Industrial Management Studies
Vol. 24, No.81, 2026; P 103-144
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.91849.3021

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 17/08/2026
Revised: 27/07/2026
Received: 24/02/2026
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

Minimization of Total Tardiness in Flow Shop with Sequence Dependent Setup Times and Operator Constraints Using Particle Swarm Optimization

Alireza Naeimi Sadigh — Department of Computer Science, Faculty of Mathematics, Statistics and Computer Science, Semnan University, Semnan, Iran

Azim Zarei — Department of Business Administration, Faculty of Economics, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Semnan, Iran

Mehdi Ebrahimi* — Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Semnan, Iran

Mohammad Meftahi — Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Administrative Sciences, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

The flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup times and operator constraints represents a complex and practically relevant production planning challenge due to the simultaneous integration of sequencing, timing, and human resource allocation decisions, making its exact solution computationally intractable for medium- and large-scale instances. This study proposed an integrated modeling and solution framework aimed at minimizing total order tardiness while jointly incorporating key operational constraints, including technological precedence, machine non-overlapping, sequence-dependent setup times (satisfying the triangle inequality), and multi-skilled operator capacity limitations. In this regard, a mixed-integer linear programming (MILP) model was first developed to explicitly capture sequencing, scheduling, and operator assignment decisions within a unified structure. Given the computational complexity of the model and the inefficiency of exact methods for real-world scales, an approximate solution approach based on Particle Swarm Optimization (PSO) was designed; to accommodate the combinatorial structure

* Corresponding Author: mahdiebrahimi@semnan.ac.ir

How to Cite: Naeimi Sadigh, A., Zarei, A., Ebrahimi, M., Meftahi, M. (2026). Minimization of Total Tardiness in Flow Shop with Sequence Dependent Setup Times and Operator Constraints Using Particle Swarm Optimization, *Industrial Management Studies, 24(81)*, 103-144.

of the problem, a continuous encoding mechanism combined with a constructive decoder (based on FIFO logic) was implemented to enforce key constraints during solution evaluation. The performance of the proposed algorithm was evaluated through an industrial case study, a comparative benchmark against a Genetic Algorithm (GA), and multiple independent runs with different random seeds, assessing key performance indicators such as the best objective value, mean and standard deviation of results, computational time, and convergence behavior. Results demonstrated that the proposed PSO achieved high-quality and stable solutions with acceptable computational effort, exhibiting significant superiority over the benchmark algorithm in terms of average solution quality, stability, and runtime; furthermore, sensitivity analysis of parameters and problem dimensions indicated that stronger exploration enhances robustness and solution quality at the cost of longer runtime, whereas exploitative settings accelerate convergence but reduce solution quality. Overall, combining precise operational constraint modeling with flexible metaheuristic algorithms provided an efficient approach for solving complex scheduling problems in real-world production environments and can serve as an effective decision-support tool in production management.

Introduction

Production scheduling in multi-stage manufacturing systems represents a fundamental operational challenge that directly impacts delivery reliability, customer service levels, resource utilization, and tardiness-related financial penalties. In modern process and assembly industries such as the chemical, food, and detergent manufacturing sectors, production efficiency depends heavily not only on processing times but also on sequence-dependent setup operations resulting from line washouts, tooling adjustments, and material transitions. Concurrently, human resources serve as critical shared constraints across production stations, where operations cannot proceed without the presence of a dedicated, skilled operator. Classical flow shop models frequently overlook operator limitations or treat setup durations as negligible, leading to unrealistic schedules, unexpected bottlenecks, and significant delivery delays. To bridge this gap, this study investigated a permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup times (satisfying the triangle inequality) and multi-skilled operator constraints, aimed at minimizing total order tardiness. By integrating human workforce dynamics with technical workstation constraints, this research provided a comprehensive decision-making framework to balance order sequencing, setup overheads, and labor allocation.

Methodology

The study initially developed a rigorous Mixed-Integer Linear Programming formulation that unifies order sequencing, machine precedence, non-overlapping

constraints, sequence-dependent transitions, and dedicated operator commitments across both setup and processing phases. Given the NP-hard nature of the problem and the computational intractability of exact solvers for industrial-scale instances, an approximate optimization approach based on Particle Swarm Optimization was developed. To effectively map the continuous search space of the swarm algorithm into discrete combinatorial schedules, a dual random-key continuous encoding mechanism was utilized to govern both job sequence permutations and operator-to-operation assignments. A constructive simulation decoder incorporating a first-in, first-out priority dispatching rule resolved operator contention dynamically and enforced all technological and resource constraints during solution evaluation. The proposed framework was validated using real-world industrial data from a detergent manufacturing facility involving multi-station lines, sequence-dependent changeovers, and constrained multi-skilled operators. Furthermore, the algorithm was evaluated through comparative benchmarking against a Genetic Algorithm with an identical decoding mechanism, multi-seed statistical replications, and systematic sensitivity analyses across algorithm hyperparameters and problem dimensions.

Findings

Computational experiments demonstrated the superior performance, stability, and computational efficiency of the proposed Particle Swarm Optimization algorithm. In the industrial case study, both metaheuristics identified the minimum tardiness objective of 24.6 hours; however, the proposed Particle Swarm Optimization framework achieved statistically superior average tardiness (25.27 versus 26.85), significantly lower standard deviation (1.43 versus 2.15), and reduced computational runtime (3.26 seconds versus 4.18 seconds) compared to the Genetic Algorithm. Convergence trajectory analyses indicated rapid search progression within the first fifty iterations, effectively avoiding premature stagnation through dynamic inertia control and perturbation mechanisms. Sensitivity analysis demonstrated that explorative configurations with larger swarm sizes enhanced solution robustness and consistency, whereas overly exploitative settings accelerate convergence at the expense of solution quality. In addition, scalability assessments across medium-scale (20 jobs, 5 machines) and large-scale (50 jobs, 10 machines) problem instances confirmed that the proposed framework delivered high-quality schedules within reasonable computational time frames when iteration limits are calibrated to problem scale.

Discussion and Conclusion

The findings underlined that achieving optimal delivery performance in modern production lines requires the synchronized optimization of machine schedules, sequence-dependent changeovers, and human labor assignments. Treating operator constraints independently from sequencing decisions leads to suboptimal or practically unfeasible production schedules. The developed framework served as an effective decision-support tool for operations managers, enabling them to evaluate operational trade-offs between delivery commitments, labor availability,

and setup losses under varying production scenarios. Methodologically, coupling a continuous swarm intelligence algorithm with a constraint-aware constructive decoder proved to be an adaptable and robust approach for handling complex shop-floor constraints without altering the core optimization engine. Future research can extend this framework by incorporating stochastic processing and setup times through robust or fuzzy optimization, developing hybrid metaheuristic variants, and addressing multi-objective criteria such as energy efficiency and carbon emissions.

Keywords: Flow Shop Scheduling, Particle Swarm Optimization, PSO, Metaheuristic Algorithms.

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۶

ISSN: 2251/8029

eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی

سال بیست و چهارم، شماره ۸۱، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۰۳ تا ۱۴۴

jims.atu.ac.ir

DOI: 10.22054/jims.2026.91849.3021

کمینه‌سازی مجموع دیرکرد در کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

علیرضا نعیمی صدیق — گروه علوم کامپیوتر، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، سمنان، سمنان، ایران

عظیم زارعی — گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، سمنان، سمنان، ایران

مهدی ابراهیمی* — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، سمنان، سمنان، ایران

محمد مفتاحی — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، سمنان، سمنان، ایران

چکیده

مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور، به‌دلیل درهم‌تنیدگی هم‌زمان تصمیم‌های توالی، زمان‌بندی و تخصیص منابع انسانی، ازجمله مسائل پیچیده و نزدیک به شرایط واقعی تولید محسوب می‌شود که حل دقیق آن در ابعاد متوسط و بزرگ با چالش‌های محاسباتی جدی مواجه است. هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب یکپارچه مدل‌سازی و حل برای کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها است، به‌گونه‌ای که قیود کلیدی شامل تقدم تکنولوژیک، عدم هم‌پوشانی ماشین‌ها، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی (با برقراری نابرابری مثلثی) و محدودیت ظرفیت اپراتورهای چندمهارته به‌صورت هم‌زمان لحاظ شوند. در این راستا، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تدوین شد که ساختار تصمیم‌های توالی عملیات، زمان‌بندی و تخصیص اپراتور را به‌طور یکپارچه پوشش می‌دهد. با توجه به پیچیدگی مدل و ناکارآمدی روش‌های دقیق در مقیاس‌های واقعی، یک رویکرد حل تقریبی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه یافت و برای سازگار ساختن آن با ماهیت ترکیبی مسئله، از کدگذاری پیوسته همراه با یک دیکودر سازنده (مبتنی بر منطق اولین ورودی، اولین خروجی) استفاده شد تا قیود اصلی در فرآیند ارزیابی راه‌حل‌ها اعمال شوند. ارزیابی عملکرد الگوریتم از طریق یک مطالعه موردی صنعتی، ارزیابی مقایسه‌ای با الگوریتم ژنتیک و اجرای مکرر با دانه‌های تصادفی متفاوت انجام شد و شاخص‌هایی نظیر بهترین مقدار تابع هدف، میانگین و انحراف معیار نتایج، زمان محاسباتی و رفتار همگرایی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی با ثبات مناسب و هزینه محاسباتی قابل‌قبول به راه‌حل‌های با کیفیت بالا دست می‌یابد و برتری معناداری ازنظر میانگین کیفیت، پایداری و زمان اجرا نسبت به الگوریتم مرجع نشان می‌دهد؛ همچنین تحلیل حساسیت

* نویسنده مسئول: Mehdi

پارامترها و ابعاد مسئله حاکی از آن است که تقویت مؤلفه اکتشافی کیفیت و پایداری نتایج را بهبود می‌دهد، هرچند زمان اجرا افزایش می‌یابد، درحالی‌که تنظیمات بهره‌بردارانه‌تر موجب همگرایی سریع‌تر اما کاهش کیفیت راه‌حل‌ها می‌شود. درمجموع، ترکیب مدل‌سازی دقیق قیود عملیاتی با الگوریتم‌های فراابتکاری انعطاف‌پذیر، رویکردی کارآمد برای حل مسائل زمان‌بندی پیچیده در محیط‌های تولیدی واقعی فراهم می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار مؤثر در مدیریت تولید به کار گرفته شود.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی کارگاه جریان؛ بهینه‌سازی ازدحام ذرات؛ الگوریتم‌های فراابتکاری.

مقدمه

زمان‌بندی تولید در محیط‌های چندایستگاهی، از ارکان تصمیم‌گیری عملیاتی در صنایع فرآیندی و مونتاژی است و مستقیماً بر شاخص‌هایی نظیر سطح خدمت‌دهی، قابلیت اتکای تحویل، بهره‌وری منابع و هزینه‌های ناشی از تأخیر اثر می‌گذارد. در میان کلاس‌های مختلف مسائل زمان‌بندی، کارگاه جریان[1] به‌دلیل ساختار متوالی عملیات و کاربرد گسترده در خطوط بسته‌بندی، صنایع غذایی، شیمیایی، دارویی و تجهیزات الکترومکانیکی، جایگاه ویژه‌ای دارد. در بسیاری از محیط‌های واقعی، صرفاً زمان‌های پردازش تعیین‌کننده نیستند؛ بلکه زمان‌های آماده‌سازی (نظیر شست‌وشو، تنظیم پارامترها، تعویض قالب و نازل، تغییر برچسب و...) سهم قابل‌توجهی از زمان کل را به خود اختصاص می‌دهند. ادبیات جدید نیز نشان می‌دهد که ورود زمان‌های آماده‌سازی به مدل‌های کوتاه‌مدت برنامه‌ریزی و زمان‌بندی، برای نزدیک‌شدن به واقعیت و کاهش ریسک‌های عملیاتی ضروری است. (ینگ، ۲۰۲۵) در این میان، حالتی که زمان آماده‌سازی به زوج سفارش قبلی و سفارش بعدی وابسته باشد، یعنی آماده‌سازی وابسته به توالی[2]، پیچیدگی تصمیم‌گیری را به‌طور چشمگیر افزایش می‌دهد و موجب می‌شود کیفیت توالی تولید در عملکرد نهایی سیستم تعیین‌کننده باشد.

از سوی دیگر، معیارهای مبتنی بر موعد تحویل به‌ویژه کمینه‌سازی مجموع دیرکرد، برای صنایع سفارش‌محور و محیط‌هایی که هزینه‌های عدم تحقق تعهدات زمانی بالا است، اهمیت ویژه دارد. مرورهای نظام‌مند اخیر نشان می‌دهند که باوجود رشد گسترده پژوهش‌ها در مسئله کارگاه جریان جایگشتی با اهداف مبتنی بر موعد تحویل، هنوز تنوع زیادی در گونه‌های مسئله، قیود واقع‌گرایانه و روش‌های حل وجود دارد و همین امر ضرورت توسعه مدل‌ها و الگوریتم‌های متناسب با واقعیت صنعتی را برجسته می‌کند. (دآتاید پراتا و همکاران، ۲۰۲۵) علاوه بر این، مطالعات جدید روی اهداف مبتنی بر دیرکرد (مانند دیرکرد خطی، حداکثر دیرکرد، توابع غیرخطی مرتبط با موعد تحویل) نشان می‌دهند که انتخاب معیار دیرکرد می‌تواند رفتار الگوریتم‌ها و ساختار راه‌حل بهینه را تغییر دهد و همچنان موضوعی فعال در ادبیات است (سیلوا و همکاران، ۲۰۲۲؛ الیساوی، ۲۰۲۴).

در کنار آماده‌سازی، یکی از مهم‌ترین واقعیت‌های مغفول در مدل‌های کلاسیک زمان‌بندی، محدودیت منابع انسانی (اپراتور) است. در بسیاری از خطوط تولید، هر عملیات یا هر ایستگاه به حضور اپراتور نیاز دارد و اپراتورها به‌عنوان منابع کمیاب مشترک بین ماشین‌ها عمل می‌کنند. در چنین شرایطی ممکن است ماشین آزاد باشد اما اپراتور آزاد موجود نباشد؛ لذا شروع عملیات به تعویق می‌افتد، جریان تولید مختل می‌شود و دیرکرد افزایش می‌یابد. ادبیات زمان‌بندی با منابع دوگانه (ماشین، نیروی انسانی)

1. Flow Shop
2. Sequence Dependent Setup Times

نشان می‌دهد که نادیده‌گرفتن عامل نیروی انسانی می‌تواند به برنامه‌های غیرقابل اجرا یا غیرواقعی منجر شود و لازم است تخصیص اپراتور به‌صورت یک تصمیم یکپارچه با زمان‌بندی مدل‌سازی گردد. (ملکوش و همکاران، ۲۰۲۵؛ کاستا و همکاران، ۲۰۱۴) همچنین پژوهش‌های مرتبط با محدودیت نیروی انسانی در محیط‌های جریان، جریان انعطاف‌پذیر نشان داده‌اند که اضافه‌شدن این قید، ساختار مسئله را به‌طورجدی دشوارتر کرده و استفاده از روش‌های حل پیشرفته (برنامه‌ریزی قیودی، فراابتکاری و رویکردهای ترکیبی) را توجیه می‌کند (گورتسن و همکاران، ۲۰۲۳؛ کاستا و همکاران، ۲۰۱۴).

بنابراین، مسئله موردتوجه در این پژوهش، زمان‌بندی کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور باهدف کمینه‌سازی مجموع دیرکرد است. این مسئله ازنظر محاسباتی در رده مسائل ترکیبی دشوار قرار می‌گیرد؛ زیرا تصمیم‌گیری شامل (۱) تعیین توالی جایگشتی سفارش‌ها، (۲) اثرگذاری توالی بر آماده‌سازی‌های وابسته به زوج سفارش‌ها در هر ماشین و (۳) تخصیص و تداخل زمانی اپراتورها به‌عنوان منبع مشترک است. مجموعه این عوامل موجب شکل‌گیری یک فضای جست‌وجوی بسیار بزرگ و ناهموار می‌شود که حل دقیق آن برای ابعاد عملی غالباً دشوار یا غیرعملی است؛ امری که در پژوهش‌های اخیر درباره زمان‌بندی‌های واقع‌گرایانه و چندقیدی نیز به‌طور ضمنی تأیید می‌شود (ملکوش و همکاران، ۲۰۲۵؛ مراحی و همکاران، ۲۰۲۴).

در پاسخ به این چالش، ادبیات زمان‌بندی طی سال‌های اخیر به سمت توسعه فراابتکاری‌ها و رویکردهای ترکیبی حرکت کرده است. در میان این روش‌ها، بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1] به دلیل سادگی پیاده‌سازی، تعداد پارامترهای محدود و قابلیت انطباق با مسائل پیچیده به‌طور گسترده موردتوجه قرار گرفته است. مطالعات جدید نشان می‌دهند که بهبود بهینه‌سازی ازدحام ذرات از طریق سازوکارهای یادگیری، جست‌وجوی محلی و یا ترکیب با راهبردهای دیگر، می‌تواند کیفیت حل مسائل کارگاه جریان جایگشتی را افزایش دهد. (حیات و همکاران، ۲۰۲۳؛ گنگ و همکاران، ۲۰۱۶) افزون بر این، پژوهش‌های مربوط به گونه‌های مختلف کارگاه جریان با قیود عملیاتی نشان می‌دهند که ترکیب روش‌های فراابتکاری با سازوکارهای قوی تولید برنامه زمان‌بندی می‌تواند مسیر مؤثری برای اعمال هم‌زمان قیود آماده‌سازی و محدودیت منابع باشد. (موسوی و همکاران، ۲۰۲۳؛ رحمان و همکاران، ۲۰۲۱)

باوجود پیشرفت‌های مذکور، شکاف پژوهشی در دو محور قابل‌طرح است. نخست، بسیاری از مطالعات زمان‌بندی کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی، یا به‌طور کامل محدودیت اپراتور را لحاظ نمی‌کنند یا آن را به‌صورت ساده‌شده و غیرتعاملی وارد مدل می‌سازند؛ درحالی‌که در

1. Particle Swarm Optimization (PSO)

محیط‌های واقعی، تخصیص اپراتور می‌تواند توالی بهینه را تغییر دهد و حتی افزایش زمان‌های راه‌اندازی وابسته به توالی را در برابر کاهش دیرکرد توجیه‌پذیر کند. (کاستا و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاستا و همکاران، ۲۰۲۰) دوم، در بخش روش حل، هرچند الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌عنوان یک رویکرد کارآمد مطرح است، اما برای انطباق کامل با ساختار تصمیم‌های ترکیبی (توالی + تخصیص اپراتور) نیاز به طراحی کدگذاری و دیکودر سازگار با منطق قیود وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که ارزیابی تابع هدف منعکس‌کننده قیود ماشین، تقدم تکنولوژیک، آماده‌سازی و تداخل اپراتورها باشد. این موضوع به‌ویژه در مسائل با اهداف مبتنی بر موعد تحویل اهمیت دارد، زیرا خطا در سازگاری ارزیابی می‌تواند به برآوردهای خوش‌بینانه و برنامه‌های غیرقابل اجرا منجر شود (دآتاید پراتا و همکاران، ۲۰۲۵؛ الیساوی، ۲۰۲۴).

بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر یک چارچوب مدل‌سازی و حل، تلاش می‌کند: (۱) مسئله کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور را با هدف کمینه‌سازی مجموع دیرکرد به‌صورت منسجم مدل‌سازی کند؛ (۲) یک طراحی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات منطبق با ماهیت ترکیبی مسئله ارائه دهد که از طریق کدگذاری مناسب و دیکودر سازنده، قیود اصلی را در ارزیابی راه‌حل‌ها اعمال نماید؛ و (۳) عملکرد الگوریتم را با پروتکل آزمایش چنداجرایی، تحلیل همگرایی و تحلیل حساسیت پارامترها ارزیابی کند. انتظار می‌رود چنین چارچوبی، علاوه بر ارزش نظری در توسعه روش‌های حل مسائل زمان‌بندی واقع‌گرایانه، از منظر کاربردی نیز به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای مدیران تولید در مواجهه با مبادله‌های[1] واقعی دیرکرد، آماده‌سازی و منابع انسانی قابل‌استفاده باشد.

مرور ادبیات پژوهش

مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان یکی از حوزه‌های کلاسیک و درعین‌حال پویا در پژوهش‌های تحقیق در عملیات و مدیریت تولید است که به دلیل کاربرد گسترده در صنایع فرآیندی، مونتاژی و خدماتی، همواره موردتوجه محققان بوده است. در ساده‌ترین حالت، مسئله کارگاه جریان شامل مجموعه‌ای از سفارش‌هاست که باید به ترتیب یکسانی از ماشین‌ها عبور کنند و هدف، بهینه‌سازی یک یا چند معیار عملکرد نظیر زمان تکمیل کل، دیرکرد یا بهره‌وری منابع است. بااین‌حال، پژوهش‌های دهه‌های اخیر نشان داده‌اند که فرض‌های ساده‌ساز کلاسیک، پاسخگوی پیچیدگی‌های محیط‌های واقعی تولید نیستند و لازم است قیود و ویژگی‌های عملیاتی جدید در مدل‌ها لحاظ شوند (پیندو، ۲۰۲۲).

1. Trade-Off

یکی از مهم‌ترین توسعه‌های مدل‌های زمان‌بندی، ورود زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی است. در بسیاری از صنایع، تغییر از یک سفارش به سفارش دیگر مستلزم فعالیت‌هایی نظیر شست‌وشو، تنظیم مجدد پارامترها، تعویض ابزار یا مواد اولیه است که مدت آن به نوع سفارش قبلی و بعدی وابسته است. مطالعات اولیه نشان دادند که نادیده‌گرفتن این زمان‌ها می‌تواند به برنامه‌هایی غیرواقعی و غیرقابل اجرا منجر شود. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی گونه‌های مختلف کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این ویژگی، مسئله را به‌طور محسوسی دشوارتر می‌کند (ینگ، ۲۰۲۵).

مرورهای نظام‌مند جدید حاکی از آن است که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها بر نسخه جایگشتی کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی متمرکز بوده‌اند و اهداف مختلفی نظیر کمینه‌سازی زمان ساخت[1]، مجموع دیرکرد و معیارهای چندهدفه را بررسی کرده‌اند. (دآتاید پراتا و همکاران، ۲۰۲۵) نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که ساختار توالی تولید نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سیستم دارد و حتی تغییرات کوچک در ترتیب سفارش‌ها می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر زمان‌های آماده‌سازی و شاخص‌های تحویل داشته باشد.

در میان معیارهای عملکرد، اهداف مبتنی بر موعد تحویل به‌ویژه مجموع دیرکرد از اهمیت بالایی برخوردارند؛ زیرا مستقیماً به سطح خدمت‌دهی و رضایت مشتری مرتبط هستند. سیلوا و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که در مسائل کارگاه جریان، بهینه‌سازی دیرکرد می‌تواند رفتار الگوریتم‌ها را به‌طور معناداری نسبت به معیارهایی مانند زمان ساخت تغییر دهد. الیساوی (۲۰۲۴) نیز در مطالعه‌ای روی کمینه‌سازی بیشینه دیرکرد در کارگاه جریان جایگشتی نشان داد که این اهداف حساسیت بیشتری به ساختار توالی و قیود عملیاتی دارند.

مرورهای اخیر بیان می‌کنند که علی‌رغم حجم قابل‌توجه مطالعات، هنوز تنوع زیادی در مدل‌سازی اهداف مبتنی بر موعد تحویل وجود دارد و بسیاری از پژوهش‌ها به نسخه‌های ساده‌شده یا اهداف منفرد محدود شده‌اند. (دآتاید پراتا و همکاران، ۲۰۲۵) این امر نشان‌دهنده ظرفیت بالای پژوهشی برای ترکیب اهداف دیرکرد با قیود واقع‌گرایانه‌تر نظیر آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت منابع است.

یکی از شکاف‌های مهم در ادبیات کلاسیک زمان‌بندی، نادیده‌گرفتن محدودیت نیروی انسانی است. در محیط‌های واقعی تولید، ماشین‌ها به تنهایی قادر به انجام عملیات نیستند و حضور اپراتور یا تیم کاری شرط لازم برای شروع و ادامه پردازش است. کاستا و همکاران (۲۰۱۴) در یک مطالعه

1. Makespan

پیشگامانه نشان دادند که یکپارچه‌سازی تخصیص اپراتور با زمان‌بندی کارگاه جریان می‌تواند توالی بهینه را به‌طور اساسی تغییر دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که در برخی موارد، پذیرش توالی طولانی‌تر می‌تواند در مقابل کاهش دیرکرد کلی توجیه‌پذیر باشد.

در سال‌های بعد، پژوهش‌های متعددی به بررسی زمان‌بندی با منابع دوگانه[1] پرداخته‌اند. کاستا و همکاران (۲۰۲۰) و ملکوش و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که اضافه‌شدن قید نیروی انسانی، مسئله را ازنظر محاسباتی به‌طور چشمگیری دشوارتر می‌کند و استفاده از روش‌های حل تقریبی و فراابتکاری را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. این مطالعات همچنین تأکید می‌کنند که مدل‌سازی دقیق تداخل زمانی اپراتورها نقش کلیدی در قابلیت اجرای برنامه‌های تولید دارد.

به دلیل ماهیت NP-hard اغلب مسائل کارگاه جریان توسعه‌یافته، روش‌های حل دقیق نظیر برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط یا شاخه و کران، تنها برای مسائل کوچک قابل استفاده‌اند. (پیندو، ۲۰۲۲) درنتیجه، تمرکز ادبیات به سمت فراابتکاری‌ها و رویکردهای ترکیبی سوق یافته است. الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی تبرید، جست‌وجوی ممنوعه و بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌طور گسترده برای مسائل کارگاه جریان با قیود پیچیده به کار رفته‌اند (گنگ و همکاران، ۲۰۱۶).

در بسترهای واقعی‌تر، ترکیب محدودیت‌های منابع انسانی و ماشین به‌عنوان یک چالش کلیدی مطرح شده است. برای مثال، مدل‌سازی منابع دوگانه محدود در محیط جریان کارگاهی ترکیبی همراه با امکان رد کارها، با توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح و الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته موردبررسی قرار گرفته است (دبیری و همکاران، ۱۴۰۰). در همین راستا، مطالعاتی نیز به توسعه الگوریتم‌های چندهدفه برای بهینه‌سازی خطوط تولید نامطمئن با ساختار سری موازی و در نظر گرفتن بافرها و خرابی ماشین‌آلات پرداخته‌اند (مسیب مطلق و همکاران، ۱۴۰۲). از سوی دیگر، ورود ملاحظات پایداری و انرژی به مسائل زمان‌بندی، بعد جدیدی به پیچیدگی این مسائل افزوده است. بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه انرژی و جریمه دیرکرد در محیط ماشین‌های موازی ناهمگن با استفاده از الگوریتم‌های ممتیک و ژنتیک نمونه‌ای از این رویکردهای نوین است (بهنامیان و افسر، ۱۳۹۹). همچنین در مسائل مونتاژ دو مرحله‌ای با زمان‌های آماده‌سازی، به‌کارگیری الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر، ایمنی مصنوعی و شبیه‌سازی تبرید کارایی بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک نشان داده است (یزدانی، ۱۳۹۹).

درمجموع، روند پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که با افزایش واقع‌گرایی مدل‌ها و لحاظ قیود

1. Dual Resource Constrained Scheduling

پیچیده عملیاتی، عدم‌قطعیت، اهداف چندگانه و محدودیت‌های منابع، توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری پیشرفته و ترکیبی نه‌تنها یک انتخاب، بلکه یک ضرورت روش‌شناختی برای حل مسائل زمان‌بندی کارگاه جریان توسعه‌یافته محسوب می‌شود. در میان این روش‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دلیل سادگی ساختار، تعداد کم پارامترها و قابلیت تطبیق با مسائل پیوسته و ترکیبی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. حیات و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که نسخه‌های بهبودیافته این الگوریتم می‌توانند عملکرد رقابتی در مسائل زمان‌بندی پیچیده داشته باشند. بااین‌حال، پژوهش‌ها تأکید می‌کنند که موفقیت الگوریتم‌های فرا ابتکاری به طراحی مناسب کدگذاری و دیکودر بستگی دارد؛ به‌ویژه در مسائل جایگشتی که نگاشت فضای پیوسته به فضای گسسته چالش‌برانگیز است. (رحمان و همکاران، ۲۰۲۱)

یکی از روندهای جدید در ادبیات فراابتکاری‌ها، توجه به ارزیابی آماری، تحلیل همگرایی و حساسیت پارامترها است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که گزارش یک اجرای منفرد نمی‌تواند تصویر دقیقی از عملکرد الگوریتم ارائه دهد و اجرای چندباره همراه با تحلیل میانگین، انحراف معیار و رفتار همگرایی ضروری است. (مراحی و همکاران، ۲۰۲۴) همچنین تحلیل حساسیت پارامترها به‌عنوان ابزاری برای درکم مبادله‌های میان کیفیت راه‌حل و هزینه محاسباتی، جایگاه مهمی در مقالات یافته است.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های گسترده‌ای در حوزه کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و اهداف مبتنی بر موعد تحویل انجام شده است، ترکیب هم‌زمان این ویژگی‌ها با محدودیت اپراتور و ارزیابی جامع یک الگوریتم فراابتکاری هنوز به‌طور کامل موردبررسی قرار نگرفته است. به‌ویژه، نیاز به چارچوب‌هایی احساس می‌شود که ضمن مدل‌سازی واقع‌گرایانه قیود عملیاتی، ازنظر روش حل نیز با طراحی کدگذاری و دیکودر سازگار، عملکرد الگوریتم را به‌صورت آماری و تحلیلی ارزیابی کنند. پژوهش حاضر در پاسخ به این شکاف، تلاش می‌کند سهمی در توسعه ادبیات زمان‌بندی واقع‌گرایانه و روش‌های حل آن ایفا کند.

به‌منظور تبیین شفاف‌تر جایگاه پژوهش حاضر و دسته‌بندی بصری ادبیات موضوع، جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های کلیدی سال‌های اخیر را بر اساس نوع مسئله، قیود عملیاتی (زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور)، تابع هدف و روش‌های حل ارائه می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشخص است، پژوهش حاضر نخستین مطالعه‌ای است که یکپارچه‌سازی هم‌زمان زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت‌های ظرفیت اپراتور را در محیط کارگاه جریان جایگشتی باهدف کمینه‌سازی مجموع دیرکرد و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام

ذرات مبتنی بر کدگذاری پیوسته و دیکودر سازنده موردبررسی جامع قرار می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه تطبیقی پژوهش‌های کلیدی حوزه زمان‌بندی کارگاه جریان و قیود عملیاتی

ردیف	پژوهشگران	ساختار مسئله	آماده‌سازی وابسته به توالی	محدودیت اپراتور / نیروی انسانی	تابع هدف	روش حل
۱	کاستا و همکاران (۲۰۱۴)	کارگاه جریان	✓	✓	زمان ساخت / هزینه	الگوریتم ژنتیک
۲	رحمان و همکاران (۲۰۲۱)	کارگاه جریان	✓	✗	زمان ساخت / دیرکرد	روش‌های فراابتکاری
۳	سیلوا و همکاران (۲۰۲۲)	کارگاه جریان جایگشتی	✗	✗	دیرکرد مربعی وزن‌دار	روش‌های فراابتکاری
۴	موسوی و شهنازاری (۲۰۲۳)	کارگاه جریان ترکیبی	✓	✗	زمان ساخت و مجموع دیرکرد	فراابتکاری‌های چندهدفه
۵	الیساوی و علالی (۲۰۲۴)	کارگاه جریان جایگشتی	✗	✗	بیشینه دیرکرد	روش‌های ریاضی / ابتکاری
۶	مراحی و همکاران (۲۰۲۴)	کارگاه جریان توزیع‌شده	✗	✓	چندهدفه	مرور ادبیات و فراابتکاری
۷	ملکوش و هارتل (۲۰۲۵)	کارگاه جریان انعطاف‌پذیر دوباره‌ورودی	✗	✓	زمان ساخت	برنامه‌ریزی قیودی و ژنتیک ترکیبی
۸	ینگ و همکاران (۲۰۲۵)	برنامه‌ریزی تولید کوتاه‌مدت	✓	✗	اهداف متنوع	مرور بر پایه مسیر اصلی
۹	پژوهش حاضر	کارگاه جریان ترکیبی	✓	✓	مجموع دیرکرد	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط + بهینه‌سازی ازدحام ذرات با کدگذاری پیوسته و دیکودر سازنده

چارچوب مفهومی پژوهش، تعریف مسئله و مفروضات

مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان یکی از مسائل بنیادین در حوزه مهندسی صنایع و مدیریت عملیات است که به دلیل ماهیت ترکیبی، غیرخطی و رشد نمایی فضای جست‌وجو، در زمره مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. در این مسئله، مجموعه‌ای از سفارش‌ها باید به ترتیبی یکسان از چندین ماشین عبور کنند و هدف، بهینه‌سازی یک یا چند معیار عملکردی نظیر زمان تکمیل، دیرکرد یا هزینه‌های عملیاتی است. باوجود قدمت این مسئله، پیچیدگی‌های عملیاتی محیط‌های تولید واقعی سبب شده است که نسخه‌های توسعه‌یافته آن، همچنان به‌عنوان موضوعاتی فعال و چالش‌برانگیز در ادبیات پژوهشی مطرح باشند.

یکی از مهم‌ترین ابعاد توسعه‌یافته این مسئله، لحاظ‌کردن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی است. برخلاف مدل‌های کلاسیک که زمان آماده‌سازی را ناچیز یا مستقل از ترتیب انجام سفارش‌ها فرض می‌کنند، در بسیاری از سیستم‌های تولید واقعی نظیر صنایع شیمیایی، غذایی، دارویی و فلزی تغییر نوع محصول مستقیماً بر مدت و هزینه آماده‌سازی ماشین اثر می‌گذارد. در چنین شرایطی، توالی اجرای سفارش‌ها نه‌تنها تعیین‌کننده زمان‌های پردازش، بلکه عامل اصلی در شکل‌گیری زمان‌های آماده‌سازی و درنتیجه عملکرد کل سیستم تولید است. این وابستگی، ساختار مسئله را به‌شدت غیرخطی کرده و تصمیم‌گیری را به یک مسئله پیچیده توالی‌سازی تبدیل می‌کند.

در کنار این عامل فنی، محدودیت نیروی انسانی (اپراتور) بعد مهم دیگری از واقع‌گرایی را به مسئله می‌افزاید. در بسیاری از کارگاه‌های تولیدی، هر عملیات پردازشی مستلزم حضور یک اپراتور ماهر است و اپراتورها به‌عنوان منابع مشترک در کل سیستم عمل می‌کنند. ازآنجاکه هر اپراتور در هرلحظه تنها قادر به انجام یک عملیات است، ممکن است در شرایطی ماشین آماده پردازش باشد اما نبود اپراتور آزاد، شروع عملیات را به تعویق اندازد. این تعامل میان منابع فیزیکی (ماشین‌ها) و منابع انسانی (اپراتورها) می‌تواند منجر به ایجاد گلوگاه‌های پنهان، افزایش زمان انتظار و درنهایت افزایش دیرکرد سفارش‌ها شود.

بر این اساس، چارچوب مفهومی پژوهش حاضر بر یکپارچه‌سازی هم‌زمان سه مؤلفه اصلی تصمیم‌گیری استوار است، نخست تعیین توالی مشترک سفارش‌ها در محیط کارگاه جریان، سپس لحاظ‌کردن اثرات زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی بر روی ماشین‌ها و درنهایت تخصیص و زمان‌بندی اپراتورها به‌عنوان منبع مشترک و محدود؛ که این سه مؤلفه در تعامل مستقیم با یکدیگر قرار دارند و هرگونه تغییر در یکی از آن‌ها می‌تواند پیامدهای معناداری بر سایر تصمیم‌ها و درنهایت بر معیار عملکرد اصلی، یعنی کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها، داشته باشد. از این منظر، پژوهش نشان می‌دهد که تصمیم بهینه لزوماً با کمینه‌سازی جداگانه زمان‌های آماده‌سازی یا حداکثرسازی بهره‌برداری از ماشین‌ها حاصل نمی‌شود، بلکه نتیجه یک موازنه میان توالی سفارش‌ها، تخصیص اپراتورها و زمان‌بندی

عملیات است.

در همین چارچوب، مسئله موردبررسی به‌صورت یک مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان جایگشتی تعریف می‌شود که در آن تمامی سفارش‌ها باید به ترتیبی یکسان از تمامی ماشین‌ها عبور کنند و هدف، تعیین هم‌زمان توالی سفارش‌ها، زمان‌بندی عملیات‌ها و تخصیص اپراتورها به‌گونه‌ای است که مجموع دیرکرد سفارش‌ها نسبت به موعدهای تحویل از پیش تعیین‌شده کمینه گردد. این تعریف، بازتاب‌دهنده شرایط عملیاتی بسیاری از محیط‌های تولیدی واقعی است که در آن‌ها منابع انسانی و فنی به‌طور هم‌زمان محدود و متداخل هستند.

از منظر جایگاه علمی، این پژوهش در تقاطع سه جریان اصلی ادبیات قرار می‌گیرد: نخست، مطالعات زمان‌بندی کارگاه جریان با اهداف مبتنی بر دیرکرد؛ دوم، پژوهش‌های مرتبط با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی؛ و سوم، مطالعات مربوط به یکپارچه‌سازی محدودیت‌های نیروی انسانی در مسائل زمان‌بندی. اگرچه هر یک از این حوزه‌ها به‌صورت مستقل موردتوجه گسترده قرار گرفته‌اند، ترکیب هم‌زمان آن‌ها در قالب یک چارچوب منسجم و قابل پیاده‌سازی، همچنان با چالش‌های نظری و محاسباتی قابل‌توجهی همراه است.

به‌منظور تمرکز بر جنبه‌های کلیدی مسئله و امکان تحلیل و حل آن در قالب یک چارچوب منسجم، مفروضات زیر در این پژوهش در نظر گرفته شده است:

۱. ساختار کارگاه جریان با توالی یکسان: تمامی سفارش‌ها باید به ترتیبی یکسان از تمامی ماشین‌ها عبور کنند و ترتیب پردازش بر روی همه ماشین‌ها ثابت است.

۲. قطعیت پارامترها: زمان‌های پردازش، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و موعدهای تحویل سفارش‌ها قطعی و از پیش معلوم فرض می‌شوند.

۳. عدم وقفه در پردازش[1]: پس از شروع پردازش یک سفارش روی یک ماشین، عملیات بدون وقفه تا تکمیل ادامه می‌یابد.

۴. آماده‌سازی وابسته به توالی و برقراری نابرابری مثلثی: زمان‌های آماده‌سازی به ترتیب اجرای سفارش‌های متوالی وابسته بوده و به‌صورت متوالی با پردازش انجام می‌شوند. همچنین تمامی ماتریس‌های زمان آماده‌سازی در ایستگاه‌های مختلف خط تولید، نابرابری مثلثی را برقرار می‌سازند. از منظر عملیاتی در صنعت موردمطالعه (صنعت شوینده)، این قید بدین معناست که زمان شست‌وشو و تنظیم مجدد خط برای تغییر مستقیم از محصول i به محصول j، هرگز بیشتر از مجموع زمان‌های آماده‌سازی ناشی از تعویض واسطه‌ای به یک محصول سوم r نخواهد بود.

1. No Preemption

۵. نیاز هر عملیات به یک اپراتور و میزان مهارتی: انجام هر عملیات در هر ماشین مستلزم حضور دقیقاً یک اپراتور است. تمام اپراتورها چندمهارته و همگن فرض می‌شوند؛ به این معنی که هر اپراتور توانایی و مهارت کافی برای انجام عملیات آماده‌سازی و پردازش روی تمامی ماشین‌های خط تولید را داراست.

۶. عدم هم‌زمانی و لزوم حضور کامل اپراتور: هر اپراتور در هرلحظه تنها می‌تواند به یک ماشین/عملیات تخصیص یابد. حضور اپراتور تخصیص‌یافته در تمام طول مدت آماده‌سازی و پردازش عملیات الزامی است و اپراتور تا زمان اتمام کامل پردازش عملیات جاری روی ماشین مربوطه، آزاد نخواهد شد و امکان تخصیص به عملیات دیگری را ندارد.

۷. دسترس‌پذیری کامل منابع در ابتدای افق برنامه‌ریزی: تمامی ماشین‌ها و اپراتورها در زمان صفر در دسترس هستند و خرابی یا غیبت لحاظ نمی‌شود.

۸. نادیده‌گرفتن زمان حمل‌ونقل: انتقال سفارش‌ها بین ماشین‌ها آنی فرض می‌شود.

۹. هدف تک‌معیاره مبتنی بر دیرکرد: تنها معیار عملکرد موردنظر، کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌هاست.

درمجموع، چارچوب مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش، پلی میان مدل‌سازی دقیق ریاضی و حل‌پذیری عملی ایجاد می‌کند. این چارچوب نه‌تنها به غنای ادبیات نظری زمان‌بندی می‌افزاید، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک الگوی تصمیم‌یار برای مدیران تولید در محیط‌های واقعی با منابع محدود و متداخل مورداستفاده قرار گیرد.

مدل ریاضی مسئله

مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش باهدف نمایش دقیق تعامل میان توالی سفارش‌ها، زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت نیروی انسانی (اپراتور) در یک محیط کارگاه جریان تدوین شده است. منطق اصلی مدل بر پایه تعیین یک توالی مشترک برای تمامی ماشین‌ها استوار است، به‌گونه‌ای که هر سفارش دقیقاً یک‌بار در این توالی قرار گیرد و عملیات متناظر با هر موقعیت از توالی، به ترتیب بر روی ماشین‌های مختلف پردازش شود. در این چارچوب، زمان شروع و پایان هر عملیات نه‌تنها تابع زمان‌های پردازش و تقدم‌های تکنولوژیک است، بلکه تحت تأثیر زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و در دسترس بودن اپراتورها نیز قرار دارد. هدف نهایی مدل، کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها نسبت به موعدهای تحویل از پیش تعیین‌شده است که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای عملکرد در محیط‌های تولید مبتنی بر سفارش شناخته می‌شود. اطلاعات مدل ریاضی مسئله در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مدل ریاضی مسئله

مجموعه‌ها، شاخص‌ها و پارامترها	
مجموعه سفارش‌ها	$J = \{1, \dots, n\}$
مجموعه ماشین‌ها	$K = \{1, \dots, m\}$
مجموعه موقعیت‌ها در توالی پردازش	$r = \{1, \dots, n\}$
مجموعه اپراتورها	$H = \{1, \dots, H\}$
اندیس سفارش‌ها	i, j
زمان پردازش سفارش i روی ماشین k	p_{ik}
زمان آماده‌سازی روی ماشین k درصورتی‌که سفارش j بلافاصله پس از سفارش i پردازش شود	s_{ijk}
موعد تحویل سفارش i	d_i
یک عدد بزرگ مثبت برای خطی‌سازی قیود منطقی	M
متغیرهای تصمیم	
متغیرهای جایگشتی	
اگر سفارش i در موقعیت r قرار گیرد یک در غیر این صورت صفر	$x_{ri} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$
متغیرهای زمانی	
زمان شروع عملیات در موقعیت r روی ماشین k	S_{rk}
زمان پایان همان عملیات	C_{rk}
متغیرهای تخصیص اپراتور	
اگر اپراتور h به عملیات $(r.k)$ تخصیص یابد یک	$z_{hkr} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

در غیر این صورت صفر

متغیر دیرکرد سفارش‌ها

$$T_i \geq 0$$

تابع هدف	
$\min Z = \sum_{i \in J} T_i$	(۱)
محدودیت‌های مدل	
$\sum_{i \in J} x_{ir} = 1 \forall r$	(۲)
$\sum_{r} x_{ir} = 1 \forall i$	(۳)
$C_{rk} = S_{rk} + \sum_{i} x_{ir} p_{ik} \forall r, k$	(٤)
$S_{r,k} \geq C_{r,k-1} \forall r,\ k > 1$	(٥)
$S_{rk} \geq C_{r-1,k} + \sum_{i} \sum_{j} x_{i,r-1} x_{jr} s_{ijk} \forall r > 1,\ k$	(٦)
$\sum_{h} z_{rkh} = 1 \forall r, k$	(۷)
$S_{r'k'} \geq C_{rk} - M(2 - z_{rkh} - z_{r'k'h})$	(۸)
$C_i = \sum_{r} x_{ir} C_{r,m} \forall i$	(۹)
$T_i \geq C_i - d_i \forall i$	(۱۰)
$T_i \geq 0 \forall i$	(۱۱)
$x_{ir},\ z_{rkh} \in \{0,1\}$	(۱۲)
$S_{rk},\ C_{rk} \geq 0$	(۱۳)

رابطه (۱) تابع هدف مدل را تعریف می‌کند که بر کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها متمرکز است. از منظر مفهومی، این معیار مستقیماً سطح خدمت‌دهی سیستم تولید را بازتاب می‌دهد و نشان می‌دهد که مدل به‌جای تمرکز صرف بر کارایی داخلی (مانند زمان تکمیل کل)، بر پاسخ‌گویی به تعهدات زمانی مشتریان تأکید دارد. از منظر محاسباتی، تابع هدف خطی بوده و متغیرهای دیرکرد را به‌عنوان متغیرهای پیوسته غیرمنفی وارد مدل می‌کند که این امر حل‌پذیری مدل را در چارچوب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تسهیل می‌نماید. روابط (۲) و (۳) ساختار جایگشتی مسئله را تضمین می‌کنند. رابطه (۲) بیان می‌کند که هر موقعیت از توالی پردازش دقیقاً به یک سفارش اختصاص می‌یابد، درحالی‌که رابطه (۳) تضمین می‌کند هر سفارش تنها در یک موقعیت از توالی قرار گیرد. ازنظر مفهومی، این دو قید اساس مدل کارگاه جریان با توالی یکسان را شکل می‌دهند و مانع از تکرار یا حذف سفارش‌ها در توالی می‌شوند. از دیدگاه محاسباتی، این قیود باعث ایجاد یک ماتریس جایگشتی دودویی می‌شوند که فضای جست‌وجوی مسئله را به‌صورت نمایی بزرگ می‌کند و منشأ اصلی سختی محاسباتی مدل به شمار می‌رود. رابطه (۴) ارتباط مستقیم میان زمان شروع و زمان پایان هر عملیات را برقرار می‌کند. این قید تضمین می‌کند که زمان پایان عملیات در موقعیت r روی ماشین k برابر با زمان شروع آن به‌علاوه زمان پردازش سفارش متناظر باشد. از منظر مفهومی، این رابطه بیانگر ماهیت غیرقابل‌وقفه عملیات‌ها است. ازنظر محاسباتی، این قید یک رابطه خطی ساده است که متغیرهای دودویی تخصیص سفارش به موقعیت را به متغیرهای زمانی پیوند می‌دهد و نقش مهمی در انتقال اثر تصمیم‌های توالی به زمان‌بندی ایفا می‌کند. رابطه (۵) تقدم تکنولوژیک میان ماشین‌ها را در محیط کارگاه جریان اعمال می‌کند. بر اساس این قید، هر سفارش تنها پس از اتمام پردازش خود روی ماشین قبلی می‌تواند روی ماشین بعدی آغاز شود. از منظر مفهومی، این قید بازتاب‌دهنده مسیر ثابت جریان مواد یا عملیات در سیستم تولید است. ازنظر محاسباتی، این محدودیت از هم‌پوشانی عملیات یک سفارش روی ماشین‌های مختلف جلوگیری کرده و توالی منطقی پردازش را تضمین می‌کند. رابطه (۶) یکی از کلیدی‌ترین قیود مدل محسوب می‌شود. این قید تضمین می‌کند که عملیات در موقعیت r روی ماشین k تنها پس از اتمام عملیات قبلی روی همان ماشین و طی شدن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی آغاز شود. ازنظر مفهومی، این رابطه نشان می‌دهد که تغییر ترتیب سفارش‌ها مستقیماً بر زمان آماده‌سازی و درنتیجه بر زمان شروع عملیات‌ها اثرگذار است. از منظر محاسباتی، حضور حاصل‌ضرب متغیرهای دودویی در این قید، بیانگر وابستگی غیرخطی تصمیم‌های توالی به زمان‌بندی است که نقش مهمی در افزایش پیچیدگی مدل دارد. رابطه (۷) تضمین می‌کند که هر عملیات به دقیقاً یک اپراتور از مجموعه اپراتورهای چندمهارته تخصیص یابد. از منظر مفهومی، این قید بیانگر وابستگی اجرای عملیات‌ها به نیروی انسانی است و اپراتورها را به‌عنوان یک منبع حیاتی در کنار ماشین‌ها وارد مدل

می‌کند. ازنظر محاسباتی، این قید باعث افزایش تعداد متغیرهای دودویی و درنتیجه افزایش بعد تصمیم‌گیری مدل می‌شود، اما برای بازنمایی واقع‌گرایانه محیط‌های تولیدی ضروری است. رابطه (۸) نیز لزوم حضور مداوم اپراتور در تمام طول زمان اجرا (شامل زمان آماده‌سازی و زمان پردازش) را اعمال می‌کند و از تداخل زمانی فعالیت‌های یک اپراتور روی ماشین‌های مختلف جلوگیری می‌نماید. از منظر مفهومی، این قید تضمین می‌کند که هر اپراتور در هرلحظه تنها بر یک عملیات متمرکز باشد. از دیدگاه محاسباتی، استفاده از عدد بزرگ M در این رابطه، امکان مدل‌سازی شرطی محدودیت را فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تنها در صورت تخصیص مشترک یک اپراتور به دو عملیات، قید فعال می‌شود. این قید یکی از عوامل اصلی افزایش سختی محاسباتی مدل محسوب می‌شود، زیرا تعامل زمانی میان عملیات‌های مختلف را به‌صورت ضمنی وارد مسئله می‌کند. رابطه (۹) زمان تکمیل هر سفارش را به‌عنوان زمان پایان آن روی آخرین ماشین تعریف می‌کند. از منظر مفهومی، این رابطه نقطه اتصال میان زمان‌بندی داخلی عملیات‌ها و معیارهای عملکرد مبتنی بر مشتری است. ازنظر محاسباتی، این قید یک رابطه خطی تجمیعی است که امکان محاسبه مستقیم دیرکرد سفارش‌ها را فراهم می‌سازد. روابط (۱۰) و (۱۱) دیرکرد سفارش‌ها را تعریف می‌کنند. بر اساس این روابط، دیرکرد تنها در صورتی مثبت است که زمان تکمیل سفارش از موعد تحویل آن فراتر رود. از منظر مفهومی، این تعریف با مفهوم کلاسیک دیرکرد در ادبیات زمان‌بندی سازگار است. ازنظر محاسباتی، این روابط با استفاده از متغیرهای پیوسته غیرمنفی، تابع هدف را به‌صورت خطی و قابل‌حل در چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[1] نگه می‌دارند. روابط (۱۲) و (۱۳) دامنه متغیرهای دودویی و پیوسته مدل را مشخص می‌کنند. از منظر مفهومی، این قیود ماهیت تصمیم‌های گسسته (توالی و تخصیص اپراتور) و پیوسته (زمان‌بندی) را تفکیک می‌کنند. ازنظر محاسباتی، ترکیب این دو نوع متغیر، مدل را در رده مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط قرار می‌دهد که حل دقیق آن برای ابعاد متوسط و بزرگ چالش‌برانگیز است.

به‌طورکلی، اجزای شماره‌گذاری‌شده مدل در تعامل با یکدیگر، یک چارچوب منسجم برای بازنمایی هم‌زمان تصمیم‌های توالی، زمان‌بندی و تخصیص منابع انسانی فراهم می‌کنند. این تعامل، اگرچه موجب افزایش دقت مدل در نمایش واقعیت‌های عملیاتی می‌شود، اما پیچیدگی محاسباتی مسئله را نیز به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، تفسیر مفهومی و محاسباتی ارائه‌شده، مبنای نظری لازم را برای توجیه استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر بهینه‌سازی ازدحام ذرات در بخش روش حل فراهم می‌کند.

1. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

مطالعه موردی

به‌منظور افزایش واقع‌گرایی و قابلیت تعمیم نتایج، یک کارگاه تولیدی با ماهیت فرآیندی بچ در صنعت شوینده ایران به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. در این محیط، سفارش‌ها برای محصولات مختلف شوینده (مایع ظرف‌شویی، شامپو، سفیدکننده و...) باید به‌صورت متوالی از چند ایستگاه عبور کنند. با توجه به ماهیت فرآیند، ترتیب عملیات برای همه سفارش‌ها ثابت است و می‌توان آن را با ساختار کارگاه جریان مدل کرد. همچنین تغییر نوع محصول بین دو سفارش متوالی، به عملیات شست‌وشو، تخلیه، تنظیم پارامترها و تغییر مواد اولیه منجر می‌شود که زمان آماده‌سازی وابسته به توالی را ایجاد می‌کند. در کنار محدودیت ماشین‌ها، اجرای هر عملیات نیازمند حضور اپراتور است (اپراتور میکسر، اپراتور پرکن، اپراتور لیبل و بسته‌بندی). ازآنجاکه اپراتورها در برخی شیفت‌ها مشترک یا محدود هستند، ممکن است ماشین آماده باشد اما اپراتور آزاد موجود نباشد؛ لذا زمان شروع عملیات به تعویق افتاده و دیرکرد افزایش یابد؛ بنابراین، مطالعه موردی به‌صورت یک مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور تعریف می‌شود و تابع هدف، کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها است. با توجه به اطلاعات گردآوری‌شده تعداد سفارش‌ها برابر ۸ واحد است که توسط ۳ ماشین (ایستگاه)، میکسر، پرکنی و بسته‌بندی نهایی توسط ۳ اپراتور انجام می‌شود. اطلاعات موعد تحویل سفارش‌ها، زمان‌های پردازش و ماتریس زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی برای هر ماشین در پیوست گزارش شده است.

پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

مسئله حاضر یک زمان‌بندی کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور باهدف کمینه‌سازی مجموع دیرکرد است. ازآنجاکه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌صورت کلاسیک در فضای پیوسته عمل می‌کند، راهکار استاندارد، تعریف یک کُدگذاری پیوسته و سپس تبدیل آن به تصمیم‌های گسسته از طریق یک دیکودر است. در این پژوهش، هر ذره در الگوریتم یک بردار پیوسته شامل دو بخش دارد:

۱. بردار کلید تصادفی برای توالی سفارش‌ها(Random Keys) که با مرتب‌سازی صعودی عناصر آن، یک توالی جایگشتی π تولید می‌شود.

$$\mathbf{x}^{(J)} \in \mathbb{R}^n$$

۲. بردار کلید برای تخصیص اپراتور به عملیات‌ها که هر مقدار پیوسته به یکی از اپراتورها $h \in \{1, \dots, H\}$ نگاشت می‌شود.

$$\mathbf{x}^{(O)} \in \mathbb{R}^{n \times m}$$

پس موقعیت هر ذره به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}^{(J)}, \text{vec}(\mathbf{x}^{(O)})] \in \mathbb{R}^{n+nm}$$

با داشتن π و نگاشت اپراتورها، زمان‌بندی به‌صورت سازنده ایجاد می‌شود. برای هر عملیات (r, k):

- قید تقدم تکنولوژیک: عملیات روی ماشین k پس از تکمیل ماشین $k-1$ برای همان موقعیت r
- قید عدم همپوشانی ماشین و آماده‌سازی وابسته به توالی: عملیات (r, k) پس از تکمیل $(r-1, k)$ به‌علاوه $s_{\pi(r-1),\pi(r),k}$ برای $r > 1$
- قید محدودیت اپراتور: شروع عملیات منوط به آزاد بودن اپراتور تخصیص‌یافته است.

بنابراین:

$$S_{r,k}^{base} = \max(C_{r,k-1}, C_{r-1,k} + setup_{r,k})$$

$$S_{r,k} = \max(S_{r,k}^{base}, A_{\alpha_{r,k}})$$

$$C_{r,k} = S_{r,k} + p_{\pi(r),k}$$

که A_h زمان آزاد شدن اپراتور h و $\alpha_{r,k}$ اپراتور تخصیص‌یافته به عملیات (r, k) است. سپس :

$$C_{\pi(r)} = C_{r,m}, T_i = \max(0, C_i - d_i)$$

این دیکودر، منطق قیود (۴)، (۵)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹)، (۱۰) را در قالب یک ارزیاب اجرایی پیاده می‌کند.

لازم به ذکر است که در فرایند دیکودر سازنده، گام‌های ارزیابی و زمان‌بندی عملیات‌ها به‌صورت ترتیبی بر اساس اولویت موقعیت سفارش در توالی جایگشتی π و سپس تقدم تکنولوژیک ماشین‌ها انجام می‌پذیرد. درصورتی‌که در یک لحظه زمانی مشخص، چند عملیات به‌صورت هم‌زمان آماده پردازش بوده و نیازمند یک اپراتور مشترک باشند، تخصیص اپراتور و حل تعارض زمانی بر اساس قانون FIFO (نخستین ورودی، نخستین سرویس) متناظر با توالی جایگشتی π صورت می‌گیرد. به‌بیان‌دیگر، عملیاتی که در توالی π در موقعیت زودتری قرار دارد (و در صورت یکسان بودن سفارش، روی ماشین با اندیس کوچک‌تر قرار دارد)، اولویت بالاتری برای دریافت اپراتور دارد. پس از تخصیص اپراتور به عملیات واجد اولویت، زمان آزادسازی اپراتور به $A_h=C_{r,k}$ به‌روزرسانی شده و عملیات‌های بعدی نیازمند همان اپراتور، تا زمان آزادسازی جدید منتظر می‌مانند.

پس از تعریف دیکودر نوبت به تنظیم و تعریف پارامترهای الگوریتم می‌رسد، نخست، اندازه جمعیت ذرات تعیین‌کننده تعداد راه‌حل‌های هم‌زمانی است که در هر تکرار فضای جست‌وجو را کاوش می‌کنند. افزایش این پارامتر موجب بهبود پوشش فضای جست‌وجو و کاهش احتمال گرفتارشدن در

بهینه‌های محلی می‌شود، اما هم‌زمان هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. در مقابل، جمعیت‌های کوچک‌تر سرعت اجرا را افزایش می‌دهند، ولی ممکن است به افت کیفیت یا ناپایداری نتایج منجر شوند.

حداکثر تعداد تکرارها عمق جست‌وجوی الگوریتم را کنترل می‌کند و بیانگر افق زمانی حرکت ذرات در فضای تصمیم است. در مسائل زمان‌بندی پیچیده، انتخاب تعداد تکرار کافی برای دستیابی به همگرایی پایدار ضروری است، اما افزایش بیش‌ازحد آن الزاماً به بهبود معنادار کیفیت راه‌حل نمی‌انجامد و می‌تواند هزینه محاسباتی را افزایش دهد.

وزن لختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم است که میزان حفظ سرعت قبلی ذرات را کنترل می‌کند. استفاده از وزن لختی کاهشی که از مقدار اولیه بزرگ به مقدار نهایی کوچک کاهش می‌یابد، راهبردی رایج برای تقویت اکتشاف در مراحل ابتدایی و تمرکز بر بهره‌برداری در مراحل پایانی جست‌وجو محسوب می‌شود. این سازوکار به جلوگیری از همگرایی زودرس و افزایش پایداری الگوریتم کمک می‌کند.

ضرایب یادگیری فردی و اجتماعی به‌ترتیب شدت گرایش هر ذره به بهترین تجربه شخصی خود و بهترین تجربه جمعی ازدحام را مشخص می‌کنند. تعادل میان این دو پارامتر برای حفظ تنوع جمعیت و درعین حال تسریع همگرایی اهمیت دارد. مقادیر برابر برای این ضرایب معمولاً رفتاری متوازن ایجاد می‌کند، درحالی‌که افزایش ضریب اجتماعی می‌تواند همگرایی سریع‌تر ولی پرریسک‌تر را به دنبال داشته باشد.

حداکثر سرعت ذرات به‌عنوان یک سازوکار کنترلی، از جهش‌های بزرگ و ناپایدار در فضای جست‌وجو جلوگیری می‌کند. این پارامتر به‌ویژه در مسائل با کدگذاری پیوسته گسسته (مانند مسائل جایگشتی) نقش مهمی در حفظ پایداری حرکت ذرات دارد.

درنهایت، بازه موقعیت ذرات محدوده‌ای را تعیین می‌کند که متغیرهای پیوسته الگوریتم در آن تعریف می‌شوند. انتخاب یک بازه محدود و متقارن، نگاشت پایدار مقادیر پیوسته به تصمیم‌های گسسته (نظیر توالی سفارش‌ها یا تخصیص اپراتور) را تسهیل کرده و از ناپایداری عددی جلوگیری می‌کند. در جدول ۳ پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و نقش آن‌ها در مسئله زمان‌بندی مطابق با توضیحات فوق‌الذکر ارائه شده است.

تعیین و تنظیم‌سازی پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در این پژوهش طی یک فرایند دومرحله‌ای انجام شده است. در مرحله نخست، با استناد به سطوح تجربی توصیه‌شده در ادبیات پژوهش‌های معتبر زمان‌بندی بازه اولیه و منطقی برای تغییرات پارامترها مشخص گردید. در مرحله دوم، با اجرای آزمایش‌های آزمایشی مقدماتی روی داده‌های نمونه و ارزیابی هم‌زمان دو شاخص میانگین کیفیت

پاسخ (توابع هدف) و زمان محاسباتی، مقادیر دقیق پارامترها کالیبره و تثبیت شدند. همچنین به‌منظور بررسی رفتار الگوریتم در سطوح مختلف پارامتری و صحه‌گذاری بر سطوح انتخابی، تحلیل حساسیت جامعی در قالب سه سناریوی پارامتری متمایز (تنظیمات مرجع، تقویت اکتشاف و همگرایی سریع) انجام و نتایج ارائه شد.

جدول ۳. **پارامترهای الگوریتم**

ردیف	پارامتر	نماد	نقش مفهومی و محاسباتی	دامنه
۱	اندازه جمعیت ذرات	N_{pop}	کنترل تنوع جمعیت و قدرت اکتشاف فضای جست‌وجو	**۴۰ تا ۸۰**
۲	حداکثر تعداد تکرارها	$Iter_{max}$	تعیین عمق جست‌وجو و افق همگرایی الگوریتم	**۲۰۰ تا ۶۰۰**
۳	وزن لختی	ω	تنظیم توازن اکتشاف، بهره‌برداری؛ معمولاً به‌صورت کاهشی	**کاهش خطی از ۰٫۹ به ۰٫۴**
۴	ضریب یادگیری فردی	c_1	گرایش ذره به بهترین تجربه شخصی (pbest)	**۲**
۵	ضریب یادگیری اجتماعی	c_2	گرایش ذره به بهترین تجربه جمعی (gbest)	**۲**
۶	حداکثر سرعت ذرات	v_{max}	جلوگیری از جهش‌های بزرگ و ناپایداری حرکت	$\mathbf{0.2(x_{max}-x_{min})}$
۷	بازه موقعیت ذرات	(x_{min}, x_{max})	تضمین نگاشت پایدار به تصمیم‌های گسسته	**(−۴، +۴)**

به‌منظور ارزیابی معتبر عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، آزمایش‌ها در قالب R اجرای مستقل با دانه های تصادفی متفاوت انجام شد. در هر اجرا، بهترین مقدار تابع هدف (مجموع دیرکرد) به‌عنوان خروجی نهایی ثبت گردید.

ارزیابی عملکرد الگوریتم در حل مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور بر اساس ۲۰ اجرای مستقل با دانه‌های تصادفی متفاوت به‌دست آمده است که در جدول ۴ ارائه شده است، شاخص های کلیدی کیفیت، پایداری، کارایی محاسباتی و رفتار همگرایی الگوریتم را گزارش می کند.

جدول ٤. شاخص‌های عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

ردیف	شاخص	نماد	مقدار	توضیح
۱	تعداد اجراهای مستقل	Runs	۲۰	تعداد اجرای الگوریتم با دانه‌های تصادفی متفاوت
۲	بهترین مقدار تابع هدف	Objective min	۲۴٫۶	کمینه مجموع دیرکرد به‌دست‌آمده

ردیف	شاخص	نماد	مقدار	توضیح
۳	میانگین مقدار تابع هدف	Objective mean	۲۵٫۲۷	میانگین بهترین جواب نهایی در اجراها
۴	انحراف معیار تابع هدف	Objective std	۱٫۴۳	شاخص پایداری نتایج الگوریتم
۵	میانگین زمان اجرا (ثانیه)	Time mean	۳٫۲۶	متوسط زمان محاسباتی الگوریتم
۶	انحراف معیار زمان اجرا	Time std	۰٫۴۴	پراکندگی زمان اجرا
۷	میانگین تکرار همگرایی	ConvIter mean	۴۸٫۵	متوسط تکرار رسیدن به معیار توقف
۸	انحراف معیار تکرار همگرایی	ConvIter std	۸٫۰۹	نوسان همگرایی بین اجراها
۹	آستانه همگرایی	ε	1×10^{-6}	معیار توقف مبتنی بر بهبود تابع هدف
۱۰	پنجره صبر	Patience	۳۰	تعداد تکرار بدون بهبود مجاز
۱۱	اندازه جمعیت ذرات	N_{pop}	۶۰	تعداد ذرات در ازدحام
۱۲	حداکثر تعداد تکرار	Iter	۴۰۰	سقف تکرارهای الگوریتم
۱۳	وزن لختی بیشینه	w_{max}	۰٫۹	وزن لختی در ابتدای جست‌وجو
۱۴	وزن لختی کمینه	w_{min}	۰٫۴	وزن لختی در انتهای جست‌وجو
۱۵	ضریب یادگیری فردی	c_1	۲	شدت گرایش به بهترین تجربه شخصی
۱۶	ضریب یادگیری اجتماعی	c_2	۲	شدت گرایش به بهترین تجربه جمعی
۱۷	حداکثر سرعت ذرات	v_{max}	۱	محدودیت تغییرات سرعت
۱۸	کران پایین موقعیت	x_{min}	-۴	حد پایین فضای جست‌وجوی پیوسته
۱۹	کران بالای موقعیت	x_{max}	۴	حد بالای فضای جست‌وجوی پیوسته

نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که الگوریتم در تنظیمات مبنا، توانایی بالایی در تولید راه‌حل‌های با کیفیت و پایدار برای مسئله موردمطالعه دارد. فاصله اندک میان مقدار بهترین جواب (۲۴/۶) و میانگین بهترین جواب‌ها (۲۵/۲۷) حاکی از آن است که الگوریتم در اغلب اجراها به نواحی نزدیک به بهترین جواب شناسایی‌شده همگرا شده و احتمال گرفتارشدن در بهینه‌های محلی ضعیف محدود بوده است.

مقدار نسبتاً پایین انحراف معیار تابع هدف (۱/۴۳) مؤید ثبات رفتاری الگوریتم در مواجهه با تصادفی‌بودن ذاتی بهینه‌سازی ذرات است. این موضوع از منظر نتایج اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا نشان می‌دهد کیفیت نتایج به‌شدت وابسته به مقداردهی اولیه یا دانه تصادفی نیست و الگوریتم از قابلیت تکرارپذیری مناسبی برخوردار است.

ازنظر کارایی محاسباتی، میانگین زمان اجرای حدود ۳/۳ ثانیه برای هر اجرا، با توجه به در نظر گرفتن هم‌زمان توالی سفارش‌ها، آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور، بیانگر تعادل مناسب میان دقت مدل و هزینه محاسباتی است. انحراف معیار پایین زمان اجرا نیز نشان می‌دهد که پیچیدگی محاسباتی الگوریتم در اجراهای مختلف رفتار یکنواختی دارد.

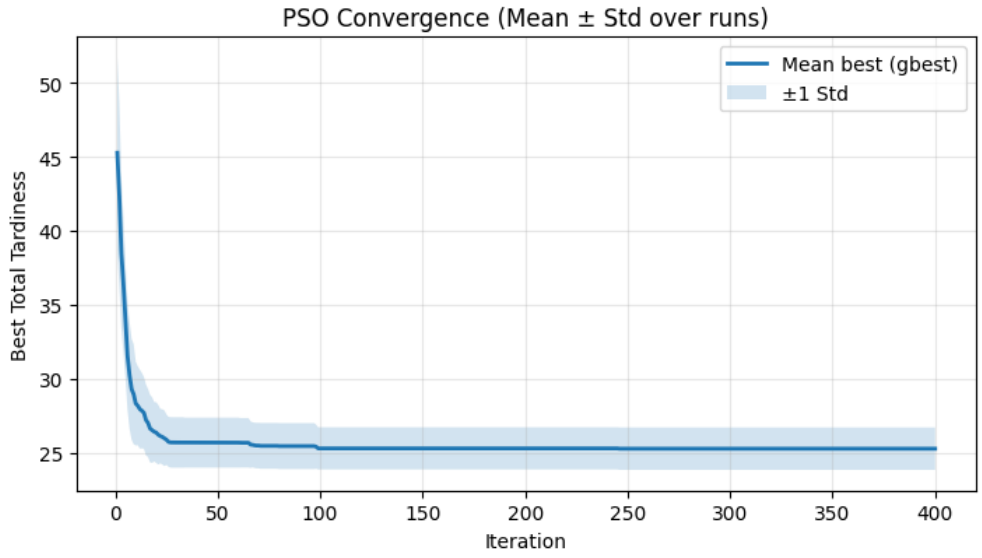
رفتار همگرایی الگوریتم یکی از نکات برجسته این خروجی است. همگرایی در حدود تکرار ۴۸ به این معناست که الگوریتم بخش عمده‌ای از فضای جست‌وجو را در مراحل ابتدایی طی کرده و سپس وارد فاز بهره‌برداری شده است. این موضوع نشان می‌دهد که تنظیم وزن لختی کاهشی و ضرایب یادگیری انتخاب‌شده، تعادل مناسبی میان اکتشاف اولیه و بهره‌برداری نهایی ایجاد کرده‌اند. از سوی دیگر، فاصله قابل توجه میان تکرار همگرایی و حداکثر تکرارها (۴۰۰) بیانگر آن است که الگوریتم دارای حاشیه اطمینان کافی برای ادامه جست‌وجو بوده و توقف زودهنگام تحمیل نشده است.

درمجموع، این خروجی به‌عنوان سناریوی مبنا نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات قادر است مسئله زمان‌بندی پیچیده حاضر را با کیفیت بالا، پایداری مناسب و هزینه محاسباتی قابل‌قبول حل کند. این نتایج، مبنای قابل‌اعتمادی برای مقایسه با سناریوهای تحلیل حساسیت پارامترها یا الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر فراهم می‌سازد و به‌خوبی توجیه‌کننده انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌عنوان روش حل اصلی در این پژوهش است.

نمودار همگرایی الگوریتم در قالب میانگین بهترین مقدار تابع هدف به‌همراه بازه انحراف معیار طی ۲۰ اجرای مستقل در شکل ۱ ارائه‌شده است. محور افقی نشان‌دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم و محور عمودی بیانگر مقدار بهترین مجموع دیرکرد[1] در هر تکرار است. منحنی اصلی میانگین بهترین مقدار جهانی تابع هدف را در هر تکرار، بر اساس تمامی اجراهای مستقل، نشان می‌دهد. ناحیه سایه‌دار اطراف منحنی، بازه ±۱ انحراف معیار را نمایش می‌دهد که پراکندگی نتایج در اجراهای مختلف را در هر تکرار مشخص می‌سازد. این نمایش گرافیکی امکان بررسی هم‌زمان سرعت همگرایی، پایداری الگوریتم و تغییرات تصادفی بین اجراها را فراهم می‌کند. نمودار از تکرار نخست تا تکرار ۴۰۰ ترسیم شده است که منطبق با حداکثر تعداد تکرارهای مجاز در تنظیمات بوده و رفتار الگوریتم را در کل افق جست‌وجو نشان می‌دهد.

1. Best Total Tardiness

شکل ۱. نمودار همگرایی



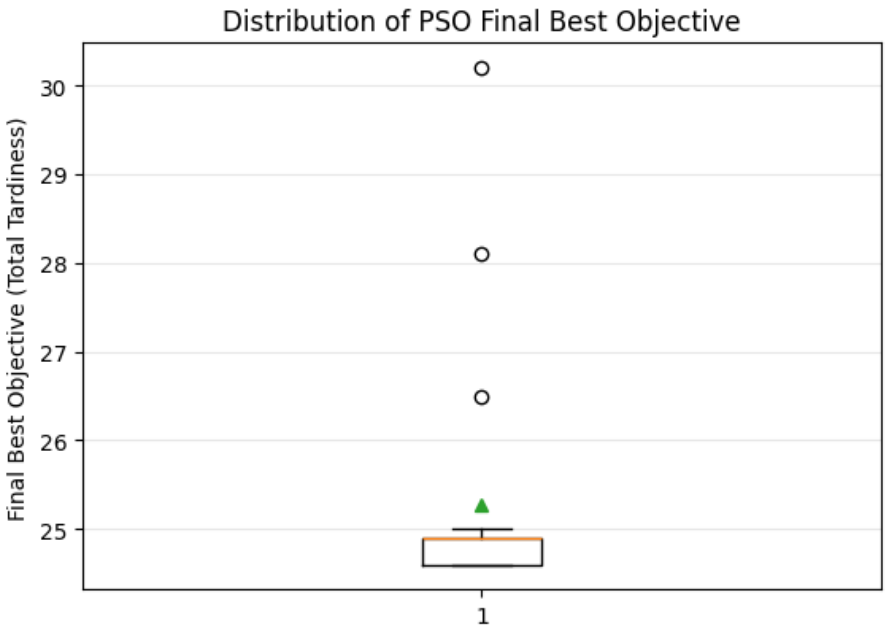
تحلیل نمودار همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم در مراحل ابتدایی اجرا، کاهش بسیار سریع و معناداری در مقدار تابع هدف ایجاد کرده است. افت تند منحنی میانگین در حدود ۲۰ تا ۳۰ تکرار نخست بیانگر آن است که الگوریتم در این بازه، به‌خوبی توانسته است فضای جست‌وجو را کاوش کرده و از نواحی با کیفیت پایین فاصله بگیرد. این رفتار، نشان‌دهنده نقش مؤثر وزن لختی بالا در مراحل اولیه و تقویت مؤلفه اکتشافی الگوریتم است.

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار همگرایی الگوریتم و اطمینان از عدم وقوع همگرایی زودرس یا گیر افتادن ذرات در بهینه‌های محلی، دو مسئله مهم قابل‌توجه است. نخست ابعاد فضای مسئله و سازوکارهای حفظ تنوع جمعیت که در مطالعه موردی حاضر با هشت سفارش، کل فضای توالی‌های ممکن برابر!۸ است. الگوریتم با اندازه جمعیت ۶۰ ذره در طی ۵۰ تکرار نخست، حدود ۳۰۰۰ راه‌حل را ارزیابی و کاوش می‌کند که سهم قابل‌توجهی از مناطق امیدبخش فضای جست‌وجو را پوشش می‌دهد. ثانیاً، برای جلوگیری از افت ناگهانی تنوع ذرات و خروج از بهینه‌های محلی محتمل، الگوریتم از سه سازوکار هم‌زمان بهره می‌جوید. (۱) وزن لختی کاهشی خطی که در ۵۰ تکرار اول با بالا نگه‌داشتن ω، قدرت اکتشاف را حفظ می‌کند؛ (۲) محدودسازی سرعت که مانع انباشت ذرات در یک نقطه منفرد می‌شود؛ و (۳) اعمال عملگر جهش/اغتشاش تصادفی؛ به‌طوری‌که هرگاه بهترین جواب جمعی طی یک پنجره صبر مشخص (مثلاً ۳۰ تکرار) هیچ بهبودی تجربه نکند، درصد مشخصی از ذرات کندتر به‌صورت تصادفی مجدداً در فضای پیوسته مقداردهی اولیه می‌شوند تا تنوع جدیدی به ازدحام تزریق گردد. تثبیت نمودار همگرایی روی مقدار ۶/۲۴ در تکرارهای بعدی، به معنای گرفتار شدن در بهینه محلی ضعیف نیست، بلکه

نشان‌دهنده دستیابی الگوریتم به جواب بهینه مطلق مسئله و تثبیت در نقطه کمینه سراسری است.

نمودار جعبه‌ای در شکل ۲، توزیع بهترین مقدار نهایی تابع هدف الگوریتم را در مجموعه‌ای از اجراهای مستقل نمایش می‌دهد. محور عمودی بیانگر مقدار مجموع دیرکرد نهایی[1] و محور افقی معرف مجموعه اجراهای الگوریتم است. در این نمودار، جعبه مرکزی دامنه بین چارک اول و سوم را نشان می‌دهد که بیانگر تمرکز اصلی نتایج است. خط میانی داخل جعبه، میانه بهترین مقدار تابع هدف را نمایش می‌دهد و علامت مثلثی نشان‌دهنده میانگین مقادیر نهایی است. نقاط مجزا در بالا یا پایین جعبه به‌عنوان داده‌های پرت[2] شناسایی شده‌اند که بیانگر اجراهایی با عملکرد متفاوت نسبت به رفتار غالب الگوریتم هستند.

شکل ۲. نمودار جعبه‌ای توزیع بهترین مقدار نهایی



تحلیل نمودار جعبه‌ای نشان می‌دهد که بخش عمده اجراهای الگوریتم در بازه‌ای متراکم حول مقدار ۲۵ همگرا شده‌اند. فشردگی جعبه، انحراف معیار پایین و نزدیکی میانگین و میانه، بیانگر توزیع متقارن، پایداری بالا و تکرارپذیری مناسب الگوریتم است. وجود تعداد محدودی داده پرت نیز رفتاری رایج در فراابتکاری‌ها و ناشی از تصادفی‌بودن مقداردهی اولیه یا گیر افتادن موقت در بهینه‌های محلی است که به دلیل تعداد اندک، تأثیری بر عملکرد کلی الگوریتم ندارد.

از منظر روش‌شناختی، این تراکم بالا توجیه‌کننده استفاده از میانگین و انحراف معیار برای ارزیابی

1. Final Best Objective
2. Outliers

عملکرد است. از دیدگاه کاربردی نیز به تصمیم‌گیرنده صنعتی اطمینان می‌دهد که کیفیت راه‌حل‌ها وابستگی شدیدی به یک اجرای خاص ندارد. درمجموع، این تحلیل پایداری آماری و اتکاپذیری الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را در حل مسئله زمان‌بندی حاضر تأیید می‌کند.

در انتها و به‌منظور صحه‌گذاری بر کارآمدی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیشنهادی و اثبات اعتبار تجربی نتایج آن، عملکرد این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یکی از قدرتمندترین، رایج‌ترین و شناخته‌شده‌ترین فراابتکاری‌های حوزه زمان‌بندی کارگاه جریان مقایسه شد. به‌منظور فراهم ساختن شرایط مقایسه کاملاً عادلانه، الگوریتم ژنتیک نیز دقیقاً با همان مکانیزم کدگذاری پیوسته (کلیدهای تصادفی) و دیکودر سازنده یکسان پیاده‌سازی گردید. پارامترهای الگوریتم ژنتیک بر اساس رویه‌های استاندارد ادبیات (اندازه جمعیت ۶۰، نرخ تقاطع ۰/۸، نرخ جهش ۰/۱ و حداکثر تعداد تکرار ۴۰۰) تنظیم شدند و هر دو الگوریتم در قالب ۲۰ اجرای مستقل با دانه‌های تصادفی یکسان ارزیابی گردیدند. نتایج مقایسه‌ای در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک

ردیف	شاخص	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ازدحام ذرات	میزان بهبود
۱	بهترین مقدار تابع هدف	۲۴/۶	۲۴/۶	٪۰
۲	میانگین مقدار تابع هدف	۲۶/۸۵	۲۵/۲۷	**٪۵/۸۸**
۳	انحراف معیار تابع هدف	۲/۱۵	۱/۴۳	**٪۳۳/۴۹**
۴	میانگین زمان محاسباتی (ثانیه)	۴/۱۸	۳/۳۲	**٪۲۰/۵۷**

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم موفق به کشف بهترین جواب ۲۴/۶ شده‌اند. بااین‌حال، الگوریتم پیشنهادی در شاخص میانگین تابع هدف با ثبت مقدار ۲۵/۲۷ در مقایسه با ۲۶/۸۵ در الگوریتم ژنتیک، کیفیت راه‌حل‌های تولیدی بیشتری از خود نشان داده است. همچنین، انحراف معیار پایین‌تر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات حاکی از پایداری بالاتر و حساسیت کمتر آن به دانه‌های تصادفی است. ازنظر کارایی محاسباتی نیز الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با میانگین زمان اجرای ۳/۳۲ ثانیه‌ای، سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک عمل کرده است. این نتایج برتری معنادار الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را از سه منظر کیفیت جواب، پایداری و زمان محاسباتی در حل مسئله حاضر نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت

هدف اصلی از انجام تحلیل حساسیت در این پژوهش، پاسخ‌گویی نظام‌مند به دو پرسش اساسی است. نخست، بررسی حساسیت کیفیت راه‌حل؛ بدین معنا که آیا تغییر پارامترهای الگوریتم منجر به تغییر معنادار در مقدار تابع هدف (مجموع دیرکرد سفارش‌ها) می‌شود یا خیر. دوم، بررسی حساسیت پایداری و

کارایی محاسباتی الگوریتم؛ به این معنا که آیا تغییر تنظیمات پارامتری بر میزان پراکندگی نتایج (انحراف معیار بهترین جواب‌ها) و همچنین زمان اجرای الگوریتم اثرگذار است. به‌منظور جلوگیری از نتیجه‌گیری‌های سوگیرانه ناشی از ماهیت تصادفی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات، هر سناریوی پارامتری در قالب چند اجرای مستقل با دانه‌های تصادفی متفاوت اجرا شده است. برای هر سناریو، شاخص‌های استاندارد شامل میانگین و انحراف معیار بهترین مقدار نهایی تابع هدف، میانگین و انحراف معیار زمان محاسباتی و میانگین تکرار همگرایی (بر اساس آستانه ε و پنجره صبر P) محاسبه و گزارش شده‌اند. این رویکرد امکان ارزیابی هم‌زمان کیفیت، ثبات و کارایی الگوریتم را فراهم می‌کند.

در این پژوهش، سه سناریوی پارامتری مطابق با جدول ۶ به‌صورت متمایز طراحی شده است که هر یک بر یک جنبه کلیدی از رفتار الگوریتم بهینه‌سازی تمرکز دارند. در تمامی سناریوها، مدل ریاضی و داده‌های مطالعه موردی ثابت بوده و تنها تنظیمات پارامترهای الگوریتم تغییر کرده است تا اثر خالص پارامترها بر عملکرد الگوریتم بررسی شود.

سناریوی نخست به‌عنوان سناریوی مبنا تعریف‌شده و نقش مرجع مقایسه برای سایر تنظیمات را ایفا می‌کند. این سناریو از مقادیر متعارف و رایج در ادبیات الگوریتم بهینه‌سازی ذرات استفاده می‌کند و انتظار می‌رود تعادلی نسبی میان کیفیت راه‌حل و هزینه محاسباتی برقرار سازد.

سناریوی دوم باهدف تقویت اکتشاف فضای جست‌وجو طراحی شده است. در این سناریو، اندازه جمعیت ذرات و دامنه سرعت افزایش یافته تا احتمال کاوش نواحی متنوع‌تر از فضای جست‌وجو بیشتر شود. انتظار مفهومی آن است که این تنظیمات به بهبود کیفیت متوسط راه‌حل‌ها و کاهش حساسیت به مقداردهی اولیه منجر شود، هرچند با افزایش زمان اجرای الگوریتم همراه خواهد بود.

سناریوی سوم با تأکید بر بهره‌برداری و همگرایی سریع‌تر طراحی شده است. در این حالت، اندازه جمعیت و تعداد تکرارها کاهش‌یافته و ضرایب یادگیری به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که مؤلفه اجتماعی تقویت شود. انتظار می‌رود این سناریو زمان محاسباتی کمتری داشته باشد، اما هم‌زمان خطر همگرایی زودرس و افت کیفیت یا پایداری نتایج افزایش یابد.

جدول ٦. سناریوهای تحلیل حساسیت

ردیف	سناریو	اندازه جمعیت N_{pop}	تعداد تکرار $Iter$	وزن لختی $\omega_{max} \rightarrow \omega_{min}$	c_1	c_2	v_{max}	هدف تغییر
۱	اول	۶۰	۴۰۰	۰,۹ – ۰,۴	۲	۲	۱	سناریوی مرجع
۲	دوم	۸۰	۴۰۰	۰,۹ – ۰,۴	۲	۲	۱,۲	افزایش اکتشاف
۳	سوم	۴۰	۳۰۰	۰,۷ – ۰,۳	۱,۵	۲,۵	۰,۸	همگرایی سریع‌تر

جدول ۷، نتایج تحلیل حساسیت را برای سه سناریوی مطرح‌شده نشان می‌دهد. هر سناریو بر اساس ۲۰ اجرای مستقل با دانه‌های تصادفی متفاوت ارزیابی‌شده و شاخص‌های کلیدی عملکرد شامل کیفیت جواب، پایداری، کارایی محاسباتی و رفتار همگرایی گزارش گردیده است.

جدول ۷. نتایج تحلیل حساسیت

ردیف	شاخص		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱	تعداد اجراهای مستقل	Runs	۲۰	۲۰	**۲۰**
۲	بهترین مقدار تابع هدف	min Objective	۲۴/۶	۲۴/۶	**۲٤/٦**
۳	میانگین مقدار تابع هدف	Objective mean	۲۵/۲۷	۲۴/۸۸	**۲۷/۸۸**
۴	انحراف معیار تابع هدف	Objective std	۱/۴۳	۰/۷۷	**٤/۲۸**
۵	میانگین زمان اجرا (ثانیه)	Time mean sec	۳/۳۲	۴/۳۸	**۱/٦٤**
۶	انحراف معیار زمان اجرا	Time std sec	۰/۴۲	۰/۴۴	**۰/۲٦**
۷	میانگین تکرار همگرایی	ConvIter mean	۴۸/۵	۴۹/۳۵	**٤۸/٤**
۸	انحراف معیار تکرار همگرایی	ConvIter std	۸/۰۹	۱۳/۰۸	**۹/۳۷**
۹	آستانه همگرایی(ε)	eps	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}
۱۰	پنجره صبر	patience	۳۰	۳۰	**۳۰**
۱۱	اندازه جمعیت ذرات	Pop size	۶۰	۸۰	**٤۰**
۱۲	حداکثر تعداد تکرار	iters	۴۰۰	۴۰۰	**۳۰۰**
۱۳	وزن لختی بیشینه	W max	۰/۹	۰/۹	**۰/۷**
۱۴	وزن لختی کمینه	W min	۰/۴	۰/۴	**۰/۳**
۱۵	ضریب یادگیری فردی	c1	۲	۲	**۱/۵**
۱۶	ضریب یادگیری اجتماعی	c2	۲	۲	**۲/۵**
۱۷	حداکثر سرعت ذرات	V max	۱/۰	۱/۲	**۰/۸**
۱۸	کران پایین موقعیت	X min	-۴	-۴	**-٤**
۱۹	کران بالای موقعیت	X max	۴	۴	**٤**

مقایسه نتایج سه سناریو نشان می‌دهد که تنظیم پارامترهای الگوریتم تأثیر معناداری بر کیفیت، پایداری و هزینه محاسباتی راه‌حل‌ها دارد. هر سه سناریو به بهترین مقدار مشاهده‌شده یکسانی ۲۴/۶ دست یافته‌اند که نشان می‌دهد فضای جست‌وجو در همه تنظیمات امکان دستیابی به راه‌حل‌های با کیفیت بالا را فراهم کرده است. بااین‌حال، تفاوت‌های قابل‌توجهی در رفتار میانگین و پایداری نتایج مشاهده می‌شود.

در سناریوی اول مقدار میانگین تابع هدف (حدود ۲۵/۲۷) همراه با انحراف معیار نسبتاً پایین (۱/۴۳) بیانگر تعادل مناسب میان کیفیت و ثبات است. این سناریو با زمان اجرای متوسط حدود ۳/۳۲

ثانیه و همگرایی در حوالی تکرار ۴۸، عملکردی متوازن ارائه می‌دهد و به‌عنوان یک تنظیم عمومی قابل‌اتکا قابل تفسیر است.

سناریوی دوم با افزایش اندازه جمعیت، به بهبود معنادار میانگین کیفیت جواب‌ها دست یافته است؛ به‌طوری‌که مقدار میانگین تابع هدف به حدود ۲۴/۸۸ کاهش‌یافته و انحراف معیار نیز به حدود ۰/۷۷ رسیده است. این امر نشان می‌دهد که تقویت اکتشاف، احتمال همگرایی به نواحی با کیفیت بالاتر و نتایج پایدارتر را افزایش می‌دهد. بااین‌حال، این بهبود کیفیت با افزایش هزینه محاسباتی همراه بوده و زمان اجرای میانگین به حدود ۴/۳۸ ثانیه افزایش یافته است؛ بنابراین، سناریو دوم نمایانگر یک مبادله کیفیت، زمان است که در کاربردهایی با اولویت کیفیت، قابل توجیه خواهد بود.

در مقابل، سناریوی سوم باوجود کاهش چشمگیر زمان اجرای میانگین (حدود ۱/۶۴ ثانیه)، افت محسوسی در کیفیت و پایداری نتایج نشان می‌دهد. افزایش مقدار میانگین تابع هدف به حدود ۲۷/۸۸ و انحراف معیار بالا (بیش از ۴/۲۷) بیانگر آن است که تمرکز بیش‌ازحد بر بهره‌برداری و همگرایی سریع، احتمال گرفتارشدن در بهینه‌های محلی ضعیف را افزایش داده است. هرچند تکرار همگرایی در این سناریو تفاوت چشمگیری با سایر سناریوها ندارد، اما کیفیت نهایی راه‌حل‌ها ناپایدارتر بوده است.

درمجموع، تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سناریوی دوم ازنظر کیفیت و ثبات بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد، درحالی‌که سناریو سوم سریع‌ترین اما کم‌اعتمادترین نتایج را تولید می‌کند. سناریوی اول نیز به‌عنوان یک گزینه میانه، تعادل قابل قبولی میان کیفیت، پایداری و هزینه محاسباتی برقرار می‌سازد.

به‌منظور بررسی اثر سقف تکرارهای مجاز بر رفتار الگوریتم و تعمیم‌پذیری آن، علاوه بر مسئله مطالعه موردی، دو مسئله آزمایشی جدید در ابعاد متوسط (۵ ماشین و ۲۰ سفارش) و بزرگ (۱۰ ماشین و ۵۰ سفارش) با الگوی داده مشابه تولید و عملکرد الگوریتم تحت سقف‌های مختلف تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل حساسیت ابعاد و سقف تکرارها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. تحلیل حساسیت سقف تکرارها در ابعاد مختلف مسئله

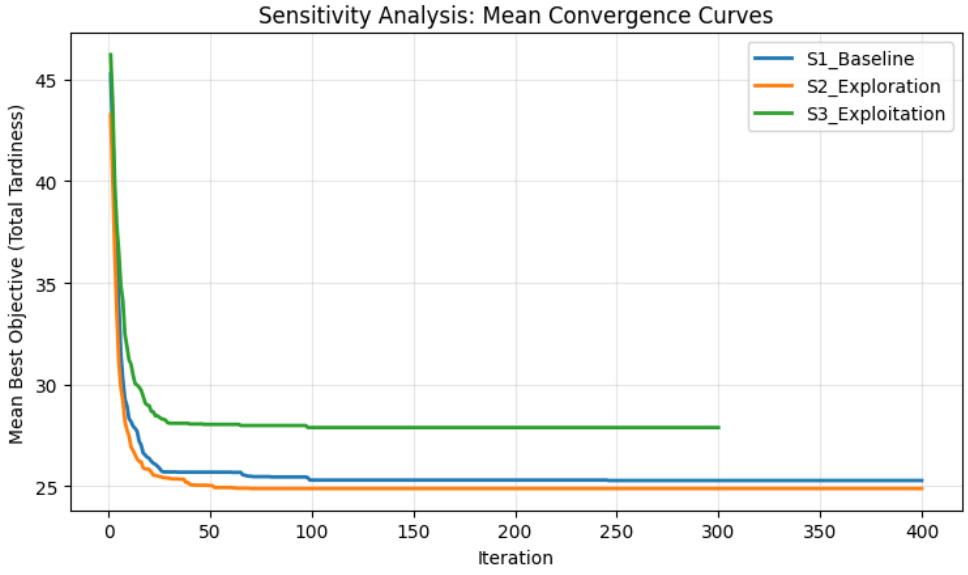
مقیاس مسئله و ابعاد	سقف تکرار	میانگین تابع هدف	انحراف معیار	میانگین زمان اجرا (ثانیه)	تکرار همگرایی واقعی
کوچک	۱۰۰	۲۵/۷۵	۱/۸۵	۰/۹۵	۴۶/۲
	۲۰۰	۲۵/۲۷	۱/۴۴	۱/۷۲	۴۸/۱
	۴۰۰	۲۵/۲۷	۴/۱۲	۳/۳۲	۴۸/۵
متوسط	۲۰۰	۸۱/۴۰	۲/۶۵	۵/۱۰	۱۶۲
	۴۰۰	۷۴/۸۰	۲/۵۰	۹/۸۵	۲۴۵/۳
	۶۰۰	۷۴/۶۵	۱۲/۳۰	۱۴/۴۰	۲۵۸/۱

مقیاس مسئله و ابعاد	سقف تکرار	میانگین تابع هدف	انحراف معیار	میانگین زمان اجرا (ثانیه)	تکرار همگرایی واقعی
بزرگ	۳۰۰	۲۴۲/۵۰	۶/۴۰	۲۸/۵۰	۲۸۵/۴
	۶۰۰	۲۰۸/۲۰	۶/۱۰	۵۶/۲۰	۴۸۲
	۱۰۰۰۰	۲۰۶/۹۰		۹۴/۱۰	۵۲۱/۵

نتایج نشان می‌دهد که در مسائل ابعاد کوچک، افزایش سقف تکرار به بیش از ۲۰۰ تکرار اثر معناداری بر کیفیت تابع هدف ندارد و الگوریتم به دلیل وجود شرط توقف زودهنگام و پنجره صبر در حوالی تکرار ۴۸ متوقف می‌شود؛ اما با افزایش ابعاد مسئله به مقیاس متوسط و بزرگ، نیاز الگوریتم به سقف تکرارهای بالاتر به‌وضوح مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که افزایش سقف تکرار از ۳۰۰ به ۶۰۰ در مسائل بزرگ، منجر به بهبود چشمگیر تابع هدف از ۲۴۲/۵ به ۲۰۸/۲ شده است. این تحلیل ثابت می‌کند که سقف تکرارها باید متناسب با ابعاد مسئله تنظیم شود و الگوریتم پیشنهادی توانایی بالایی در حل مسائل مقیاس بزرگ در زمان محاسباتی منطقی دارد.

شکل ۳، منحنی‌های همگرایی میانگین الگوریتم را برای سه سناریوی پارامتری موردبررسی نمایش می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم و محور عمودی بیانگر میانگین بهترین مقدار تابع هدف (مجموع دیرکرد) در هر تکرار است که بر اساس ۲۰ اجرای مستقل برای هر سناریو محاسبه شده است. هر منحنی، رفتار متوسط بهترین جواب را در طول فرایند جست‌وجو برای یک سناریوی مشخص نشان می‌دهد.

شکل ۳. منحنی‌های همگرایی سناریوها



تحلیل منحنی‌های همگرایی نشان می‌دهد که هر سه سناریو در مراحل ابتدایی اجرا، کاهش سریع و قابل‌توجهی در مقدار تابع هدف تجربه می‌کنند که بیانگر توان الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در فاصله‌گرفتن سریع از نواحی با کیفیت پایین است. بااین‌حال، تفاوت‌های معناداری در سرعت همگرایی و سطح نهایی همگرایی میان سناریوها مشاهده می‌شود.

سناریوی دوم سریع‌تر از سایر سناریوها به ناحیه‌ای با کیفیت بالا همگرا شده و در ادامه نیز پایین‌ترین سطح میانگین تابع هدف را حفظ می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش اندازه جمعیت و دامنه حرکت ذرات، اگرچه هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد، اما به بهبود فرایند اکتشاف فضای جست‌وجو و شناسایی نواحی مطلوب‌تر منجر شده است. پایداری منحنی سناریو دوم در مراحل پایانی نیز حاکی از همگرایی مطمئن و بدون نوسان قابل‌توجه است.

سناریوی اول رفتاری میانه از خود نشان می‌دهد. این سناریو نسبت به سناریو دوم با سرعتی اندکی کمتر همگرا می‌شود و در سطح نهایی تابع هدف نیز مقداری بالاتر قرار می‌گیرد، اما همچنان اختلاف آن محدود است. این رفتار بیانگر آن است که تنظیمات مرجع الگوریتم تعادل مناسبی میان اکتشاف و بهره‌برداری برقرار کرده و بدون افزایش شدید هزینه محاسباتی، به راه‌حل‌های با کیفیت قابل‌قبول دست یافته است.

در مقابل، سناریوی سوم اگرچه در مراحل اولیه کاهش سریعی را تجربه می‌کند، اما در سطحی بالاتر از دو سناریوی دیگر متوقف می‌شود. تثبیت زودهنگام منحنی در مقادیر بالاتر تابع هدف نشان‌دهنده همگرایی زودرس و کاهش توان الگوریتم در کاوش مؤثر فضای جست‌وجو است. این رفتار، نتیجه مستقیم تمرکز بیشتر بر بهره‌برداری، کاهش جمعیت و وزن لختی پایین‌تر است که احتمال گرفتارشدن در بهینه‌های محلی را افزایش می‌دهد.

از منظر مقایسه‌ای، این نمودار به‌روشنی نشان می‌دهد که تفاوت کیفیت نهایی سناریوها نه صرفاً ناشی از مقدار تابع هدف نهایی، بلکه حاصل تفاوت در دینامیک همگرایی آن‌هاست. سناریوی دوم با حفظ روند بهبود تدریجی و جلوگیری از همگرایی زودهنگام، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد، درحالی‌که سناریو سوم اگرچه سریع‌تر تثبیت می‌شود، اما به قیمت افت کیفیت نهایی تمام می‌شود. درمجموع، تحلیل منحنی‌های همگرایی میانگین تأیید می‌کند که برای مسئله زمان‌بندی موردمطالعه، تقویت مؤلفه اکتشافی الگوریتم نقش کلیدی در دستیابی به راه‌حل‌های باکیفیت‌تر و پایدارتر دارد. این یافته، به‌طور مستقیم از نتایج عددی تحلیل حساسیت پشتیبانی کرده و انتخاب سناریوی دوم (یا تنظیماتی نزدیک به آن) را به‌عنوان گزینه ترجیحی و نهایی توجیه می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی یک چارچوب بهینه‌سازی کارآمد برای مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان با زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور با معیار کمینه‌سازی مجموع دیرکرد سفارش‌ها بود؛ مسئله‌ای که به دلیل تعامل هم‌زمان تصمیم‌های جایگشتی، زمانی و تخصیص منابع انسانی، از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار است. نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ارزیابی جامع آن، بینش‌های مهمی در خصوص رفتار الگوریتم و ماهیت مسئله فراهم می‌کند.

نخست، نتایج ارزیابی عملکرد نشان داد که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در تنظیمات مبنا قادر است به راه‌حل‌هایی با کیفیت بالا و ثبات مناسب دست یابد. فاصله اندک میان بهترین مقدار تابع هدف مشاهده شده و میانگین بهترین مقادیر نهایی، همراه با انحراف معیار نسبتاً پایین، بیانگر آن است که الگوریتم در اغلب اجراهای مستقل به نواحی مشابهی از فضای جست‌وجو همگرا می‌شود. این ویژگی از منظر روش‌شناختی حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم به‌شدت به مقداردهی اولیه وابسته نبوده و از تکرارپذیری قابل قبولی برخوردار است؛ امری که برای کاربردهای صنعتی ضروری محسوب می‌شود.

تحلیل نمودار همگرایی میانگین نشان داد که الگوریتم بخش عمده‌ای از بهبود تابع هدف را در مراحل ابتدایی اجرا محقق می‌سازد و سپس وارد فاز بهره‌برداری می‌شود. همگرایی عملی الگوریتم در حدود ۵۰ تکرار، درحالی‌که حداکثر تعداد تکرارها ۴۰۰ در نظر گرفته‌شده بود، نشان‌دهنده سرعت همگرایی مناسب و طراحی متعادل وزن لختی و ضرایب یادگیری است. کاهش تدریجی انحراف معیار در طول تکرارها نیز حاکی از افزایش انسجام رفتار جمعی ذرات و کاهش اثر نوسانات تصادفی در مراحل پایانی جست‌وجو است.

نتایج نمودار توزیع بهترین مقدار نهایی تابع هدف نیز این برداشت را تقویت می‌کند. تمرکز اغلب اجراها در یک بازه باریک و وجود تعداد محدودی داده پرت در سمت مقادیر بالاتر نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ذاتاً تصادفی است، اما در این مسئله خاص، رفتار غالب آن پایدار و قابل پیش‌بینی است. وجود معدود اجراهای با عملکرد ضعیف‌تر را می‌توان به گیر افتادن موقت در بهینه‌های محلی نسبت داد که پدیده‌ای شناخته‌شده در فراابتکاری‌هاست و ضرورت اجرای چندباره الگوریتم را توجیه می‌کند.

بخش تحلیل حساسیت پارامترها، یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش را آشکار می‌سازد. مقایسه سه سناریوی پارامتری نشان داد که اگرچه هر سه سناریو قادر به دستیابی به بهترین مقدار مشاهده‌شده تابع

هدف هستند، اما تفاوت معناداری در کیفیت متوسط، پایداری و هزینه محاسباتی آن‌ها وجود دارد. سناریوی اکتشافی تر (سناریو دوم) با افزایش اندازه جمعیت و دامنه حرکت ذرات، به بهبود معنادار میانگین کیفیت راه‌حل‌ها و کاهش انحراف معیار منجر شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در مسئله‌ای با سطح پیچیدگی بالا و فضای جست‌وجوی چندوجهی، تقویت اکتشاف نقش کلیدی در جلوگیری از همگرایی زودرس ایفا می‌کند.

در مقابل، سناریوی بهره‌بردارانه‌تر (سناریو سوم) اگرچه زمان اجرای الگوریتم را به‌طور چشمگیری کاهش داده است، اما افت محسوسی در کیفیت متوسط راه‌حل‌ها و افزایش پراکندگی نتایج نشان می‌دهد. تحلیل منحنی‌های همگرایی میانگین نیز تأیید می‌کند که این سناریو به دلیل همگرایی زودهنگام، در نواحی با کیفیت پایین‌تر تثبیت می‌شود. این یافته، به‌روشنی بیانگر وجود مبادله میان سرعت همگرایی و کیفیت نهایی راه‌حل در تنظیمات الگوریتم است.

از منظر کاربردی، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب تنظیمات الگوریتم باید تابع اولویت‌های تصمیم‌گیرنده باشد. در محیط‌های صنعتی که کیفیت برنامه زمان‌بندی (کاهش دیرکرد) اهمیت بالاتری نسبت به زمان محاسباتی دارد، استفاده از تنظیمات نزدیک به سناریوی دوم توصیه می‌شود. در مقابل، برای کاربردهای بلادرنگ یا تصمیم‌گیری سریع، تنظیمات سریع‌تر ولی محافظه‌کارانه‌تر نظیر سناریو سوم، هرچند با پذیرش افت کیفیت راه‌حل می‌تواند موردتوجه قرار گیرد.

با توجه به نتایج تجربی مبتنی بر مطالعه موردی صنعتی و اجرای گسترده الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یافته‌های کلیدی پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در تنظیمات متعادل، به‌طور پایدار به راه‌حل‌های با کیفیت بالا همگرا می‌شود و نسبت به تغییر مقداردهی اولیه حساسیت محدودی دارد.

۲. رفتار همگرایی الگوریتم نشان‌دهنده دستیابی سریع به نواحی مطلوب و سپس بهره‌برداری تدریجی از آن‌هاست که برای مسائل زمان‌بندی عملی مزیت محسوب می‌شود.

۳. تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که تقویت مؤلفه اکتشافی، کیفیت و ثبات نتایج را بهبود می‌دهد، هرچند با افزایش هزینه محاسباتی همراه است، درحالی‌که تمرکز بیش‌ازحد بر بهره‌برداری منجر به همگرایی زودرس و افت کیفیت می‌شود.

۴. انتخاب تنظیمات الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باید بر اساس مبادله کیفیت، زمان و متناسب با نیازهای کاربردی انجام شود.

از منظر علمی، این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌سازی دقیق قیود عملیاتی آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور با فراابتکاری‌های انعطاف‌پذیر، مسیر مؤثری برای حل مسائل زمان‌بندی پیچیده

فراهم می‌کند. از منظر مدیریتی نیز، نتایج حاکی از آن است که استفاده از چنین چارچوب‌هایی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان تولید کمک کند تا میان کاهش دیرکرد، استفاده بهینه از منابع انسانی و هزینه محاسباتی تعادل برقرار کنند.

منظور از الگوریتم‌های فراابتکاری انعطاف‌پذیر و پیشرفته در این پژوهش، الگوریتم‌هایی هستند که به دلیل تفکیک ساختاری الگوریتم از منطق قیود، دارا بودن مکانیزم‌های کنترل پویای پارامترها (مانند وزن لختی متغیر با زمان) و بهره‌گیری از عملگرهای اغتشاش جهت خروج از بهینه‌های محلی، قابلیت انطباق مستقیم با قیود پیچیده، غیرخطی و چندگانه واقعی (مانند تخصیص منابع دوگانه و زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی) را بدون نیاز به تغییر در بدنه اصلی موتور بهینه‌ساز دارا می‌باشند.

در ادامه پژوهش‌های آتی، می‌توان مسیرهای توسعه متعددی برای آینده می‌توان دنبال کرد؛ ازجمله توسعه الگوریتم‌های هیبریدی (ترکیبی) و متیورستیک، در نظر گرفتن عدم قطعیت در زمان‌های پردازش یا آماده‌سازی با رویکرد بهینه‌سازی استوار یا فازی و تعمیم مدل به محیط‌های چندهدفه (با در نظر گرفتن هزینه‌های انرژی یا پایداری)؛ این مسیرها می‌توانند به تعمیق فهم رفتار الگوریتم‌ها و افزایش کاربردپذیری نتایج در محیط‌های واقعی تولیدی منجر شوند.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

ORCID

Alireza Naeimi Sadigh **http://orcid.org/0000-0001-9225-649X**
Azim Zarei **http://orcid.org/0000-0002-8719-6338**
Mehdi Ebrahimi **http://orcid.org/0009-0007-1286-9001**
Mohammad Meftahi **http://orcid.org/0009-0007-6740-9475**

پیوست

جدول ۱. مشخصات ابعادی و ساختار مطالعه موردی

ردیف	مؤلفه	مقدار
۱	تعداد سفارش‌ها	**۸**
۲	تعداد ماشین‌ها / ایستگاه‌ها	**۳**
۳	تعداد اپراتورها	**۳**
۴	واحد زمان	**ساعت**

جدول ۲. اطلاعات صنعتی ماشین‌ها

ردیف	شاخص ماشین	نقش عملیاتی در خط تولید
۱	ماشین ۱	اختلاط / میکسر (Mixing)
۲	ماشین ۲	پرکنی (Filling)
۳	ماشین ۳	درب‌بندی، برچسب‌زنی و بسته‌بندی نهایی (Packing)

جدول ۳. موعد تحویل سفارش‌ها

سفارش	ساعت
۱	**۲۲**
۲	**۱۸**
۳	**۳۰**
۴	**۲۶**
۵	**۲۰**
۶	**۲۸**
۷	**۲٤**
۸	**۱٦**

جدول ٤. زمان‌های پردازش سفارش‌ها در ایستگاه‌های مختلف تولید (ساعت)

سفارش	میکسر	پرکن	بسته‌بندی
۱	۴/۰	۳/۰	**۲/۰**
۲	۳/۰	۲/۵	**۲۱/۵**
۳	۵/۰	۳/۵	**۲/۵**
۴	۴/۵	۳/۰	**۲/۰**
۵	۳/۵	۲/۰	**۱/۵**
۶	۴/۰	۳/۵	**۲/۰**
۷	۲/۵	۲/۰	**۱/۰**
۸	۳/۰	۲/۵	**۱/۵**

جداول زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی

جدول ۵. ماتریس آماده‌سازی برای ماشین ۱ (میکسر)

سفارش قبلی / سفارش بعدی	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
۱	۰/۰	۱/۲	۱/۸	۱/۵	۱/۰	۱/۶	۰/۸	۱/۱
۲	۱/۱	۰/۰	۱/۶	۱/۳	۰/۹	۱/۴	۰/۷	۱/۰
۳	۱/۹	۱/۷	۰/۰	۱/۶	۱/۲	۱/۸	۱/۰	۱/٤
۴	۱/۴	۱/۲	۱/۶	۰/۰	۱/۰	۱/۵	۰/۸	۱/۱
۵	۱/۰	۰/۹	۱/۲	۱/۰	۰/۰	۱/۳	۰/۶	۰/۹
۶	۱/۶	۱/۴	۱/۸	۱/۵	۱/۳	۰/۰	۰/۹	۱/۲
۷	۰/۸	۰/۷	۱/۰	۰/۹	۰/۶	۰/۹	۰/۰	۰/۷
۸	۱/۱	۱/۰	۱/۴	۱/۱	۰/۹	۱/۲	۰/۷	۰/۰

جدول ٦. ماتریس آماده‌سازی برای ماشین ۲ (پرکن)

سفارش قبلی / سفارش بعدی	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
۱	۰/۰	۰/۸	۱/۱	۰/۹	۰/۶	۱/۰	۰/۵	۰/۷
۲	۰/۷	۰/۰	۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۹	۰/۵	۰/۷
۳	۱/۲	۱/۰	۰/۰	۱/۰	۰/۸	۱/۱	۰/۷	۰/۹
۴	۰/۹	۰/۸	۱/۰	۰/۰	۰/۷	۱/۰	۰/۶	۰/۸
۵	۰/۶	۰/۶	۰/۸	۰/۷	۰/۰	۰/۹	۰/۴	۰/٦
۶	۱/۰	۰/۹	۱/۱	۱/۰	۰/۹	۰/۰	۰/۷	۰/۹
۷	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۴	۰/۷	۰/۰	۰/۵
۸	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۸	۰/۶	۰/۹	۰/۵	۰/۰

جدول ۷. ماتریس آماده‌سازی برای ماشین ۳ (بسته‌بندی)

سفارش قبلی / سفارش بعدی	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
۱	۰/۰	۰/۴	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۶	۰/۲	۰/٤
۲	۰/۴	۰/۰	۰/۶	۰/۵	۰/۳	۰/۵	۰/۲	۰/٤
۳	۰/۷	۰/۶	۰/۰	۰/۶	۰/۴	۰/۷	۰/۳	۰/۵
۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۰	۰/۴	۰/۶	۰/۳	۰/۵
۵	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۰	۰/۵	۰/۲	۰/۳
۶	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۰	۰/۳	۰/۵
۷	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۰	۰/۲
۸	۰/۴	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۵	۰/۲	۰/۰

منابع

۱. مسیب مطلق، مائده، عظیمی، پرهام و امیری، مقصود. (۱۴۰۲). بهینه‌سازی خطوط تولید چند محصولی با رویکرد شبیه‌سازی و برنامه‌ریزی چند هدفه. *مطالعات مدیریت صنعتی*, *21*(68), 75-120. doi: 10.22054/jims.2019.30723.2015

۲. دبیری، محمدرضا، یزدانی، مهدی، نادری، بهمن و حاله، حسن. (۱۴۰۰). مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری برای مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی ترکیبی با منابع دوگانه محدود و در نظر گرفتن رد کارها. *مطالعات مدیریت صنعتی*, *19*(60), 237-284. doi: 10.22054/jims.2021.48976.2425

۳. بهنامیان، جواد و افسر، امیر. (۱۳۹۹). بهینه‌سازی مجموع جریمه‌های هزینه دیرکرد و انرژی در مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی ناهمگن به‌وسیله الگوریتم ممتیک. *مطالعات مدیریت صنعتی*, *18*(58), 29-57. doi: 10.22054/jims.2020.24828.1856

۴. یزدانی، مهدی. (۱۳۹۹). الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی مونتاژ دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی ماشین‌ها. *مطالعات مدیریت صنعتی*, *18*(58), 307-335. doi: 10.22054/jims.2020.47551.2394

References

5. Allahverdi, A., Gupta, J. N., & Aldowaisan, T. (1999). A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega, 27*(2), 219–239. https://doi.org/10.1016/S0305-0483(98)00042-5
6. Costa, A., Cappadonna, F. A., & Fichera, S. (2014). Joint optimization of a flow-shop group scheduling with sequence-dependent set-up times and skilled workforce assignment. *International Journal of Production Research, 52*(9), 2696–2728. https://doi.org/10.1080/00207543.2013.867088
7. Costa, A., Fernandez-Viagas, V., & Framinan, J. M. (2020). Solving the hybrid flow shop scheduling problem with limited human resource constraint. *Computers & Industrial Engineering, 146*, 106545. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106545
8. de Athayde Prata, B., de Abreu, L. R., & Fernandez-Viagas, V. (2025). A systematic review of permutation flow shop scheduling with due-date-related objectives. *Computers & Operations Research*, 106989. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106989
9. Elissaouy, O., & Allali, K. (2024). Minimizing the maximum tardiness for a permutation flow shop problem under the constraint of sequence independent setup time. *RAIRO-Operations Research, 58*(1), 373–395. https://doi.org/10.1051/ro/2023005
10. Geng, J. C., Cui, Z., & Gu, X. S. (2016). Scatter search based particle swarm optimization algorithm for earliness/tardiness flowshop scheduling with uncertainty. *International Journal of Automation and Computing, 13*(3), 285–295. https://doi.org/10.1007/s11633-015-0938-3
11. Geurtsen, M., Adan, J., & Akçay, A. (2023). Integrated maintenance and production scheduling for unrelated parallel machines with setup times. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. https://doi.org/10.1007/s10696-023-09483-2

12. Han, J. H., & Lee, J. Y. (2023). Scheduling for a flow shop with waiting time constraints and missing operations in semiconductor manufacturing. *Engineering Optimization, 55*(10), 1742–1759. https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2106754
13. Hayat, I., Tariq, A., Shahzad, W., Masud, M., Ahmed, S., Ali, M. U., & Zafar, A. (2023). Hybridization of particle swarm optimization with variable neighborhood search and simulated annealing for improved handling of the permutation flow-shop scheduling problem. *Systems, 11*(5), 221. https://doi.org/10.3390/systems11050221
14. Kress, D., Müller, D., & Nossack, J. (2019). A worker constrained flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times. *OR Spectrum, 41*(1), 179–217. https://doi.org/10.1007/s00291-018-0537-7
15. Mlekusch, J., & Hartl, R. F. (2025). The dual-resource-constrained re-entrant flexible flow shop: A constraint programming approach and a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Production Research, 63*(5), 1803–1824. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2301123
16. Mousavi, S. M., & Shahnazari-Shahrezaei, P. (2023). Minimizing the makespan and total tardiness in hybrid flow shop scheduling with sequence-dependent setup times. *Management and Production Engineering Review, 14*(1), 13–24. https://doi.org/10.24425/mper.2023.146035
17. Mraihi, T., Driss, O. B., & El-Haouzi, H. B. (2024). Distributed permutation flow shop scheduling problem with worker flexibility: Review, trends and model proposition. *Expert Systems with Applications, 238*, 121947. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121947
18. Ouchiekh, R., Fri, M., Touil, A., & Echchatbi, A. (2021). Total weighted tardiness in the permutation flow shop under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine, 54*(1), 1174–1180. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.139
19. Pinedo, M. (2022). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems* (6th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87000-8
20. Rahman, H. F., Janardhanan, M. N., Chuen, L. P., & Ponnambalam, S. G. (2021). Flowshop scheduling with sequence-dependent setup times and batch delivery in supply chain. *Computers & Industrial Engineering, 158*, 107378. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107378
21. Silva, A. F., Valente, J. M., & Schaller, J. E. (2022). Metaheuristics for the permutation flowshop problem with a weighted quadratic tardiness objective. *Computers & Operations Research, 140*, 105691. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105691
22. Utama, D. M., Umamy, S. Z., & Al-Imron, C. N. (2024). No-wait flow shop scheduling problem: A systematic literature review and bibliometric analysis. *RAIRO-Operations Research, 58*(2), 1281–1313. https://doi.org/10.1051/ro/2024008
23. Ying, K. C., Pourhejazy, P., & Lin, Z. R. (2025). Scheduling with sequence-dependent setup times in short-term production planning: A main path analysis-based review. *Operations Research Perspectives*, 100340. https://doi.org/10.1016/j.orp.2024.100340

References [In Persian]

1. Behnamian, J., & Afsar, A. (2010). Optimization of the sum of lateness and energy penalties in the scheduling problem of heterogeneous parallel machines using

memetic algorithms. *Industrial Management Studies, 18*(58), 29–57. https://doi.org/10.22054/jims.2020.24828.1856 [In Persian]

2. Dabiri, M. R., Yazdani, M., Naderi, B., & Haleh, H. (1400). Mathematical model and meta-heuristic algorithm for the hybrid shop flow scheduling problem with dual limited resources and considering job backlogs. *Industrial Management Studies, 19*(60), 237–284. https://doi.org/10.22054/jims.2021.48976.2425 [In Persian]
3. Mosayeb Motlagh, M., Azimi, P., & Amiri, M. (1402). Optimization of multi-product production lines with a simulation and multi-objective programming approach. *Industrial Management Studies, 21*(68), 75–120. https://doi.org/10.22054/jims.2019.30723.2015 [In Persian]
4. Yazdani, M. (2019). Metaheuristic algorithms for the scheduling problem of two-stage assembly shop flow considering machine setup times. *Industrial Management Studies, 18*(58), 307–335. https://doi.org/10.22054/jims.2020.47551.2394 [In Persian]

استناد به این مقاله: نعیمی صدیق، علیرضا.، زارعی، عظیم.، ابراهیمی، مهدی.، مفتاحی، محمد. (۱۴۰۵). کمینه‌سازی مجموع دیرکرد در کارگاه جریان با آماده‌سازی وابسته به توالی و محدودیت اپراتور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، *مدیریت صنعتی*، *۲۴(۸۱)*، ۱۰۳-۱۴۴. DOI: 10.22054/jims.2026.91849.3021

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