.



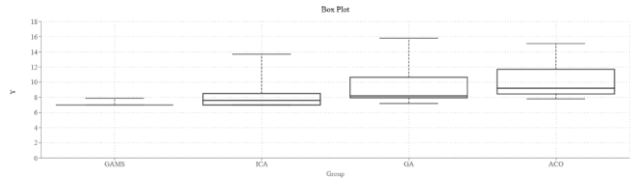
شکل ۸. نمودار میانگین C_{max} برای اثر متقابل تعداد کارها بر روی الگوریتم‌ها در کلاس مسائل متوسط و بزرگ

تحلیل نتایج بر اساس عامل تعداد ماشین‌ها. در این نوع دسته‌بندی، میانگین C_{max} برای تعداد خاص ماشین‌ها به‌عنوان شاخص برای مقایسه در نظر گرفته می‌شوند. مطابق شکل ۹، به‌طورکلی نیز الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم ژنتیک و کلونی مورچگان عملکرد بهتری دارد.

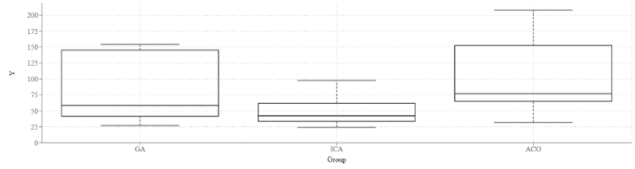


شکل ۹. نمودار میانگین C_{max} برای اثر متقابل تعداد ماشین‌ها بر روی الگوریتم‌ها در کلاس مسائل متوسط و بزرگ

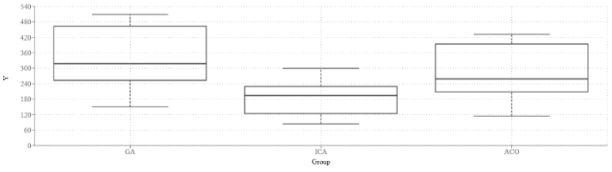
تحلیل نتایج آماری. روش‌های تحلیل آماری به دو دسته پارامتری و ناپارامتری تقسیم می‌شوند. تحلیل آماری پارامتری مستلزم پیش‌فرض‌هایی در مورد جامعه‌ای است که از آن نمونه‌گیری صورت گرفته است؛ اما تحلیل آماری ناپارامتری مستلزم هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد توزیع جامعه نیست. در این پژوهش به‌منظور مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم رقیب از آزمون ناپارامتری کروسکال ـ والیس استفاده می‌شود. این آزمون معادل ناپارامتری آزمون F مستقل در روش تحلیل واریانس یک‌طرفه است. زمانی که فرض‌های بنیادی تحلیل واریانس مانند نرمال‌بودن توزیع داده‌ها و برابری واریانس گروه‌ها برقرار نباشد، از آزمون کروسکال ـ والیس استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. نتایج در جدول ۶ و شکل ۱۰، به تفکیک ابعاد مسئله ارائه شده است.



(الف) نمودهای با ابعاد کوچک



(ب) نمودهای با ابعاد متوسط



(ج) ابعاد بزرگ

شکل ۱۰. نمودار جعبه در مقایسه الگوریتم‌ها

با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۶، در اغلب موارد الگوریتم پیشنهادی کارایی بهتری در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر داشته و نیز در ابعاد بزرگ این اختلاف کامل معنادار است.

جدول ۶. نتایج آزمون آماری و مقایسات زوجی

(الف) آزمون کروسکال والیس در ابعاد کوچک

پارامتر	Value
Kruskal-Wallis chi-squared	۱۳/۵۸
DF	۳
p-value	۰/۰۰۳

(ب) آزمون مقایسات زوجی در ابعاد کوچک

	GAMS	ICA	GA
ICA	۰/۳۹۲۳	-	-
GA	۰/۱۵۹۲	۰/۳۹۲۳	-
ACO	۰/۱۲۴۸	۰/۳۹۵۱	۰/۶۶۳۹

(ج) آزمون کروسکال والیس در ابعاد متوسط

پارامتر	مقدار
Kruskal-Wallis chi-squared	۴/۵۷
DF	۲
p-value	۰/۱۰۱

(د) آزمون مقایسات زوجی در ابعاد متوسط

	GA	ICA
ICA	۰/۳۱۲	-
ACO	۰/۳۱۲	۰/۰۹۱

(ه) آزمون کروسکال والیس در ابعاد بزرگ

پارامتر	مقدار
Kruskal-Wallis chi-squared	۷/۵۶
DF	۲
p-value	۰/۰۲۲

(و) آزمون مقایسات زوجی در ابعاد بزرگ

	GA	ICA
ICA	۰/۰۱۵	-
ACO	۰/۲۳۴	۰/۱۰۹

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی غیرمرتبط برای نخستین بار در فضای چندکارخانه‌ای بررسی شده است. بر اساس یک مدل پایه، سعی بر مدل‌سازی مسئله شد؛ ولی ازآنجاکه مدل پایه مناسب مسئله موردبررسی نبود، مدلی جدید به این منظور ارائه و در نمودهای کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. با توجه به پیچیدگی بالای مسئله، روش‌های حل دقیق قادر به یافتن جواب بهینه، نزدیک به بهینه برای نمودهای متوسط و بزرگ مسئله در زمان معقول نیستند؛ ازاین‌رو یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت به‌نام «رقابت استعماری» برای حل مسئله به‌کار گرفته شد تا در زمانی معقول به جوابی مناسب دست یابد. نتایج نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری مطرح‌شده به‌خوبی و با سرعت بالایی قادر به حل مسئله است. برای ارزیابی کارایی الگوریتم مطرح‌شده، نتایج آن با نتایج حاصل از یک الگوریتم ژنتیک تطبیق داده‌شده برای مسئلهی موردبررسی مقایسه شد. در همه نمودهای کوچک، متوسط و بزرگ مسئله، الگوریتم رقابت استعماری بهتر از ژنتیک عمل کرد. کارایی الگوریتم ژنتیک وقتی اندازه

مسئله افزایش می‌یابد، بسیار ضعیف می‌شود و الگوریتم در بهینگی محلی گیر می‌افتد و قادر به بهبود جواب‌های اولیه نیست؛ درحالی‌که این موضوع برای الگوریتم رقابت استعماری صدق نمی‌کند. زمینه‌های پژوهشی زیر را می‌توان به‌عنوان پژوهش‌های آتی موردمطالعه و بررسی قرار داد:

ـ درنظرگرفتن مسئله موردبررسی با توابع چندهدفه: برای مثال، تابع هدف مجموع زمان‌های دیرکرد و زودکرد کارها و مجموع زمان‌های تکمیل کارها برای مسئله در نظر گرفت؛

ـ برای اینکه مسئله موردپژوهش هر چه بیشتر به مسائل دنیای واقعی نزدیک شود، می‌توان محدودیت‌های بیشتری از قبیل محدودیت دسترسی به ماشین‌ها و خرابی ماشین‌ها را به آن افزود؛

ـ توسعه روش‌های حل برای مسئله حاضر که ترکیبی از الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های دقیق هستند.

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 به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

منابع

1. Bagheri Rad, N., & Samouei, P. (2021). Integrated scheduling of multi-stage production system and transportation in the supply chain by considering the sequence dependent setup time. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(3*), 181-213 (In Persian).
2. Behdani. B., Lukszo, Z. Adhitya, A., Srinivasan, R. (2010). Decentralized vs. centralized management of abnormal situations in a multi-plant enterprise using an agent-based approach. *Computer Aided Chemical Engineering, 28,* 1219-1224.
3. Behnamian J. & Fatemi Ghomi, S.M.T. (20l4). A survey of multi-factory scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing, 27(1),* 231-249.
4. Behnamian J. Fatemui Ghomi, S.M.T. (20l4). Realistic variant of just-in-time flowshop scheduling: Integration of *Lp*-metric method Ln PSO-like algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 75(9-12),* 1787-1797.
5. Behnamian, J. (2014). Decomposition based hybrid VNS–TS algorithm for distributed parallel factories scheduling with virtual corporation. *Computers & Operations Research, 52*, 81-191.
6. Behnamian, J. (2016). Multi-objective production network scheduling using sub-population genetic algorithm and elastic method. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems, 3(6),* 133-147. (In Persian)
7. Behnamian, J. (2017). Heterogeneous Networked cooperative scheduling with anarchic particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Engineering Management, 64(2),* 166-178.
8. Behnamian, J., & Fatemi Ghomi. S.M.T. (2012). Incorporating transportation time in multi agent production network scheduling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 25(12),* 1111-1128.
9. Behnamian, J., Fatemi Ghomi. S.M.T. (2013). The heterogeneous multi-factory production network scheduling with adaptive communication policy and parallel machine. *Information Sciences, 219,* 181-196.
10. Behnamian, J., Fatemi, Ghomi. S.M.T. (2016). A survey of multi-factory scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing, 27(1),* 231-249.
11. Bullinger, H.J. Faehnrich, K.P. & Laubscher, H.-P. (1997). Planning of multi-site production-an object-oriented model. *International Journal of Production Economics, 51(1),* 19-35.
12. Cai, S. Yang, K. Liu, K. (2018). Multi-objective optimization of the distributed permutation flowshop scheduling problem with transportation and eligibility constraints. *Journal of the Operations Research Society of China, 6(3),* 391–416.
13. Chen, W-L. Huang, C-Y. & Lai, Y-C. (2009). Multi-tier and multi-site collaborative production: Illustrated by a case example of TFT-LCD manufacturing, *Computers & Industrial Engineering, 57(1),* 61-72.
14. Cicirello, V.A., Smith, S.F. (2004). Wasp-like agents for distributed factory coordination. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 8,* 237–266.
15. Faraji Amiri, M., & Behnamian, J. (2020). A simulation based genetic algorithm for flowshop scheduling problem considering energy cost under uncertainty. *The Journal of Industrial Management Perspective, 10(2),* 9-32. (In Persian).
16. Gharaei A. Jolai, F. (2021). A Pareto approach for the multi-factory supply chain scheduling and distribution problem. *Operational Research, 21,* 2333–2364.
17. Glass, C. A., Potts, C. N. Shade, P. (1994). Unrelated parallel machine scheduling using local search. *Mathematical and Computer Modelling, 20(2),* 41-52.
18. Gnoni, M.G. Iavagnilio, R. Mossa, G. Mummolo, G. & Leva, A.D. (2003). Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modeling: A

case study from the automotive industry. *International Journal of Production Economics, 85*, 251–262.
19. Kim Y. Yun, C. Park, S.B., Park, S., Fan, L.T. (2008). An integrated model of supply network and production planning for multiple fuel products of multi-site refineries. *Computers & Chemical Engineering, 32*, 2529-2535.
20. Leung, S.C.H. Wu, Y. & Lai, K.K. (2003). Multi-site aggregate production planning with multiple objectives: A goal programming approach. *Production Planning and Control, 14(5)*, 425-436.
21. Marandi F. Fatemi Ghomi, S. M. T. (2019). Integrated multi-factory production and distribution scheduling applying vehicle routing approach, *International Journal of Production Research, 57(3)*, 722–748.
22. Marandi, F., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2019). Network configuration multi-factory scheduling with batch delivery: A learning-oriented simulated annealing approach. *Computers & Industrial Engineering, 132*, 293-310.
23. Rahimi, H., Azar, A., & Rezaei Pandari, A. (2015). Designing a multi objective job shop scheduling model and solving it by simulated annealing. *The Journal of Industrial Management Perspective, 5(3)*, 39-63. (In Persian)
24. Ruiz, R. Pan, Q.-K. Naderi, B. (2019). Iterated Greedy methods for the distributed permutation flowshop scheduling problem. *Omega, 83*, 213–222.
25. Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints. *Computers & Operations Research, 36(12)*, 3224-3230.
26. Timpe, C.H. & Kallrath, J. (2000). Optimal planning in large multi-site production networks, *European Journal of Operational Research, 126*, 422-435.
27. Weng, M.X., Lu, J., Ren, H. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. *International journal of production economics, 70(3)*, 215-226.
28. Westfield, F.M. (1955). Marginal analysis, multi-plant firms, and business practice: An example, *The Quarterly Journal of Economics, 69(2)*, 253-268.
29. Ying K.-C. Lin, S.-W. (2018). Minimizing makespan for the distributed hybrid flowshop scheduling problem with multiprocessor tasks. *Expert Systems with Applications: An International Journal, 92*, 132–141.
30. Zeidi, J.R., Hosseini. S.M. (2015). Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81(9-12)*, 1487-1496.
31. Zhang, H., Wu, Y., Pan, R., Xu, G. (2021) Two-stage parallel speed-scaling machine scheduling under time-of-use tariffs. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1-22.