



# A Hybrid Metaheuristic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling

## Jamal Mahmoudi

PhD Student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Email: [j.mahmoudi@qiau.ac.ir](mailto:j.mahmoudi@qiau.ac.ir)

 0009-0006-1812-701X

## Reza Ehtesham Rasi

Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran (Corresponding Author)

Email: [rezaehteshamrasi@gmail.com](mailto:rezaehteshamrasi@gmail.com)

 0000-0002-1734-100X

## Alireza Irajpour

Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Email: [airajpour@yahoo.com](mailto:airajpour@yahoo.com)

## Abstract

The flexible job shop scheduling problem is one of the most challenging and important production scheduling problems and is widely applied across many industries. Due to the vast number of possible solutions, finding an optimal solution for medium- and large-scale instances within a reasonable time is not feasible, classifying FJSP as an NP-hard problem, for which metaheuristic algorithms are highly effective. This study proposes a novel hybrid metaheuristic approach aimed at optimizing FJSP by enhancing the initial population to reduce the total completion time in production systems. The proposed hybrid algorithm integrates two metaheuristic techniques Genetic Algorithm (GA) and Tabu Search (TS) to create an improved solution method. The improved algorithm focuses on generating a refined initial population by leveraging the tabu list obtained from TS as the initial population for GA. Previous studies have not addressed the creation of a suitable, enhanced initial population through the combination of these algorithms. First, the mathematical model of the problem is presented. Then, the algorithms are implemented in MATLAB, and their performance is evaluated by solving FJSP instances of various sizes. The results indicate that the proposed algorithm, through the refinement of the initial population, outperforms the two base hybrid algorithms (GA and TS) as well as the Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) algorithms.

**Keywords:** Flexible Job Shop Scheduling, Genetic Algorithm, Tabu Search Algorithm, Time Complexity, Friedman Statistical Analysis





آماد و فناوری دفاعی

سال هشتم، شماره سوم (پیاپی ۲۷)، پاییز ۱۴۰۴، صص. ۲۵۱-۲۹۶  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

مقاله پژوهشی

# ارائه الگوریتم فراابتکاری ترکیبی بهبودیافته برای حل زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر

جمال محمودی

دانشجوی دکترا، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

Email: j.mahmoudi@qiau.ac.ir

 0009-0006-1812-701X

رضا احتشام رائی

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران (نویسنده مسئول)

Email: rezahteshamrasi@gmail.com

 0000-0002-1734-100X

علیرضا ایرج پور

استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

Email: airajpour@yahoo.com

## چکیده

مسئله زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر یکی از سخت ترین و مهم ترین مسائل برنامه ریزی زمان بندی تولید بوده و به طور گسترده در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل وجود تعداد جواب های ممکن بسیار زیاد، تعیین راه حل بهینه برای مسائل با اندازه های متوسط و بزرگ در یک زمان مناسب برای مسئله زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر امکان پذیر نبوده و از همین رو در زمره مسائل NP-hard محسوب گردیده که برای حل آن ها الگوریتم های فراابتکاری کاربرد بسیاری دارند. این تحقیق با هدف ارائه یک روش ترکیبی و نوآورانه، برای ایجاد یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید به منظور بهینه سازی در مسئله زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر از طریق اثرگذاری در تولید جمعیت اولیه که منجر به کاهش زمان تکمیل کل در سیستم های تولیدی می شود، طراحی شده که در این روش ترکیبی، دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و جستجوی ممنوعه با هم ادغام گردیده و یک الگوریتم فراابتکاری بهبود یافته ارائه شده است. الگوریتم بهبود یافته تمرکز بر تولید جمعیت اولیه پالایش شده و بهبود یافته گروهی از طریق استفاده از لیست ممنوعه حاصل از الگوریتم جستجوی ممنوعه به عنوان جمعیت اولیه برای الگوریتم ژنتیک دارد که در تحقیقات قبلی این موضوع یعنی تولید یک جمعیت اولیه گروهی مناسب و اصلاح شده توسط ترکیب الگوریتم ها انجام نشده است. ابتدا مدل ریاضی مسئله بیان شده و در ادامه الگوریتم های مورد استفاده در نرم افزار Matlab کدنویسی و به وسیله حل مسائل زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر در ابعاد مختلف به مقایسه عملکرد الگوریتم ها پرداخته می شود. نتایج پژوهش نشان می دهد الگوریتم ارائه شده از طریق اصلاح جمعیت اولیه نتیجه بهتری نسبت به دو الگوریتم پایه ترکیب (ژنتیک و جستجوی ممنوعه) و دو الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه ها داشته است.

**کلیدواژه ها:** زمان بندی کار کارگاهی انعطاف پذیر، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جستجوی ممنوعه، پیچیدگی زمانی، تحلیل آماری فریدمن

دانشگاه عالی دفاع ملی ♦ پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه های نوپدید / فصلنامه آماد و فناوری دفاعی



20.1001.1.28212606.1404.8.3.8.7

<https://amfad.sndu.ac.ir/> E-ISSN: 2980-8073



صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و باینگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.



## مقدمه

با پیشرفت تولید و صنعت، برنامه‌ریزی تولید به یک مشکل مهم برای شرکت‌های تولیدی تبدیل شده است (آن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی، در جهان رقابتی حاضر تعیین توالی و زمان‌بندی مؤثر ضرورتی برای بقا در فضای بازار است (حاجی‌بابایی و بهنامیان، ۱۴۰۱). برای زنده ماندن در بازار رقابتی مدرن، که به هزینه کمتر و چرخه عمر محصول کوتاه‌تر نیاز دارد، یک شرکت باید سریع و دقیق به خواسته‌های مشتری پاسخ دهد. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی مؤثر، نقش مهمی در این سازگاری دارند (بانهارنساکن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). شرکت‌ها از سوی محیط تحت فشار بوده و زمان و برآورده‌سازی نیازهای مشتری برای حفظ رضایت در برنامه‌ریزی تولید نقش مهمی ایفا می‌کنند (کانداکچی و کولاک<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶). به‌طوری‌که با افزایش تقاضا برای کالاهای شخصی و سفارشی شده، تغییرات سریع و پیش‌بینی‌نشده‌ای را در فرایند تولید شرکت‌ها ایجاد کرده است. برای رقابتی ماندن، شرکت‌های تولیدی باید برای واکنش سریع به این تغییرات غیرمنتظره در تقاضا، کالاها را با هزینه‌های کاهش‌یافته تولید کنند که این امر به‌واسطه تولید انعطاف‌پذیر و فردی انجام می‌شود (دینگ و گو<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰).

برنامه‌ریزی و کنترل تولید، تصمیم‌گیری شفاف و سطح بالا در زمان کوتاه‌تری در واکنش به بروز خطاها و حوادث غیرمترقبه را ممکن می‌سازد. برنامه‌ریزی تولید مدرن و استراتژی‌های کنترل به بهینه‌سازی مداوم نیازمندند (دنکنا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی‌که زمان همواره یک منبع محدود بوده، فعالیت‌ها باید به‌گونه‌ای زمان‌بندی شوند تا از مصرف بهینه این منبع اطمینان حاصل شود. زمان‌بندی یک فرایند تصمیم‌گیری است که بهینه‌سازی یک یا چند معیار را بر عهده دارد (باکر<sup>۶</sup>، ۱۹۷۴). زمان‌بندی تأثیر زیادی بر افزایش کارایی و تحقق اهداف دارد، به‌نحوی‌که زمان‌بندی مؤثر سبب بهبود معیارهای عملکردی خط تولید نظیر خروجی خط، هزینه‌های تولید، درصد استفاده از ایستگاه گلوگاه و رضایتمندی مشتریان

1. An
2. Banharnsakun
3. Kundakci & Kulak
4. Ding & Gu
5. Denkena
6. Baker



خواهد شد (اسدی گنگراج و نهاوندی، ۲۰۱۴). در محیط‌های رقابتی، برنامه‌ریزی مؤثر یک ضرورت برای بقا در بازار محسوب می‌گردد (سینگ و ماهاپاترا، ۲۰۱۶). بنگاه‌های تولیدی باید به بهبود راندمان تولید خود ادامه داده و زمان‌بندی معقول کارگاهی می‌تواند کارایی تولید و تحویل محصول را بهبود بخشد. همچنین زمان‌بندی مناسب از طریق کاهش زمان بیکاری ماشین‌ها، هزینه‌های مصرف انرژی را کاهش دهد (لئو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

برنامه‌ریزی زمان‌بندی یک فرایند تصمیم‌گیری حیاتی در صنایع تولید و خدمات است. هدف اصلی برنامه‌ریزی، تخصیص منابع محدود در دسترس برای انجام یک گروه از وظایف در طی یک دوره زمانی به‌منظور بهینه‌سازی برخی از شاخص‌های عملکرد است (ماریکلوم و گیتا<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). منابع و کارها در زمان‌بندی ممکن است انواع گوناگونی داشته باشد و با توسعه جهان صنعتی، منابع مربوطه بحرانی‌تر می‌شود. زمان‌بندی این منابع به افزایش سوددهی یک سازمان منجر می‌شود (حاجی‌بابایی و بهنامیان، ۱۴۰۱). سیستم‌های تولید مدرن که در آن ماشین‌آلات پیشرفته وجود دارند، قادر به انجام بیش از یک نوع کار هستند و زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر را به وجود می‌آورند (فان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). یافتن راه‌حل بهینه برای مسائل با اندازه متوسط و بزرگ در یک زمان مناسب برای آن امکان‌پذیر نبوده و به‌صورت کلی تعداد حالات ممکن در آن بسیار زیاد است. محققان نه‌تنها به دلیل پیچیدگی بلکه به دلیل کاربرد مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در پی‌شناخت و درک فزاینده نسبت به آن هستند (بیسولی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱).

زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر یکی از مسائل ترکیبی تولید بوده که به دلیل کاربردهای عملی آن در سیستم‌های تولیدی جدید و در حال ظهور باهدف مدل‌سازی و بهینه‌سازی موقعیت‌های پیچیده‌تر نیازهای صنعت حائز اهمیت است (سرناء<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۱) و پیوسته محققان تلاش می‌کنند بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده برای

- 
1. Singh & Mahapatra
  2. Liu
  3. Marichelvam & Geetha
  4. Fan
  5. Bissoli
  6. Serna

حل مسئله کار کارگاهی انعطاف‌پذیر را بهبود بخشند که این اقدام موجب افزایش کارایی تولید، کاهش هزینه‌ها، بهبود زمان تحویل محصول و کاهش مصرف انرژی را در برخواهد داشت (احمدیان و همکاران، ۲۰۲۱؛ محمدی، ۲۰۱۵). با تغییر سریع صنعت در مقیاس بزرگ، نیاز به یک سیستم چندعاملی پیچیده که قادر به حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر باشد، آشکار می‌گردد (یوان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). افزودن دانش به الگوریتم‌های هوشمند راه خوبی برای حل مسائل زمان‌بندی پیچیده و سخت در زمان معقول و قابل قبول است (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). در دنیای واقعی نیز به دلیل پیچیدگی‌های موجود بهتر قابل استفاده بوده و محققان به صورت پیوسته با ایجاد تغییر در روش‌های فراابتکاری به دنبال یافتن روش‌های بهبودیافته و جواب‌های بهینه هستند. به عبارت دیگر، الگوریتم‌های فراابتکاری یک رویکرد بسیار مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی هستند، به‌ویژه به‌عنوان مثال بهینه‌سازی NP-hard مانند برنامه‌ریزی بهینه شبکه زنجیره تأمین (رضایی و پیله‌وری، ۱۴۰۱)، مسئله فروشنده دوره‌گرد (صالحی و معصومی، ۲۰۲۰)، مسئله حداکثرسازی نفوذ در شبکه‌های اجتماعی (صالحی و معصومی، ۲۰۲۰) و ...

توجه به موضوع زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در صنایع و به‌خصوص در بحث مدیریت زنجیره تأمین نیز مورد توجه جدی قرار گرفته است. چراکه هدف زنجیره تأمین ایجاد پایداری در ساختار تولید است و به‌زعم محققان مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر به‌عنوان یک ساختار عملیات‌ساز می‌تواند این جریان پایدارساز را تسهیل و تقویت نماید (فتحی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). همین مطلب نیز در صنایع دفاعی مطرح است. به‌ویژه اینکه صنعت دفاعی نیازمند یک مدیریت لجستیک قوی، آماده، پیشگامانه و همه‌جانبه است تا بتواند نیازهای پشتیبانی لازم را در مواقع مورد نیاز ارائه دهد (کونوالنکو و لودویگ<sup>۴</sup>، ۲۰۲۲) و به تعبیری بتواند شوک‌های لحظه‌ای وارده به صنعت را با تولید به‌موقع و زمان‌بندی دقیق کنترل و مدیریت کند (کازرونی و همکاران، ۱۴۰۳). زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر این

---

1. Yuan  
2. Li  
3. Fathi  
4. Konovalenko & Ludwig



قابلیت را دارد که بتواند در صنایع دفاعی و کمک به مدیریت پایدار زنجیره تأمین آنان نقش عملیاتی‌تری را بر عهده بگیرد (رولف<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳).

زمان‌بندی کار کارگاهی، به‌عنوان شاخه‌ای از زمان‌بندی تولید، یکی از مشهورترین و سخت‌ترین مسائل بهینه‌سازی مباحث تولید محسوب می‌شود و با توجه به کاربردهای فراوانی که در حل مسائل دنیای واقعی دارد، همواره مورد توجه محققان و متخصصان زمان‌بندی بوده است. دو علم زمان‌بندی و توالی، امروزه یکی از علوم کاربردی هستند. اکثر شرکت‌های تولیدکننده ملزم به ایجاد زمان‌بندی‌هایی هستند که نیاز مشتری را در موعد تحویل یا نزدیک به آن رفع سازد. در این تحقیق به‌منظور افزایش توان رقابتی، تصمیم‌گیری بهتر، جلوگیری از انباشت سرمایه، تقلیل ضایعات، کاهش و یا حذف بیکاری ماشین‌آلات و تلاش برای استفاده بهتر از آن‌ها، پاسخ‌گویی به‌موقع به سفارش‌های مشتریان و تأمین مواد اولیه و قطعات مورد نیاز در موقع مناسب، افزایش کارایی و استفاده بهینه از منابع در دسترس به‌دنبال ارائه یک روش بهبود یافته فراابتکاری برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با هدف ایجاد بهبود در تابع هدف نسبت به مدل‌های موجود است.

## ۱. مبانی نظری

هرچه از زمان‌های قدیمی‌تر به زمان حال حرکت می‌نماییم تعداد عواملی که در حوزه رقابت نقش ایفا می‌کنند، افزایش می‌یابد. در جهان رقابتی کنونی، بهینه‌سازی زمان‌بندی سیستم‌های تولیدی در محیط کار کارگاهی نیز به‌منظور افزایش توان رقابتی مورد توجه قرار می‌گیرد. امروزه با پیشرفت روزافزون تکنولوژی، متنوع‌شدن نیازها و خواسته‌های مشتریان، حرکت به‌سوی ساخت و تولید بر اساس سفارش مشتری، محیط رقابتی را در بین شرکت‌های تولیدی ایجاد و مشکلاتی را گریبان‌گیر آن‌ها کرده است. افزایش انتظارات مشتری و پیشرفت‌های تکنولوژیکی منجر به افزایش پیچیدگی تولید شده و شرکت‌ها با اختلالات تصادفی روبرو می‌شوند و این امر موجب استفاده غیرمتمقان از ظرفیت تولید می‌گردد. بنابراین تولید مؤثر و

1. Rolf

کارآمد، برنامه‌ریزی و کنترل به یک مزیت حیاتی در رقابت تبدیل می‌گردد (دنکنا و همکاران، ۲۰۲۱). سازمان‌ها باید به تعهدات خود در خصوص زمان تحویل به مشتریان متعهد باشند. زیرا عدم موفقیت انجام این کار ممکن است باعث از بین رفتن قابل توجهی از حسن نیت شود (سینگ و ماهاپاترا، ۲۰۱۶). تولیدکنندگان به دنبال سیستم‌های تولیدی هستند که نیازهای مشتریان نظیر کاهش قیمت، تنوع محصولات، دقت و کیفیت بالا را برآورده سازند. از این رو، اهمیت به‌کارگیری روش‌هایی کارا جهت استفاده مؤثر از منابع بیشتر از گذشته نیاز می‌شود تا سازمان‌ها بتوانند قدرت پاسخ‌گویی سریع به نیازهای مشتریان را داشته باشند. به نقل از «فرانچا»<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، با ادامه فرایند صنعتی شدن جهان، منابع بیشتری حالت بحرانی به خود می‌گیرند. امروزه ماشین‌آلات، نیروی انسانی و تسهیلات به‌عنوان منابع بحرانی در تولید و فعالیت‌های خدماتی در نظر گرفته می‌شوند. زمان‌بندی این منابع منجر به ارتقا کارایی، بهره‌وری و در نهایت سودآوری می‌شود. به‌طور کلی، می‌توان گفت که زمان‌بندی، فرایند تخصیص منابع محدود به فعالیت‌ها در طول زمان است که هدف آن بهینه‌سازی یک و یا چند تابع هدف با تخصیص منابع مشخص در یک دوره زمانی معین است (کاسرس گلوژ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۴). مسائل زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تولید به دلیل کاربردهای صنعتی متنوع آن‌ها به‌طور گسترده به‌عنوان مسائل بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. در طول گذشته، محققان توجه ویژه‌ای به ادغام مشکلات زمان‌بندی محیط‌های تولید و سیستم‌های توزیع برای اتخاذ مفروضات واقعی‌تر داشته‌اند. مسائل برنامه‌ریزی تولید، برای کاربردهای صنعتی مختلف مانند تزریق پلاستیک، فرایندهای شیمیایی، صنعت نفت، برنامه‌ریزی خدمات پزشکی، تعمیر و نگهداری، تولید مواد غذایی و تولید دارویی و مشکل مسیریابی وسیله نقلیه در بخش خدمات مناسب است (ابرو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). برنامه‌ریزی و کنترل تولید، تصمیم‌گیری شفاف و سطح بالا را در زمان کوتاه‌تری در واکنش به بروز خطاها و حوادث غیرمترقبه ممکن می‌کند (دنکنا و همکاران، ۲۰۲۱).

---

1. França  
2. Cáceres-Gelvez  
3. Abreu



مسائل زمان‌بندی در محیط‌های تولیدی به سه دسته مسئله جریان کارگاهی، کار کارگاهی و کار کارگاهی باز تقسیم می‌شوند (روح‌بخش و همکاران، ۱۴۰۲). مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی از زمان‌بندی‌های مربوط به شرکت‌های تولیدی مدرن ناشی می‌گردد (ژی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۲). مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی عبارت است از یافتن توالی بهینه انجام عملیات کارهای مختلف و مرتبط با هر ماشین بر روی آن ماشین، این مسئله معمولاً با هدف کمینه کردن طول برنامه زمان‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرد (شجاعی برجویی و همکاران، ۱۳۹۹). زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر بسط‌یافته زمان‌بندی کار کارگاهی است. هنگامی که هر عملیات از یک کار می‌تواند روی یک ماشین از مجموعه ماشین‌های در دسترس برای پردازش آن انجام شود (پزلا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به اهمیت زیاد و ارتباط با صنعت مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر موجب برانگیختن مطالعات گسترده‌ای از دیدگاه‌های مختلف در این زمینه شده است (یوان و همکاران، ۲۰۲۳).

زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر بسیار مشکل‌تر از زمان‌بندی کار کارگاهی بوده، زیرا شامل مسئله اختصاص عملیات به ماشین‌ها نیز است. زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط براکر و شلی معرفی گردید (براکر و شلی<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰). مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف از معروف‌ترین مسائل زمان‌بندی است. در این سیستم تولیدی، تعداد  $n$  کاربر،  $m$  ماشین با لحاظ کردن توالی معین برای هر کار اجرا می‌شوند. هر کار از تعدادی از عمل‌های مختلف تشکیل شده است. عمل‌های هر کار دارای توالی معینی هستند. هدف از پژوهش در محیط کار کارگاهی منعطف، تعیین زمان‌بندی شروع عمل‌ها و مشخص ساختن توالی آن‌ها بر تجهیزات با هدف کمینه‌سازی زمان تولید است (نیکوئی و همکاران، ۱۴۰۳). مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر به‌عنوان یکی از مسائل ترکیبی به دلیل کاربردهای عملی آن در سیستم‌های تولیدی جدید در حال ظهور به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی موقعیت‌های پیچیده‌تر که نیازهای فعلی صنعت را بهتر منعکس می‌کند به‌طور

---

1. Xie  
2. Pezzella  
3. Brucker & Schlie

گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (سِرنا و همکاران، ۲۰۲۱). تحقیقات چند دهه اخیر نشان می‌دهد که به‌طور کلی گرایش محققان در بررسی مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر به سمت روش‌های فراابتکاری است. همچنین جهت حل مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در ابعاد بزرگ که نیاز ضروری جامعه فعلی است چاره‌ای جز استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نیست (کوماری<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به شرایط پیچیده در کارگاه، اکثر الگوریتم‌های زمان‌بندی مرسوم، الزامات فوری، پیچیدگی و پویایی را در مسائل زمان‌بندی کارگاهی برآورده نمی‌کنند. در مقایسه با الگوریتم‌های استاتیک، الگوریتم‌های زمان‌بندی پویا، بهتر می‌توانند الزامات را در موقعیت‌های واقعی برآورده کنند (لئو و همکاران، ۲۰۱۵). برای به دست آوردن راه‌حل‌های با کیفیت بالا در زمان‌های محاسباتی قابل قبول، رویکرد ترکیبی، از استراتژی‌های جستجوی محلی در الگوریتم‌های فراابتکاری باعث بهبودهای قابل توجهی در الگوریتم‌ها می‌شود (ابرو و همکاران، ۲۰۲۱). روش ترکیب الگوریتم‌ها منجر به تولید الگوریتم‌های کارآمدتر و قدرتمندتر می‌گردد (دفرشا و موحد<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). جمعیت اولیه یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های فراابتکاری (تکاملی) است که بر سرعت هم‌گرایی و کیفیت راه‌حل نهایی تأثیر می‌گذارد (بهشتی‌نیا و قاضی وکیلی، ۱۳۹۴).

## ۲. پیشینه پژوهش

با بررسی و مطالعه ادبیات تحقیق در حوزه حل مسائل زمان‌بندی مشخص گردید، کلیه تحقیقاتی که در گذشته، از روش ترکیب الگوریتم‌ها استفاده نموده‌اند به‌منظور ایجاد بهبود، جواب بهینه یک الگوریتم (یعنی خروجی الگوریتم اول که همان یک جواب تکی است) را به‌عنوان ورودی الگوریتم دیگر که فقط برای شروع به یک جمعیت اولیه تکی نیاز دارد پرداخته‌اند و در الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی پیشنهادشده قبلی برای حل مسائل زمان‌بندی، به تولید، بهبود و خالص‌سازی جمعیت اولیه که به‌صورت گروهی و مجموعه‌ای بوده (مانند جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک) و در جریان ترکیب الگوریتم‌ها تولید و استفاده

1. Kumari

2. Defersha & Movahed



شود، پرداخته نشده است. همچنین تا حدی که مطالعه صورت پذیرفت، الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه فقط یک‌بار جهت ترکیب باهم استفاده شده که در آن خروجی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ورودی (جمعیت اولیه تکی) در الگوریتم جستجوی ممنوعه منظور گردیده است حال آنکه در این پژوهش لیست ممنوعه حاصل از الگوریتم جستجوی ممنوعه به‌عنوان جمعیت اولیه که یک جمعیت گروهی است در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در نهایت به‌منظور پوشش خلأ تحقیقاتی موجود، با توجه به تأثیر جمعیت اولیه در دستیابی به جواب‌های بهتر، یک روش ترکیبی جدید و نوآورانه، برای ایجاد یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید ارائه شده است.

الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید بر پایه الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه ارائه شده است. دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و جستجوی ممنوعه با هم ترکیب گردیده و یک الگوریتم فراابتکاری بهبودیافته ارائه شده که الگوریتم بهبودیافته تمرکز بر تولید جمعیت اولیه پالایش شده و بهبودیافته گروهی از طریق استفاده از لیست ممنوعه حاصله از الگوریتم جستجوی ممنوعه به‌عنوان جمعیت اولیه برای الگوریتم ژنتیک دارد. الگوریتم فراابتکاری بهبودیافته جدید با توجه به اهمیت و کاربرد مسائل زمان‌بندی در صنعت برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر به‌کار گرفته شده است.

توانایی جستجوی محلی خوب و غلبه بر مشکل گیر افتادن در بهینه محلی، الگوریتم جستجوی ممنوعه و توانایی جستجوی قدرتمند الگوریتم ژنتیک از دیگر مواردی است که باعث انتخاب این الگوریتم‌ها برای این تحقیق شده است. در جدول زیر، با بررسی پژوهش‌های مختلف سعی شده است که جایگاه این پژوهش را نسبت به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است مورد بررسی قرار گیرد مسئله کلیه تحقیقات ذکر شده در جدول زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر، با هدف کمینه کردن زمان تکمیل کل است:

جدول ۱: جایگاه تحقیق پیش‌رو نسبت به تحقیقات پیشین

الگوریتم‌های استفاده‌شده در ترکیب														محققان/سال انتشار	
R L	M S	C S	L S	Ja ya	PS O	HL O	L P	AB C	T S	NN M	G A	VN S	S A		
												*	*	یزدانی و همکاران (۱۳۹۳)	
										*		*		بهشتی‌نیا و حسینی بیدگلی (۱۳۹۵)	
										*			*	شجاعی برجونی و همکاران (۱۳۹۹)	
								*	*					لی و همکاران (۲۰۱۷)	
							*				*			دفرشا و موحد (۲۰۱۸)	
					*	*								دینگ و گنو (۲۰۲۰)	
					*						*			لوو و همکاران (۲۰۲۰)	
				*					*					فان و همکاران (۲۰۲۱)	
		*	*											بیسولی و همکاران (۲۰۲۱)	
	*											*		ماریچلوام و گیتا (۲۰۲۱)	
*								*						لی و همکاران (۲۰۲۳)	
									*		*			تحقیق پیش‌رو	
<b>معادل‌ها</b>															
جستجوی همسایگی متغیر				V N S	برنامه‌ریزی خطی					LP	جستجوی محل			LS	



الگوریتم ژنتیک	GA	بهینه‌سازی یادگیری انسان	HLO	جستجوی خوشه‌بندی	CS
مدل شبکه‌ی عصبی	NNM	بهینه‌سازی ازدحام ذرات	PSO	جستجوی میمون	MS
جستجوی ممنوعه	TS	جایا	Jaya	یادگیری تقویتی	RL
		شبیه‌سازی تبرید	SA	کلونی مصنوعی زنبور عسل	ABC

در جدول زیر مروری بر یافته‌های مطالعات داخلی و خارجی مرتبط با زمینه پژوهش انجام شده است.

جدول ۲: مروری بر مطالعات داخلی و خارجی

یافته‌ها	عنوان	نویسنده، سال انتشار
نتایج آزمایش بر روی مجموعه داده تصادفی نشان داده است که الگوریتم ژنتیک، راه‌حل‌های سریع و مؤثری ارائه می‌دهد. با ارزیابی و تحلیل نتایج، مشاهده شد که فاصله طی شده توسط روش ترکیبی ژنتیک ۱۸ درصد بهتر از ترکیب الگوریتم‌های نزدیک‌ترین همسایه، بزرگ‌ترین شکاف، و S- شکل است.	ارائه الگوریتم‌های ابتکاری و فرا‌ابتکاری برای مسئله دسته‌بندی سفارشات و مسیریابی جمع‌کننده در انبارهای یک و چند راهرو متقاطع	شاملو و کشاورز (۱۴۰۳)
با توجه به نتایج حاصل شده در حل مثال عددی با در نظر گرفتن تعداد پیش‌فرض ماشین‌آلات روش اولویت‌بندی LPT بهترین پاسخ را از لحاظ مجموع هزینه دیرکرد و زودکرد نتیجه می‌دهد؛ اما در صورت افزودن تعداد ماشین‌آلات روش LPT و CR بهترین نتیجه را با کمک استفاده از الگوریتم جستجوی پراکنده در شبیه‌سازی به ما خواهند داد که در این نتایج محدودیت‌های هزینه و فضا نیز رعایت شده است.	بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی مسئله تعیین تعداد بهینه ماشین‌آلات در مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی در شرایط محدودیت بودجه و فضا	شهبازی و وحیدی (۱۴۰۳)
در این پژوهش، ۲۰ زیرمسئله مورد بررسی قرار گرفته است که بر اساس اندازه، به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ دسته‌بندی می‌شوند. ساختار تولید جواب‌های	زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با سیاست رد	نیکوئی و همکاران (۱۴۰۳)

یافته‌ها	عنوان	نویسنده، سال انتشار
<p>جدید به‌صورتی است که ضمن مراعات الزامات سیستم کار کارگاهی منقطع، همواره جواب‌های موجه تولید می‌شود. پارامترهای روش‌های فراابتکاری با استفاده از روش تاگوچی تنظیم شده‌اند و به‌عنوان نمونه، پارامترهای مرتبط با روش فراابتکاری جست‌وجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبرید گزارش شده است که مشتمل بر پارامترهای دمای اولیه، تعداد جست‌وجوهای همسایگی و شمارنده تکرار حلقه ارتعاش است. در ادامه نتایج حاصل از اجرای روش‌های فراابتکاری مقایسه قرار گرفته و در خصوص مسائل کوچک، با مقدار جواب دقیق به‌دست‌آمده مقایسه شده است.</p>	<p>کارها و تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه</p>	
<p>برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی نمونه مسئله‌ای در ابعاد کوچک آورده شده است که با استفاده از سالور Cplex نرم‌افزار GAMS حل شده است و برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های فراابتکاری مثال‌هایی در ابعاد کوچک حل و با جواب‌های حاصل از سالور Cplex نرم‌افزار GAMS مقایسه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری از کارایی مناسبی برخوردار هستند. سپس برای حل مدل در ابعاد بزرگ‌تر از دو الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. برای این منظور، ۳۰ نمونه مسئله به‌صورت تصادفی تولید شده و از شش شاخص برای مقایسه الگوریتم‌ها استفاده شده است. بعد از انجام آزمایش‌ها و مقایسه الگوریتم‌ها با یکدیگر، نتایج به‌دست‌آمده، کارایی بیش‌تر الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب‌ها را نسبت به الگوریتم NSGA-II در حداقل سه شاخص نشان می‌دهد.</p>	<p>ارائه مدلی برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی مختلط با جریان کالا و در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان حمل‌ونقل</p>	<p>روح‌بخش و همکاران (۱۴۰۲)</p>
<p>نتایج اجرای مدل RSSP پیشنهادی نشان می‌دهد که نرم‌افزار گمز قادر است که مسائل مذکور تا ابعاد متوسط را در یک زمان قابل قبول حل کند و به یک پاسخ کنترل‌شده و استوار دست یابد. همچنین نتایج عددی نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم GA پیشنهادی به‌عنوان یک گزینه برای حل مدل RSSP در مسائل با اندازه بزرگ است.</p>	<p>مدل‌سازی و حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منقطع تحت محدودیت منابع دوگانه انسان و ماشین با در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات</p>	<p>صوفی و همکاران (۱۴۰۲)</p>



یافته‌ها	عنوان	نویسنده، سال انتشار
<p>یافته‌ها نشان داد که برخی از معیارهای درون و برون شرکتی، تأثیر معناداری بر بحران مالی شرکت‌ها داشته است. از طرف دیگر، یافته‌ها نشان داد که از نظر کارایی، روش بهینه‌سازی مورچگان بیشترین کارایی را در مسئله پیش‌بینی بحران مالی دارد. در نهایت نیز مشخص شد که اطلاعات متغیرهای مستقل مورد بررسی می‌تواند بحران مالی شرکت‌ها را پیش‌بینی کند. تا پنج سال قبل از بحران مالی می‌توان با دقت نسبتاً بالایی بحران مالی را در شرکت‌ها را پیش‌بینی کرد اما با کاهش بحران مالی، به دلیل کاهش وضوح و دقت شاخص‌های پیش‌بینی بخش مالی، توانایی پیش‌بینی مدل نیز کاهش می‌یابد.</p>	<p>ارائه مدل پیش‌بینی بحران مالی بازار سرمایه ایران با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی</p>	<p>روحی‌سرا و همکاران (۱۴۰۲)</p>
<p>در این پژوهش با در نظر گرفتن عواملی چون بار وسیله نقلیه، سرعت وسیله نقلیه، پارامترهای آلاینده‌گی وسیله نقلیه نظیر ضریب بهره‌وری سوخت و موتور، شیب مسیر، تراکم رفت‌وآمد، سرعت و جهت باد، دمای هوا و جنس آسفالت به بهینه‌سازی هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت و دستمزد راننده پرداخته شده است. همچنین با در نظر گرفتن تقاضا به صورت احتمالی و سامانه توزیع با جمع‌آوری و تحویل کالا، یک مدل ریاضی احتمالی عدد صحیح آمیخته خطی به منظور کمیته‌سازی مجموع هزینه‌های ذکر شده ارائه گردیده است. استفاده از این مدل موجب تخمین دقیق‌تر هزینه‌های سامانه شده و منجر به تحلیل و برنامه‌ریزی بهتر برای سازمان‌ها می‌شود. با توجه به اینکه مسئله مطرح شده از نوع مسائل با درجه سختی بالا است، مسئله در ابعاد بزرگ با ترکیب دو الگوریتم فراابتکاری یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک حل شده است. با توجه به نتایج حاصل شده از محاسبات، الگوریتم ترکیبی توسعه یافته قابلیت تخمین جواب با دقت مناسبی را دارد و از سرعت عمل بالایی نسبت به الگوریتم‌های مشابه برخوردار است.</p>	<p>مدل‌سازی چندهدفه مسیریابی سبز با استفاده از الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک</p>	<p>ارشادی و همکاران (۱۴۰۲)</p>
<p>در تحقیق حاضر مسئله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بررسی شده است. برای این مسئله</p>	<p>مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله زمان بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در</p>	<p>خاکساری و قندی بیدگلی (۱۴۰۲)</p>

یافته‌ها	عنوان	نویسنده، سال انتشار
<p>یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه گردیده است. برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. همچنین به منظور احراز اعتبار مدل ارائه شده، روی پارامترهای مهم مدل تحلیل حساسیت انجام شده است. با توجه به پیچیدگی مدل و NP-hard بودن مسئله مورد بررسی، جهت حل مسائل با ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری جستجوی هارمونی ترکیبی پیشنهاد شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، به حل مسائل نمونه عددی با استفاده از این الگوریتم، نرم‌افزار گمز الگوریتم جستجوی هارمونی کلاسیک و همچنین الگوریتم جستجوی پرتوی بهبود یافته پرداخته شده است. نتایج محاسباتی، مؤید کارایی بسیار خوب الگوریتم مذکور برای حل مسئله مورد بررسی است.</p>	<p>نظر گرفتن زمان آزادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه</p>	
<p>در این تحقیق، یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی به منظور اورهال تجهیزات ارائه شده است. این مسئله شامل سه مرحله است که در مرحله اول، عملیات تفکیک اجزای یک تجهیز و در مرحله دوم، عملیات تعمیرات و اورهال بر قطعات تفکیک‌شده مرحله اول انجام می‌شود؛ سپس در مرحله سوم، قطعات اورهال‌شده مرحله قبل بر هم سوار می‌شوند. در مرحله سوم، کارگاه‌های موازی، عملیات را به صورت موازی انجام می‌دهند. تابع هدف مسئله، بیشینه زمان تکمیل کارها است و توالی پردازش کارها باید به نحوی باشد که مقدار تابع هدف، کمینه شود. به منظور حل مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای سایز کوچک ارائه شده است که براساس موقعیت هر کار، توالی پردازش کارها را مشخص می‌کند. برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، الگوریتم ژنتیک به کاررفته است. با افزایش سایز مسئله و در سایزهای مختلف، نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل شده است که این کارایی مدل و الگوریتم ارائه‌شده را نشان می‌دهد.</p>	<p>مسئله زمان‌بندی و تخصیص جریان کارگاهی در اورهال تجهیزات</p>	<p>شمامی و همکاران (۱۴۰۲)</p>
<p>در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای حل DFJSSPS با استفاده از حل‌کننده</p>	<p>مسئله ممتیک مؤثر برای مسئله زمان‌بندی کار</p>	<p>تانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴)</p>



نویسنده، سال انتشار	عنوان	یافته‌ها
	کارگاهی منعطف توزیع شده با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری توالی یکپارچه	CPLEX پیشنهاد شده است. سپس، یک الگوریتم ممتیک کارآمد (EMA) با اهداف به حداقل رساندن زمان ساخت و مصرف کل انرژی طراحی شده است. در EMA، یک روش کدگذاری پنج لایه و یک روش اولیه کارآمد برای به دست آوردن راه‌حل‌های اولیه با کیفیت بالا ارائه و یک اپراتور جستجوی محلی کارآمد برای کمک به الگوریتم برای بهبود سرعت همگرایی طراحی شده است. آزمایش‌های جامع نشان می‌دهد که EMA در بیشتر موارد از سه الگوریتم معروف مقایسه شده بهتر عمل می‌کند و عملکرد برتر EMA را برای حل DFJSSPS از نظر کارایی محاسباتی و کیفیت راه‌حل نشان می‌دهد.
لی و همکاران (۲۰۲۳)	الگوریتم یادگیری تقویتی و کلونی زنبور مصنوعی برای مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با جریان بالا	در این پژوهش یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده که الگوریتم یادگیری تقویتی و کلونی زنبور مصنوعی (RL- ABC) را ترکیب می‌کند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که اگرچه الگوریتم RL-ABC از نظر زمان CPU عملکرد پایین تری از خود نشان می‌دهد، اما اثربخشی و استحکام آن از همه الگوریتم‌های مقایسه شده در همه نمونه‌ها پیشی می‌گیرد. علاوه بر این، هر دو مؤلفه الگوریتم RL- ABC به‌طور مؤثر زمان تکمیل کل را کاهش می‌دهند.
ژی و همکاران (۲۰۲۲)	الگوریتم ترکیبی با ساختار همسایگی جدید برای مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی	محققان در این تحقیق سه تغییر در الگوریتم ژنتیک انجام داده‌اند. در مرحله اول یک عملگر تقاطع برای تولید فرزندان چندگانه که گسستگی جمعیت را افزایش می‌دهد معرفی نموده و در ادامه عملگر جهش براساس مسیر بحرانی برای بهبود، توانایی جواب‌ها جهت بیرون رفتن از بهینه محلی برای الگوریتم ژنتیک طراحی کرده و در نهایت الگوریتم جستجوی ممنوعه را با ساختار همسایگی جدید در الگوریتم ژنتیک تعبیه نموده‌اند. تابع هدف در این تحقیق کمینه کردن زمان تکمیل کل بوده و از نظر محققان الگوریتم ارائه شده عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های مقایسه شده داشته است.
لی و همکاران (۲۰۲۱)	الگوریتم جستجوی درخت مونت کارلو (MCTS) برای به حداقل رساندن فاصله	در این پژوهش یک مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر پویا (DFJSP) را با در نظر گرفتن چهار رویداد پویا، که ورود مشاغل جدید، خرابی ماشین، لغو

نویسنده، سال انتشار	عنوان	یافته‌ها
	زمانی در مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر پویا	مشاغل و تغییر در زمان پردازش عملیات، بررسی شده است. چندین تکنیک بهینه‌سازی مانند تخمین‌های ارزش اقدام سریع و دانش قبلی برای بهبود عملکرد روش زمان‌بندی مجدد مبتنی بر MCTS اتخاذ شده‌اند. زمان پاسخ‌گویی به رویدادهای پویا در DFJSP بسیار مهم است اما به خوبی حل نشده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی یک روش کارآمد و امیدوارکننده برای زمان‌بندی پویا هم بر روی کیفیت راه‌حل و هم بازده محاسباتی است.
کایا <sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)	حل مسائل زمان‌بندی جریان کارگاهی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کرم شب‌تاب و جستجوی محلی بهبودیافته	برای حل مسئله از سه الگوریتم استفاده شده به‌نحوی که بهترین خروجی حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کرم شب‌تاب به‌عنوان ورودی الگوریتم جستجوی محلی در نظر گرفته شده و مسئله حل می‌گردد. تابع هدف این تحقیق کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل بوده و از نظر محققان الگوریتم ارائه‌شده عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌هایی که با آن مقایسه گردیده نشان داده است.

### ۳. مفروضات مسئله

در این تحقیق مسئله در نظر گرفته شده جهت بررسی زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر خواهد بود. زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر بسط یافته زمان‌بندی کار کارگاهی است. زمان‌بندی کار کارگاهی شامل مجموعه‌ای از کار (سفارش) است که هر کار شامل مجموعه‌ای از عملیات است که باید توسط ماشین‌هایی مشخص پردازش شوند و هر ماشین می‌تواند یک عملیات مشخص را انجام دهد و هدف پیدا کردن توالی مناسب پردازش عملیات روی ماشین‌ها به‌منظور بهینه کردن تابع هدف است. در مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر فرض می‌شود هر عملیات اجازه دارد روی مجموعه‌ای از ماشین‌های در دسترس پردازش



- گردد. زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر بسیار مشکل‌تر از زمان‌بندی کار کارگاهی است. زیرا شامل مسئله اختصاص عملیات به ماشین‌ها نیز است. مفروضات مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر:
- ❖ تعداد  $n$  کار داریم.
  - ❖ تعداد  $m$  ماشین داریم.
  - ❖ کارها مستقل از یکدیگر هستند.
  - ❖ هر کار  $i$  از  $n_i$  عملیات تشکیل شده است.
  - ❖ تابع هدف تحقیق کمینه کردن زمان تکمیل کل است.
  - ❖ همه کارها و ماشین‌ها در زمان صفر در دسترس هستند.
  - ❖ هر ماشین می‌تواند در یک لحظه فقط یک عمل را پردازش کند.
  - ❖ تغییر سرعت انجام عملیات برای ماشین‌ها در نظر گرفته نشده است؛ زیرا تغییر در سرعت ماشین منجر به تغییر مصرف انرژی خواهد شد.
  - ❖ مدت‌زمان پردازش عملیات برای همه ماشین‌ها برابر است.
  - ❖ امکان پردازش دو عملیات از یک کار به صورت هم‌زمان وجود ندارد.
  - ❖ وقفه غیرمجاز است یعنی هر عمل باید بدون وقفه بعد از شروع شدن پردازش شود.
  - ❖ ماشین‌ها خراب نمی‌شوند.
  - ❖ از زمان جابه‌جایی کار بین ماشین‌ها چشم‌پوشی می‌شود.
  - ❖ همه پارامترها معلوم بوده و تصادفی نیستند.
  - ❖ زمان آماده‌سازی، مستقل از توالی عملیات است.
  - ❖ انبار کار در حین ساخت مجاز است.
  - ❖ کلیه کارها دارای اهمیت یکسان هستند.
  - ❖ مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر از نوع کلی است یعنی تمام ماشین‌های در دسترس می‌توانند کلیه عملیات را پردازش نمایند.

- ❖ حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر از طریق الگوریتم فراابتکاری بهبودیافته خواهد بود.
- ❖ رویکردهای یکپارچه برای حل در نظر گرفته شده که در این رویکرد تخصیص عملیات به ماشین‌ها و تعیین توالی عملیات روی ماشین‌ها به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود.
- ❖ روش ایجاد بهبود در الگوریتم پیشنهادی روش ترکیبی است.
- ❖ تحقیق یک هدفه است.

#### ۴. روش‌شناسی

با توجه به مطالب بیان شده در خصوص اهمیت زمان‌بندی و گرایش به سیستم‌های تولید مدرن در عصر جدید که در این سیستم‌ها ماشین‌آلات پیشرفته قادر به انجام بیش از یک عملیات بوده و همچنین افزایش تنوع کارها مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر به‌منظور استفاده بهینه از منابع موضوع ضروری است. در ادامه جهت حل مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در ابعاد بزرگ، چاره‌ای جز استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نیست. بر این اساس در تحقیق حاضر یک مدل‌سازی ریاضی ترکیبی جدید ارائه شده است. بررسی تحقیقات صورت پذیرفته در حوزه توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری موجود نشان می‌دهد برای ایجاد بهبود در الگوریتم‌های فراابتکاری موجود از دو روش می‌توان اقدام نمود. روش اول ایجاد تغییر در ساختار الگوریتم است که در این روش از مواردی مثل ایجاد تغییر و نوآوری در روش جستجو، عملگرهای الگوریتم و نحوه تولید جمعیت اولیه استفاده می‌شود. در روش دوم (مشابه این تحقیق) به‌منظور بهینه‌سازی در الگوریتم‌های فراابتکاری موجود از روش ترکیب این الگوریتم‌ها، به ارائه الگوریتم فراابتکاری جدید پرداخته می‌شود. در نهایت هر دو روش به دنبال ایجاد جواب بهینه نسبت به حالت قبل از تغییر در تابع هدف مسئله هستند. در این مقاله با توجه به NP-hard بودن مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر و اهمیت جمعیت اولیه در جواب‌های الگوریتم‌های فراابتکاری، با ارائه یک



روش ترکیبی جدید و نوآورانه، دو الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و جستجوی ممنوعه با هم ترکیب گردیده و یک الگوریتم فراابتکاری بهبودیافته ارائه شده است. این الگوریتم بهبودیافته تمرکز بر تولید جمعیت اولیه پالایش شده و بهبودیافته گروهی از طریق الگوریتم جستجوی ممنوعه برای الگوریتم ژنتیک دارد.

## ۵. مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

ابتدا با توجه به مسئله، متغیرهایی که باید تعیین شوند، مشخص می شوند، سپس آن‌ها را به نحو مناسبی کدگذاری کرده و به شکل کروموزوم نمایش می دهیم. یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می گردد که در واقع کروموزوم‌های اولیه هستند. هر یک از این کروموزوم‌ها جوابی برای مسئله هستند؛ اما جواب اصلی که ما به دنبال آن هستیم نیستند. براساس تابع هدف، مقدار برازندگی برای هر کروموزوم جمعیت اولیه حساب می شود. برخی کروموزوم‌ها با هم ترکیب شده سپس پدیده جهش رخ دهد. در نهایت کروموزوم‌ها از نظر برازندگی براساس مقدار تابع هدف رتبه بندی می شوند. در ادامه انتخاب کروموزوم‌ها برای تشکیل نسل جدید صورت می پذیرد. احتمال انتخاب کروموزوم‌های با امتیاز بالاتر، بیشتر است؛ اما درعین حال احتمال انتخاب شدن برای تمام کروموزوم‌ها حتی کروموزوم‌های با کمترین امتیاز وجود دارد. با نسل جدید به وجود آمده این مراحل را تکرار می کنیم تا به جواب مطلق برسیم. همگرایی و توقف در الگوریتم ژنتیک براساس یکی از معیارهای توقف زیر می تواند باشد: ۱. سپری شدن مدت زمان معین؛ ۲. رسیدن به حد مطلوبی از جواب؛ ۳. تعداد محدودی تکرار متوالی به بخشی که بهبودی محسوسی در جواب حاصل نشود.

## ۶. الگوریتم جستجوی ممنوعه

اصل اولیه در الگوریتم جستجوی ممنوعه، مجاز دانستن حرکت‌هایی که بهبودی به همراه نداشته و برای ادامه دادن جستجو در جستجوی محلی است تا وقتی که به یک بهینه موضعی برمی خوریم. البته در این روش برای اجتناب از دور زدن و رسیدن به جواب‌هایی که پیش از این به دست آمده، از حافظه‌ای به نام لیست ممنوعه استفاده می کنیم. این حافظه

جواب‌های اخیر را در خود ضبط می‌کند. در واقع یک جستجوی ممنوعه ساده را می‌توان ترکیبی از یک حافظه کوتاه‌مدت با جستجوی محلی دانست.

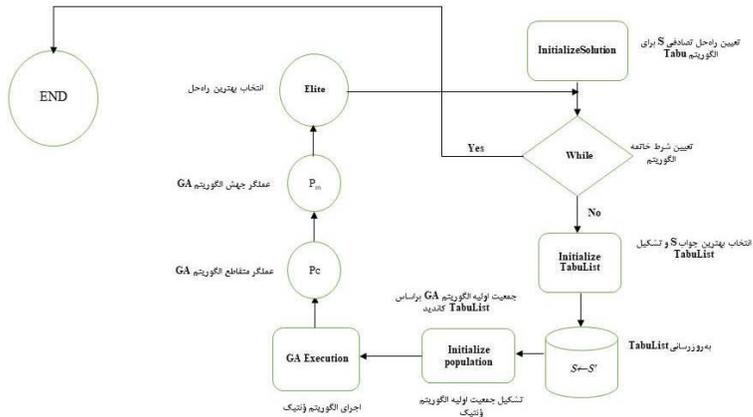
### ۶-۱. ساختار کلی الگوریتم جستجوی ممنوعه

ابتدا از یک جواب اولیه شروع به حرکت می‌کند. در هر تکرار، انتقالی که بر روی جواب اولیه اعمال می‌شود، مجموعه‌ای از جواب‌ها را در فضای جستجو تعریف می‌کند که جواب‌های همسایه گفته می‌شوند. برای اینکه در جستجو به جواب‌های پیشین برخورد نکنیم از لیست ممنوع استفاده می‌کنیم. مجموعه‌ای از انتقال‌های ممنوع که به حافظه سپرده می‌شوند تا چنین بازگشت‌هایی به جواب‌های پیشین رخ ندهد. به شرطی که در لیست باشند. این انتقال‌های ممنوع، در حافظه‌ای کوتاه‌مدت ذخیره می‌شوند تا (برای مدتی معین) انجام مجموعه‌ای معین از انتقال‌ها را ممنوع سازند. بنابراین از دور بی‌پایان جلوگیری می‌کند. این مدت معین بنا بر الگوریتم حل و نوع مسئله و ماهیت انتقال‌ها متغیر است. حافظه مورد استفاده برای نگهداری انتقال‌های ممنوع معمولاً گردشی و دارای طول ثابت است. سپس بهترین جواب همسایه را از انتخاب می‌کند. در صورتی که این جواب در فهرست ممنوعه قرار نداشته باشد، الگوریتم به جواب همسایه حرکت می‌کند. در غیر این صورت الگوریتم معیاری به نام معیار تنفس را چک خواهد کرد. بر اساس معیار تنفس اگر جواب همسایه از بهترین جواب یافت‌شده تاکنون بهتر باشد، الگوریتم به آن حرکت خواهد کرد، حتی اگر آن جواب در فهرست ممنوعه باشد. پس از حرکت الگوریتم به جواب همسایه، فهرست ممنوعه به‌روزرسانی می‌شود. به این معنا که حرکت قبل که به‌وسیله آن به جواب همسایه حرکت کردیم در فهرست ممنوعه قرار داده می‌شود تا از بازگشت مجدد الگوریتم به آن جواب و ایجاد سیکل جلوگیری شود. در این الگوریتم تا زمان برقراری یکی از شروط توقف این روند ادامه می‌یابد: تعداد تکرار، زمان، عدم بهبود، همگرایی



## ۶-۲. الگوریتم پیشنهادی TS-GA

برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر یک الگوریتم ترکیبی با نام TS-GA که حاصل از ادغام دو الگوریتم قبلی است ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی TS-GA مهم بودن و اثرگذاری جمعیت اولیه را در جواب الگوریتم فراابتکاری را مد نظر قرار داده و روش جدیدی برای ایجاد جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک پیشنهاد داده و آثار آن را مورد بررسی قرار داده است. در الگوریتم پیشنهادی در ابتدا مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر از طریق الگوریتم جستجوی ممنوعه حل شده و پس از رسیدن به جواب بهینه، لیست ممنوعه تشکیل شده در این الگوریتم بر اساس بهترین جواب‌ها مرتب‌سازی شده و در ادامه این لیست (به تعداد مورد نیاز کروموزوم‌های تعریف شده در الگوریتم ژنتیک) به عنوان جمعیت اولیه وارد الگوریتم ژنتیک شده و این الگوریتم فعال گردیده و مجدد مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر را حل و جواب بهینه نهایی پس از گذر از دو الگوریتم فراابتکاری حاصل می‌گردد. با توجه به اینکه اعضای لیست ممنوعه مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه هستند که با یافتن هر جواب بهتر، جواب قبلی به داخل این لیست هدایت می‌شود و این لیست با هر حرکت و رسیدن به جواب بهتر بعدی به‌روزرسانی می‌گردد. پس در این لیست مجموعه‌ای از جواب‌هایی وجود دارد که در مواقعی در جستجوی همسایگی الگوریتم جستجوی ممنوعه جواب بهینه برای مسئله بوده است. حال می‌توان ادعا نمود که مجموعه لیست ممنوعه که به عنوان جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک قرار گرفته و به جای اینکه جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد گردد، به صورت خالص و اصلاح شده تولید می‌گردد و نتیجه بهتری ارائه خواهد نمود. مراحل طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی TS-GA در شکل (۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱: فلوچارت و مراحل طراحی الگوریتم TS-GA

در این قسمت برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، عملکرد آن را براساس بهترین جواب ممکن با سایر الگوریتم‌ها از طریق حل ۵ نمونه مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر مقیاس کوچک و متوسط و حل ۴ نمونه مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر مقیاس بزرگ که جزئیات آن در جداول (۳) و (۴)، نشان داده شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین برای بررسی بیشتر الگوریتم پیشنهادی علاوه بر الگوریتم‌های پایه از دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها نیز در آزمایش‌های عددی استفاده شده است. آزمایشات براساس دیتاست‌های استاندارد اجرا شده‌اند که اطلاعات بیشتر را می‌توان در آدرس (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/jobshopinfo.html>) مطالعه کرد.

جدول ۳: نمونه مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر استفاده‌شده

(مقیاس کوچک و متوسط)

Dataset	No. of Jobs	No. of Machine
Dataset No.1	14	5
Dataset No.2	24	8
Dataset No.3	67	17
Dataset No.4	97	34
Dataset No.5	127	50



جدول ۴: نمونه مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر استفاده شده (مقیاس بزرگ)

Dataset	No. of Jobs	No. of Machine
Dataset No.1	326	120
Dataset No.2	462	165
Dataset No.3	543	230
Dataset No.4	584	250

### ۳-۶. تنظیم پارامترهای الگوریتم

هر سه الگوریتم با استفاده از نرم‌افزار Matlab کدنویسی شده‌اند. همچنین تمام آزمایشات در سیستم با مشخصات Intel core i7 1.80GH و ۸ GB RAM و ویندوز ۱۰ اجرا شده است. هر الگوریتم به صورت مجزا ۳۰ بار برای هر مسئله اجرا شده است و نتایج در جداول (۶) و (۷)، گزارش شده است. شرط توقف Iteration=200 در نظر گرفته شده و طراحی پارامترها برای این تحقیق در جدول (۵)، دیده می‌شود.

جدول ۵: تنظیم پارامترهای تمام الگوریتم‌ها

Algorithm	Itr	Pop	MP	Cr	Tabulist size	Neighborhood size	TabuContent Type	Move Method
GA	200	100	0.2	0.5	---	---	---	---
TS	200	1	---	---	Changing	20	Swapedpair positions	Swap
TS-GA	200	100	---	---	Changing	20	Swapedpair positions	Swap

## ۷. تجزیه و تحلیل یافته‌ها

جدول (۶)، شامل بهترین جواب ممکن و مقدار میانگین جواب‌ها برای مسائل کوچک و متوسط و جدول (۷)، شامل بهترین جواب ممکن و مقدار میانگین جواب‌ها برای مسائل بزرگ بوده و نتایج مشخص می‌کند الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جواب بهتری ارائه داده و رتبه اول را کسب نموده است. از بررسی جدول (۶)، مربوط به مسائل کوچک و متوسط در یک مورد مربوط به مسئله ۶۷ کار و ۱۷ ماشین مشاهده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی ذرات نتیجه بهتری داشته و الگوریتم پیشنهادی رتبه دوم را کسب کرده است. همچنین از بررسی جدول (۷)، مربوط به مسائل بزرگ در یک مورد مربوط به مسئله ۵۴۳ کار و ۲۳۰ ماشین الگوریتم بهینه‌سازی ذرات نتیجه بهتری داشته و الگوریتم پیشنهادی در مکان دوم ایستاده است. اشکال (۲) و (۳)، نشان‌دهنده نمودار مربوط به بهترین جواب به دست آمده از میان ۳۰ بار حل برای مسئله ۱۴ کار و ۵ ماشین و مسئله ۲۴ کار و ۸ ماشین توسط هر یک از الگوریتم‌ها هستند. از روی این اشکال به خوبی می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی در تمام مراحل تست نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه شده برتری داشته است.

شکل (۴)، نشان‌دهنده نمودار مربوط به بهترین جواب به دست آمده برای مسئله ۶۷ کار و ۱۷ ماشین است. از روی این شکل به خوبی می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی در رتبه دوم و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در مکان اول قرار گرفته است. اشکال (۵) و (۶) نشان‌دهنده نمودار مربوط به بهترین جواب به دست آمده برای مسئله ۹۷ کار و ۳۴ ماشین و مسئله ۱۲۷ کار و ۵۰ ماشین هستند. از روی این اشکال به خوبی می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی در تمام مراحل تست نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه شده برتری خیلی خوبی داشته است. اشکال (۷) و (۸)، برای مسئله ۳۲۶ کار و ۱۲۰ ماشین و مسئله ۴۶۲ کار و ۱۶۵ ماشین از مسائل بزرگ هستند. این اشکال به خوبی نشان می‌دهند الگوریتم پیشنهادی در مکان اول ایستاده است. شکل (۹)، مربوط به مسئله ۵۴۳ کار و ۲۳۰ ماشین بوده و نشان می‌دهد در این مورد الگوریتم بهینه‌سازی ذرات رتبه اول و الگوریتم پیشنهادی رتبه دوم را کسب نموده است.



شکل (۱۰)، مربوط به مسئله ۵۸۴ کار و ۲۵۰ ماشین بوده که در این مسئله الگوریتم پیشنهادی برتری کامل نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است. در کلیه اشکال به خوبی می توان دریافت که ترکیب ارائه شده در الگوریتم پیشنهادی که منجر به اصلاح جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک می گردد به صورت مشهودی نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های پایه ترکیب ارائه می نماید و در مقایسه با الگوریتم بهینه سازی ذرات و کلونی مورچه‌ها فقط در دو مورد الگوریتم بهینه سازی ذرات در مکان اول و الگوریتم پیشنهادی در مکان دوم ایستاده است.

جدول ۶: نتایج اجرای الگوریتم‌ها برای دیتاست‌های مختلف در مقیاس کوچک و متوسط

Schpascal10 m=250 J=584	Pmed26 m=230 J=543	Indtrack3 m=165 J=462	Gcol12 m=120 J=326	دیتاست	
				الگوریتم	
(889.79) 884	(823.29) 818	(722.78) 718	(620.45) 616	ACO	
(897.82) 892	(834.54) 829	(758.90) 754	(749.60) 746	GA	
(881.80) 877	(811.45) 806	(739.39) 734	(605.56) 602	PSO	
(868.62) 863	(816.81) 813	(713.18) 709	(598.58) 594	TS-GA	
(905.38) 901	(846.93) 841	(773.59) 768	(635.32) 632	TS	

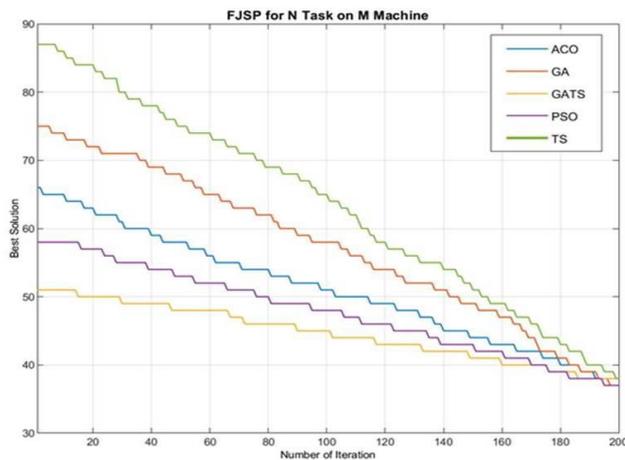
\* (عدد داخل پرانتز مقدار میانگین است)

جدول ۷: نتایج اجرای الگوریتم‌ها برای دیتاست‌های مختلف در مقیاس بزرگ

thpack7 m=50 J=127	CCNFP34g97b m=34 J=97	cap61 m=17 J=67	gcut7 m=8 J=24	scplrl11 m=5 J=14	دیتاست	
					الگوریتم	
(197.41) 194	(169.39) 168	(132.29) 131	(67.24) 66	(51.86) 49	ACO	
(214.23) 211	(177.26) 175	(140.54) 138	(77.02) 75	(58.43) 57	GA	
(204.82) 201	(161.61) 159	(121.84) 120	(60.18) 58	(43.93) 41	PSO	
(191.37) 188	(150.76) 148	(126.48) 124	(53.87) 51	(39.58) 38	TS-GA	
(222.64) 218	(185.35) 183	(149.61) 147	(88.73) 87	(65.07) 63	TS	

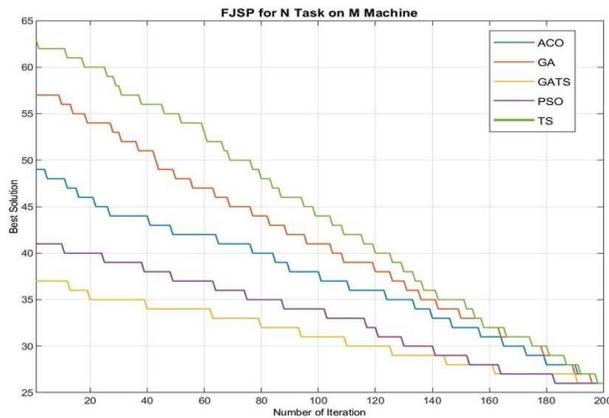
\* (عدد داخل پرانتز مقدار میانگین است)

شکل (۲)، نمودار حاصل از حل مسئله ۱۴ کار در ۵ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول را کسب نموده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه دوم، کلونی مورچه‌ها رتبه سوم، ژنتیک رتبه چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده‌اند.



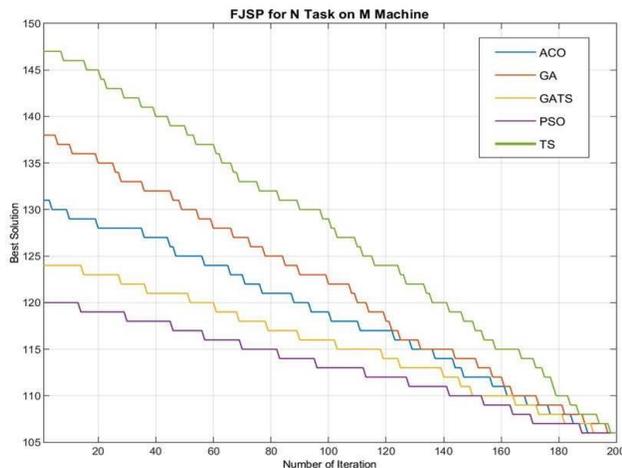
شکل ۲: بهترین جواب ممکن برای ۱۴ کار در ۵ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۳)، نمودار حاصل از حل مسئله ۲۴ کار در ۸ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه دوم، کلونی مورچه‌ها رتبه سوم، ژنتیک رتبه چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده‌اند.



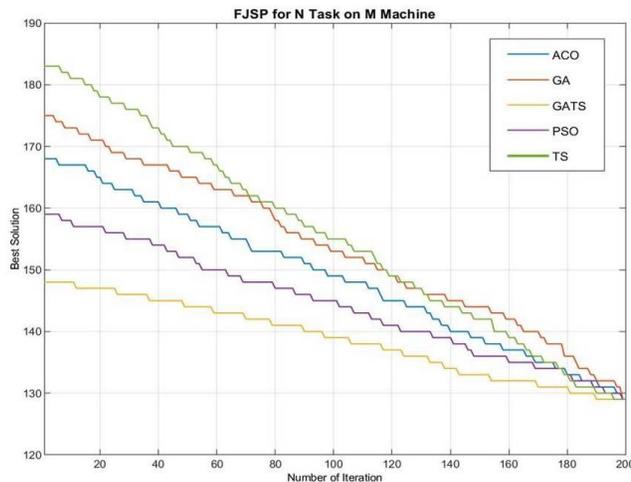
شکل ۳: بهترین جواب ممکن برای ۲۴ کار در ۸ ماشین توسط الگوریتم های مختلف

شکل (۴)، نمودار حاصل از حل مسئله ۶۷ کار در ۱۷ ماشین را نشان می دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات رتبه اول الگوریتم پیشنهادی رتبه دوم، کلونی مورچه ها رتبه سوم، ژنتیک رتبه چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده اند.



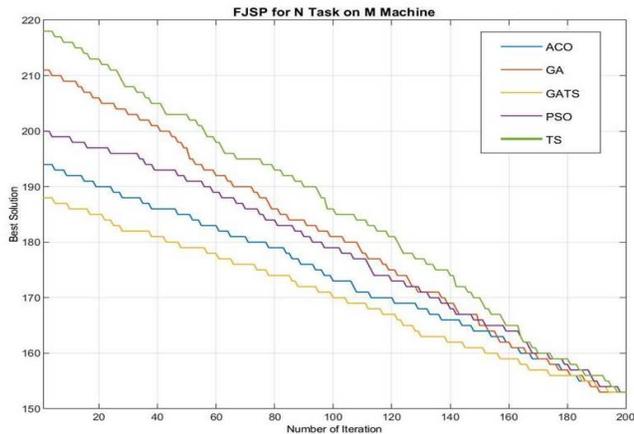
شکل ۴: بهترین جواب ممکن برای ۶۷ کار در ۱۷ ماشین توسط الگوریتم های مختلف

شکل (۵)، نمودار حاصل از حل مسئله ۹۷ کار در ۳۴ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه دوم، کلونی مورچه‌ها رتبه سوم، ژنتیک رتبه چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده‌اند. در این نمودار در تمام مراحل تکرار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول را کسب نموده است. این نمودار نشان می‌دهد الگوریتم جستجوی ممنوعه در Iteration بالای ۱۴۰ نسبت به الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است.



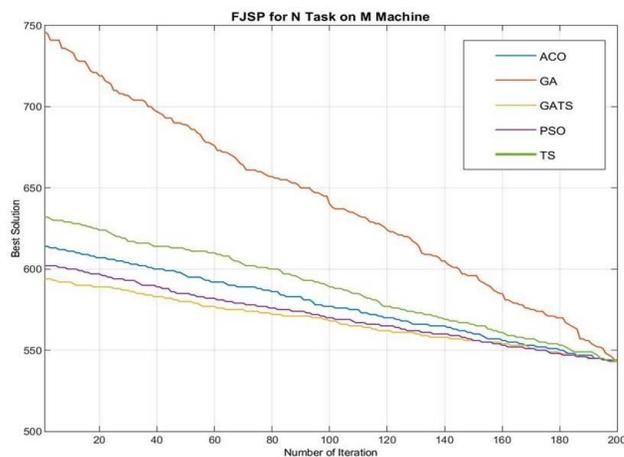
شکل ۵: بهترین جواب ممکن برای ۹۷ کار در ۳۴ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۶)، نمودار حاصل از حل مسئله ۱۲۷ کار در ۵۰ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار در تمام مراحل تکرار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول را کسب نموده است. کلونی مورچه‌ها رتبه دوم، بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه سوم، ژنتیک رتبه چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده‌اند.



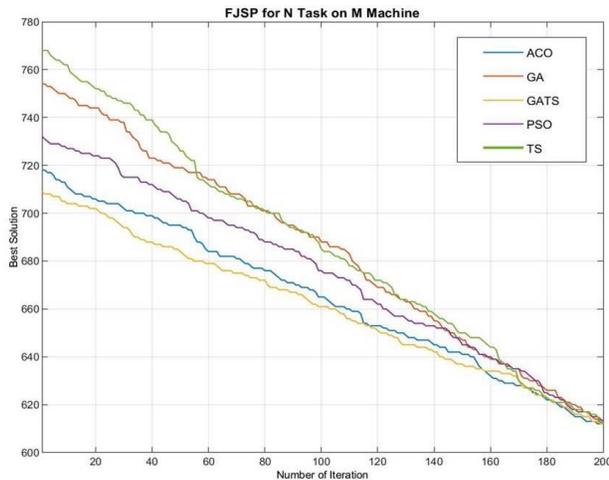
شکل ۶: بهترین جواب ممکن برای ۱۲۷ کار در ۵۰ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۷)، نمودار حاصل از حل مسئله ۳۲۶ کار در ۱۲۰ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول را کسب نموده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه دوم، کلونی مورچه‌ها رتبه سوم، جستجوی ممنوعه چهارم و ژنتیک رتبه پنجم را کسب نموده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در Iteration بالای ۱۲۰ عملکرد نزدیک الگوریتم پیشنهادی داشته است.



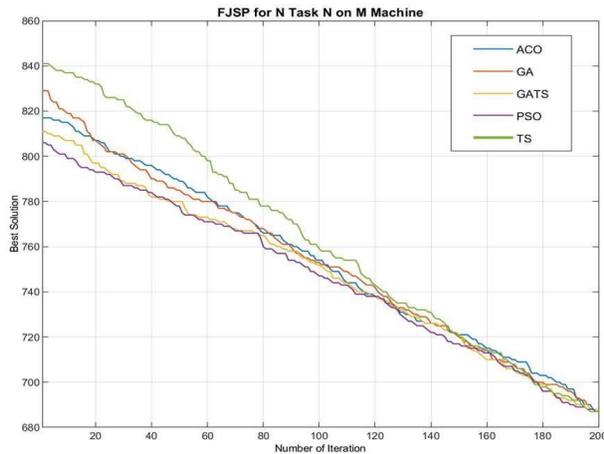
شکل ۷: بهترین جواب ممکن برای ۳۲۶ کار در ۱۲۰ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۸)، نمودار حاصل از حل مسئله ۴۶۲ کار در ۱۶۵ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول را کسب نموده است. کلونی مورچه‌ها رتبه دوم، بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه سوم، ژنتیک چهارم و جستجوی ممنوعه رتبه پنجم را کسب نموده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد الگوریتم کلونی مورچه‌ها در Iteration بالای ۱۶۰ عملکرد نزدیک الگوریتم پیشنهادی داشته است و همچنین در Iteration بالای ۶۰ الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی ممنوعه عملکرد مشابهی داشته‌اند.



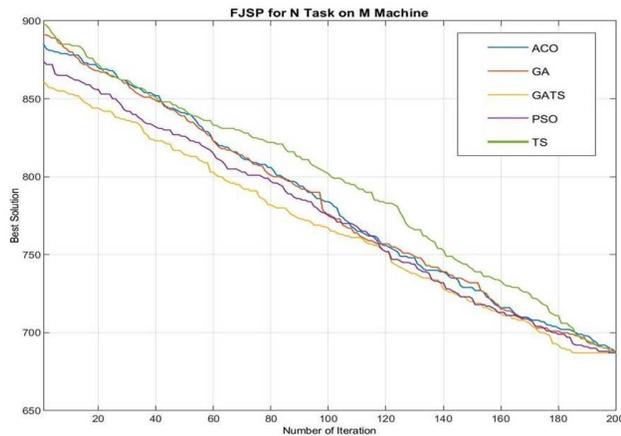
شکل ۸: بهترین جواب ممکن برای ۴۶۲ کار در ۱۶۵ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۹)، نمودار حاصل از حل مسئله ۵۴۳ کار در ۲۳۰ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی و بهینه‌سازی ازدحام ذرات عملکرد مشابهی داشته‌اند. همچنین عملکرد کلونی مورچه‌ها و ژنتیک نیز مشابه بوده است و جستجوی ممنوعه رتبه آخر را کسب نموده است.



شکل ۹: بهترین جواب ممکن برای ۵۴۳ کار در ۲۳۰ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

شکل (۱۰)، نمودار حاصل از حل مسئله ۵۸۴ کار در ۲۵۰ ماشین را نشان می‌دهد که در ۳۰ بار تکرار این مسئله بهترین جواب توسط الگوریتم‌های پیشنهادی، جستجوی ممنوعه، ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها در این شکل نمایش داده شده است. در این نمودار الگوریتم پیشنهادی رتبه اول و بهینه‌سازی ازدحام ذرات رتبه دوم را کسب نموده است. الگوریتم کلونی مورچه‌ها و ژنتیک عملکرد مشابهی داشته و به ترتیب مکان‌های سوم و چهارم را کسب نموده و جستجوی ممنوعه در مکان آخر است. با توجه به نتایج مربوط به بهترین جواب‌ها که در اشکال ۲ تا ۱۰ نشان داده شده و همچنین مقادیر میانگین جواب‌ها در جدول (۶) و (۷) که حاصل از ۳۰ بار حل برای هر مسئله است، می‌توان دریافت که مدل ارائه‌شده از پایایی خوبی برخوردار است.



شکل ۱۰: بهترین جواب ممکن برای ۵۸۴ کار در ۲۵۰ ماشین توسط الگوریتم‌های مختلف

## ۱-۲. پیچیدگی زمانی

پیچیدگی زمانی الگوریتم‌ها برای ۵ مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در مقیاس کوچک و متوسط و ۴ مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در مقیاس بزرگ در جداول (۸) و (۹) آمده است. به‌طور طبیعی الگوریتم پیشنهادی از نوع ترکیبی است و طراحی این الگوریتم بدین صورت است که ابتدا الگوریتم جستجوی ممنوعه باید کامل اجرا شده تا لیست ممنوعه این الگوریتم تشکیل گردیده و به‌عنوان ورودی جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک قرار گرفته و سپس الگوریتم ژنتیک اجرا شده و به پایان برسد. بنابراین طولانی‌شدن زمان حل یک امر طبیعی بوده و بنابراین باید زمان حل الگوریتم پیشنهادی بیشترین مقدار را داشته باشد. ولی همان‌گونه که در جداول مشاهده می‌گردد؛ این اتفاق در خیلی از موارد آزمایش عملی نشده و الگوریتم پیشنهادی نسبت به چهار الگوریتمی که با آن‌ها مقایسه شده زمان حل بهتری داشته است و این نشان می‌دهد جمعیت اولیه خالص و اصلاح شده در کوتاه کردن زمان حل نیز مؤثر است.



جدول ۸: نتایج پیچیدگی زمانی حاصل از اجرای الگوریتم‌ها برای دیتاست‌های مختلف مقیاس کوچک و متوسط بر حسب ثانیه

thpack7 m=50 J=127	CCNFP34g97b m=34 J=97	cap61 m=17 J=67	gcut7 m=8 J=24	scpc1r11 m=5 J=14	دیتاست
					الگوریتم
136.5938	69.8281	27.875	5.0469	4.3594	ACO
10.17188	7.3125	5.45312	2.2812	4.5312	GA
9.109375	4.171875	0.015625	0.03125	0.09375	PSO
17.38674	11.046875	3.62547	2.03125	3.29688	TS-GA
13.765625	5.95312	0.734375	0.125	0.29688	TS

\* (عدد داخل پرانتز مقدار میانگین است)

جدول ۹: نتایج پیچیدگی زمانی حاصل از اجرای الگوریتم‌ها برای دیتاست‌های مختلف مقیاس بزرگ بر حسب ثانیه

Schpascal10 m=250 J=584	Pmed26 m=230 J=543	Indtrack3 m=165 J=462	Gcol12 m=120 J=326	دیتاست
				الگوریتم
273.8411	227.895	198.234	147.897	ACO
115.7825	98.2491	58.566	36.314	GA
72.9023	58.234	46.367	31.654	PSO
103.0619	87.1239	71.456	46.541	TS-GA
88.8912	63.735	51.5601	36.7923	TS

\* (عدد داخل پرانتز مقدار میانگین است)

## ۷-۲. تحلیل آماری فریدمن

با توجه به مقادیر اعداد حاصله و ثبت شده در جداول شماره (۶) و (۷) رتبه‌بندی الگوریتم‌ها برای اعتبارسنجی برتری GA-TS پیشنهادی از نظر آماری، تحلیل آمار فریدمن انجام شد. همان‌گونه که جدول (۱۰)، نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی بر اساس تحلیل آماری فریدمن، رتبه اول را کسب نموده و سایر الگوریتم‌ها رتبه‌های دوم تا پنجم را به شرح جدول کسب نموده‌اند.

جدول ۱۰: رتبه‌بندی الگوریتم‌های تحقیق بر اساس تحلیل آماری فریدمن

Algorithms	Average ranking	Final ranking
GA	3.87	4
PSO	3.46	2
ACO	3.63	3
TS	4.24	5
TS-GA	3.38	1

## نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با بهبود مستمر مدل‌های علمی می‌توان راندمان فرایندهای تولید را به‌طور چشم‌گیری افزایش داد. مدل ارائه شده در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر است. مدل پیشنهادی با هدف کمینه کردن زمان تکمیل کل طراحی گردیده است. با توجه به اینکه مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در زمره مسائل NP-hard محسوب می‌شود و این مسائل دارای پیچیدگی بالایی هستند استفاده از روش‌های تکاملی برای حل مدل ارائه شده ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت و تأثیر جمعیت اولیه در جواب الگوریتم‌های فراابتکاری و خلأ تحقیقاتی بیان شده در بخش پیشینه‌شناسی (عدم تولید جمعیت اولیه گروهی پالایش شده در فرایند ترکیب الگوریتم‌ها) هدف این مطالعه، ارائه یک روش ترکیبی جدید و نوآورانه، برای ایجاد یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید، به‌منظور بهینه‌سازی در مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر از طریق اثرگذاری در تولید جمعیت اولیه که منجر به کم کردن زمان تکمیل کل خواهد شد، است. این مطالعه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، ژنتیک، جستجوی ممنوعه، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کلونی مورچه‌ها و یک الگوریتم ترکیبی پیشنهادی به‌صورت یک‌هدفه انجام شده است. الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از دو الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه بوده و هدف آن ایجاد بهبود در تولید جمعیت اولیه گروهی الگوریتم ژنتیک است. «ماتی و زی»<sup>۱</sup> (۲۰۰۵) ثابت کرده‌اند که مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در گروه مسائل N.P-hard قرار دارد. پیچیدگی این مسئله به‌مراتب از پیچیدگی مسئله زمان‌بندی



کار کارگاهی بیشتر است. مدل به کار رفته در این تحقیق را می‌توان در تمامی سیستم‌های برنامه‌ریزی تولید به کار برد، چون این مدل به صورت عمومی نوشته شده است و با هر صنعتی که بتوان فرایند آن را به صورت کار، ماشین و عملیات تعریف کرد سازگار است. همچنین این مدل می‌تواند جواب‌های بهینه مناسبی برای سیستم تولید با توجه به تابع هدف مورد نظر به دست آورد. به طور خلاصه، الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان یک ساختار الگوریتمی در نظر گرفته می‌شود که در انواع مسائل بهینه‌سازی فقط با چند تغییر برای سازگاری با مسئله داده شده اعمال می‌شوند. الگوریتم‌های فراابتکاری دارای یک ویژگی‌های اساسی هستند و آن این است که برای مسئله خاصی طراحی نشده‌اند و در کلیه مسائل کاربرد دارند.

الگوریتم بهبودیافته پیشنهادی برای تولید جمعیت اولیه پالایش شده و بهبودیافته گروهی ابتدا مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر را با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه حل و لیست ممنوعه تشکیل شده را به عنوان جمعیت اولیه برای الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کند. لیست ممنوعه تشکیل شده که شامل جواب‌های بهینه است به عنوان یک جمعیت اولیه گروهی مناسب و اصلاح شده که به صورت یکجا تولید شده وارد الگوریتم ژنتیک می‌گردد. ترکیب الگوریتم‌ها به این شکل برای اولین بار انجام شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری شامل الگوریتم‌های ژنتیک، جستجوی ممنوعه، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کلونی مورچه‌ها و الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر در اندازه‌های مختلف شامل ۵ مسئله کوچک و متوسط و ۴ مسئله بزرگ به کار گرفته شده و در این مقایسه هر مسئله ۳۰ بار حل شده است. در نهایت پس از مقایسه نتایج حاصل شده به خوبی مشخص شده با استفاده از روش ترکیبی معرفی شده، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با تمرکز بر بهبود و اصلاح جمعیت اولیه گروهی در الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر الگوریتم‌ها برتری مناسبی داشته است. به طوری که در تمام مراحل حل مسئله بهترین جواب را نسبت به الگوریتم‌های پایه (یعنی جستجوی ممنوعه و ژنتیک) ارائه نموده و همچنین در مقایسه با دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی مورچه‌ها همیشه نسبت به کلونی مورچه‌ها برتری داشته

و به غیر از دو مورد به الگوریتم بهینه‌سازی ذرات نیز برتری داشته است. به عبارت دیگر اصلاح جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک (که یک جمعیت اولیه گروهی است) توسط ترکیب ارائه شده تأثیر بسزایی در حل مسئله و ارائه جواب بهتر داشته است.

با توجه به نتایج حاصل از ۳۰ بار حل برای هر ۹ مسئله که در این نتایج، الگوریتم پیشنهادی در رتبه اول قرار گرفته است می‌توان دریافت که مدل ارائه شده از پایایی خوبی برخوردار است. نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های (۲) الی (۱۰) دو مورد دیگر از دستاوردهای تحقیق را به شرح ذیل نشان می‌دهد:

انتخاب و تنظیم پارامترهای یک الگوریتم در به دست آوردن نتایج حاصل از اجرای آن بر روی مسائل مختلف بهینه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا مجموعه پارامترهای مشخص شده برای یک الگوریتم بهینه‌سازی بر روی یک مسئله خاص می‌تواند منجر به نتایج بهتری نسبت به مقادیر دیگر پارامترها باشد. این به این دلیل است که اکثر الگوریتم‌ها هنگام آزمایش روی مسائل عمومی تقریباً یکسان عمل می‌کنند، که از آن به عنوان نظریه The No Free Lunch Theory یاد می‌شود. از روی نمودارها می‌توان دید جواب‌های الگوریتم‌ها در iteration های بالای ۱۶۰ همگرا شده‌اند و جواب‌های مشابه تولید نموده‌اند که نشان از تنظیم مناسب پارامترها است؛ با تنظیم مناسب پارامترها هم جواب بهینه‌ای می‌توان ایجاد نمود و هم‌زمان حل را کوتاه‌تر کرد. به عبارت دیگر، iteration های بالای ۲۰۰ نه تنها جواب بالایی تولید نخواهد کرد بلکه زمان حل الگوریتم‌ها را نیز افزایش خواهد داد.

همچنین این نمودارها نشان می‌دهند که از iteration یک الی ۲۰۰ در تمام نقاط، الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های پایه (جستجوی ممنوعه و ژنتیک) جواب بهینه‌ای تولید نموده است و این بدین معنا است که استفاده از جمعیت اولیه مناسب بجای جمعیت اولیه تصادفی در الگوریتم ژنتیک باعث بهینه شدن جواب‌ها از ابتدای حل (iteration=1) تا پایان الگوریتم می‌شود و مختص یک نقطه خاص نیست.

در این تحقیق افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل زمان‌بندی کار کارگاهی انعطاف‌پذیر با استفاده از روش ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور تولید جمعیت اولیه



پالایش شده و بهبودیافته گروهی، نتیجه گیری و اثبات شده است. همچنین بررسی پیچیدگی زمانی الگوریتم های استفاده شده تأثیر جمعیت اولیه پالایش شده و بهبودیافته را در کوتاه کردن زمان حل به خوبی نشان می دهد.

### پیشنهاد های پژوهش

برخی از کاربردهای بهینه سازی برای مدیران از طریق الگوریتم پیشنهادی ارائه شده به شرح ذیل قابل انجام است:

- ❖ طراحی بهینه تجهیزات و کارخانه های فراوری شیمیایی؛
- ❖ تخصیص منابع یا خدمات در میان چندین فعالیت برای به حداکثر رساندن سود؛
- ❖ کنترل زمان انتظار و بیکاری و صف بندی در خطوط تولید برای کاهش هزینه ها؛
- ❖ افزایش کارایی و اثربخشی فعالیت های زنجیره تأمین؛
- ❖ یافتن مسیرهای بهینه وسایل نقلیه فضایی؛
- ❖ ایجاد بهینگی در مسائل جنگی و دفاعی؛

### پیشنهاد های برای تحقیقات آتی

در این بخش پیشنهاد های قابل ذکر برای انجام تحقیقات آتی در زمینه ساختار مدل پیشنهادی و همچنین الگوریتم حل، ارائه شده است که در ادامه تشریح می گردند. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، الگوریتم ارائه شده، ترکیبی از الگوریتم های ژنتیک و جستجوی ممنوعه بوده و به صورت تک هدفه بود، زمینه های تحقیقات آتی به شرح ذیل مطرح می گردد:

- ❖ بررسی مسئله به صورت چند هدفه با اهداف متضاد مانند منظور نمودن تغییر در سرعت ماشین که باعث کاهش زمان تکمیل گردیده ولی در مقابل مصرف انرژی را افزایش می دهد؛
- ❖ استفاده از سایر الگوریتم های فرا ابتکاری در ترکیب به منظور ارائه ترکیبات جدید با هدف رسیدن به جواب های بهتر؛

- ❖ ارائه راهکار جدید جهت اصلاح جمعیت اولیه الگوریتم‌های فراابتکاری با هدف رسیدن به جواب‌های بهتر؛
- ❖ بررسی درصد ترکیب را در میزان اثربخشی الگوریتم بهبودیافته به طوری که بخشی از جمعیت اولیه تصادفی و بخشی از طریق مدل ارائه شده ایجاد گردد و بهترین درصد میزان ترکیب بررسی گردد؛
- ❖ تغییر در ساختار الگوریتم‌های فراابتکاری با هدف رسیدن به جواب‌های بهتر.



## فهرست منابع

- ارشادی، محمدمهدی؛ مؤمنی شریف‌آباد، مهسا؛ ارشادی، محمدجواد؛ عزیزی، امیر؛ بهزادی‌پور، سمانه (۱۴۰۲). مدل‌سازی چندهدفه مسیریابی سبز با استفاده از الگوریتم ترکیبی یادگیری ماشین حداکثری و برنامه‌ریزی ژنتیک. فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین، ۲۵(۸۱)، ۱۷-۴۱.
- بهشتی‌نیا، محمدعلی؛ حسنی بیدگلی، ملیحه (۱۳۹۵). ترکیبی جدید از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر. فصلنامه تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، ۱۳(۴)، ۲۱-۳۷.
- بهشتی‌نیا، محمدعلی؛ قاضی وکیلی، نیلوفر (۱۳۹۴). ارزیابی الگوریتم‌های زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر و مقایسه آن‌ها با الگوریتم ژنتیک دوبخشی. مدل‌سازی در مهندسی، ۱۳(۴۰)، ۱-۱۶.
- حاجی‌بابایی، مریم؛ بهنامیان، جواد (۱۴۰۱). مدل‌سازی و حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف دوهدفه با در نظر گرفتن ماشین‌های موازی و منابع دوگانه انسان - ماشین. فصلنامه چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۲(۳)، ۲۰۳-۲۳۷.
- خاکساری، پریا؛ قندی بیدگلی، سمیه (۱۴۰۲). مدل‌سازی ریاضی و حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه. فصلنامه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۱(۲۳)، ۳۹-۵۵.
- رضایی، فرزانه و پیلهوری، نازنین (۱۴۰۱). مدل ریاضی زنجیره تأمین چندسطحی پایدار با رویکرد الگوریتم فراابتکاری (مطالعه موردی: کارخانجات اتمسفر واحد سازه‌های نیروگاهی). تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۷(شماره ویژه)، ۱-۱۷.
- روح‌بخش، روجا؛ مهدی زاده، اسماعیل؛ ادیبی، محمدامین (۱۴۰۲). ارائه مدلی برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی مختلط با جریان کالا و در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی و زمان حمل‌ونقل. فصلنامه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۸(۲)، ۳۰۷-۳۳۲.
- روحی‌سرا، مریم؛ طاهری‌نیا، مسعود؛ زلفی، حسن؛ سرلک، احمد. (۱۴۰۲). ارائه مدل پیش‌بینی بحران مالی بازار سرمایه ایران با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی. فصلنامه پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری، ۸(۳)، ۱۰۴-۱۳۱.

- شاملو، زهرا؛ کشاورز، طاها (۱۴۰۳). ارائه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای مسئله دسته‌بندی سفارشات و مسیریابی جمع‌کننده در انبارهای یک و چند راهرو متقاطع. فصلنامه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، انتشار آنلاین از تاریخ ۲۰ تیر ۱۴۰۳.
- شجاعی برجویی، بیژن؛ شایان‌نیا، سید احمد؛ لطفی، محمدرضا و رضائیان زیدی، جواد. (۱۳۹۹). زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر جغرافیایی- منطقه‌ای پایدار احتمالی با استفاده از مدل ریاضی الگوریتم تلفیقی فراابتکاری. فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۱۰(۴۱)، ۱۵۹-۱۸۶.
- شمایی، نادر؛ ترکاشوند، محسن؛ بیگدلی، حمید (۱۴۰۲). مسئله زمان‌بندی و تخصیص جریان کارگاهی در اورهال تجهیزات. فصلنامه پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، ۱۴(۲)، ۱-۲۴.
- شهبازی، صادق؛ وحیدی، حسین (۱۴۰۳). بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی مسئله تعیین تعداد بهینه ماشین‌آلات در مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی در شرایط محدودیت بودجه و فضا. فصلنامه پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، انتشار آنلاین از تاریخ ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۳.
- صوفی، پرهام؛ یزدانی، مهدی؛ امیری، مقصود؛ ادیبی، محمدامین (۱۴۰۲). مدل‌سازی و حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف تحت محدودیت منابع دوگانه انسان و ماشین با در نظر گرفتن خرابی ماشین‌آلات. فصلنامه تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۸(۱)، ۱۵۳-۱۷۵.
- کازرونی، حسن؛ طباطبایی، سیدمرتضی؛ رضائی، حمیدرضا؛ یمینی، سید محمد حنیف (۱۴۰۳). احصاء فرمول محاسبه تاب‌آوری در زنجیره تأمین دفاعی. فصلنامه آماد و فناوری دفاعی، ۷(۲)، ۱۱-۴۶.
- نیکوئی، محمدعلی؛ امیری، مقصود؛ خاتمی فیروزآبادی، سید محمدعلی؛ یزدانی، مهدی. (۱۴۰۳). زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با سیاست رد کارها و تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه. فصلنامه چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۲)، ۱۵۴-۱۸۰.
- یزدانی، مهدی؛ زندیه، مصطفی؛ توکلی مقدم، رضا (۱۳۹۳). یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با منابع دوگانه محدود انسان و ماشین. فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۱۲(۳۳)، ۴۳-۷۴.



## References

- Abreu, L. R., Tavares-Neto, R. F., & Nagano, M. S. (2021). A new efficient biased random key genetic algorithm for open shop scheduling with routing by capacitated single vehicle and makespan minimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104, 104373.
- Ahmadian, M. M., Salehipour, A., & Cheng, T. C. E. (2021). A meta-heuristic to solve the just-in-time job-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 288(1), 14-29.
- An, Y., Chen, X., Li, Y., Han, Y., Zhang, J., & Shi, H. (2021). An improved non-dominated sorting biogeography-based optimization algorithm for the (hybrid) multi-objective flexible job-shop scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 99, 106869.
- Baker, K. R. (1974). Scheduling full-time and part-time staff to meet cyclic requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 25(1), 65-76.
- Banharnsakun, A., Sirinaovakul, B., & Achalakul, T. (2012). Job shop scheduling with the best-so-far ABC. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(3), 583-593.
- Bissoli, D. C., Zufferey, N., & Amaral, A. R. (2021). Lexicographic optimization-based clustering search metaheuristic for the multiobjective flexible job shop scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, 28(5), 2733-2758.
- Brucker, P., & Schlie, R. (1990). Job-shop scheduling with multipurpose machines. *Computing*.
- Cáceres-Gelvez, S., Arango-Serna, M. D., & Zapata-Cortes, J. A. (2024). Optimising production scheduling decisions in flowshop manufacturing cells for a sportswear manufacturing case. *International Journal of Advanced Operations Management*, 15(4), 324-348.
- Defersha, F. M., & Movahed, S. B. (2018). Linear programming assisted (not embedded) genetic algorithm for flexible jobshop scheduling with lot streaming. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 319-335.
- Denkena, B., Schinkel, F., Pirnay, J., & Wilmsmeier, S. (2021). Quantum algorithms for process parallel flexible job shop scheduling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 100-114.
- Ding, H., & Gu, X. (2020b). Hybrid of human learning optimization algorithm and particle swarm optimization algorithm with scheduling strategies for the flexible job-shop scheduling problem. *Neurocomputing*, 414, 313-332.
- Ding, H., & Gu, X. (2020a). Improved particle swarm optimization algorithm based novel encoding and decoding schemes for flexible job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 121, 104951.
- Fan, J., Shen, W., Gao, L., Zhang, C., & Zhang, Z. (2021). A hybrid Jaya algorithm for solving flexible job shop scheduling problem considering multiple critical paths. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 298-311.
- Fathi, M., Khakifirooz, M., Diabat, A., & Chen, H. (2021). An integrated queuing-stochastic optimization hybrid Genetic Algorithm for a location-inventory supply chain network. *International Journal of Production Economics*, 237, 108139.

- Gangraj, E. A., & Nahavandi, N. (2014). A metaheuristic approach for batch sizing and scheduling problem in flexible flow shop with unrelated parallel machines. *International Journal of Computer Applications*, 97(6), 31-36.
- Kaya, S., Gümüşçü, A., Aydılek, I. B., Karacizmeli, I. H., & Tenekeci, M. E. (2021). Solution for flow shop scheduling problems using chaotic hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm with improved local search. *Soft Computing*, 25(10), 7143-7154.
- Kumari, M., De, P. K., Narang, P., & Shah, N. H. (2023). Integrated optimization of inventory, replenishment, and vehicle routing for a sustainable supply chain utilizing a novel hybrid algorithm with carbon emission regulation. *Expert Systems with Applications*, 220, 119667.
- Konovalenko, I., & Ludwig, A. (2022). Generating decision support for alarm processing in cold supply chains using a hybrid k-NN algorithm. *Expert Systems with Applications*, 190, 116208.
- Kundakcı, N., & Kulak, O. (2016). Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 31-51.
- Li, K., Deng, Q., Zhang, L., Fan, Q., Gong, G., & Ding, S. (2021b). An effective MCTS-based algorithm for minimizing makespan in dynamic flexible job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 155, 107211.
- Li, X., & Gao, L. (2016). An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 174, 93-110.
- Li, Y., Wang, C., Gao, L., Song, Y., & Li, X. (2021a). An improved simulated annealing algorithm based on residual network for permutation flow shop scheduling. *Complex & Intelligent Systems*, 7, 1173-1183.
- Li, X., Peng, Z., Du, B., Guo, J., Xu, W., & Zhuang, K. (2017). Hybrid artificial bee colony algorithm with a rescheduling strategy for solving flexible job shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 10-26.
- Li, Y., Liao, C., Wang, L., Xiao, Y., Cao, Y., & Guo, S. (2023). A reinforcement learning-artificial bee colony algorithm for flexible job-shop scheduling problem with lot streaming. *Applied Soft Computing*, 146, 110658.
- Liu, Z., Wang, J., Zhang, C., Chu, H., Ding, G., & Zhang, L. (2021). A hybrid genetic-particle swarm algorithm based on multilevel neighbourhood structure for flexible job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 135, 105431.
- Luo, X., Qian, Q., & Fu, Y. F. (2020). Improved genetic algorithm for solving flexible job shop scheduling problem. *Procedia Computer Science*, 166, 480-485.
- Marichelvam, M. K., & Geetha, M. (2021). An Improved Monkey Search Algorithm to Solve the Flexible Job Shop Scheduling Problems With Makespan Objective. In *Encyclopedia of Organizational Knowledge, Administration, and Technology* (pp. 728-741). IGI Global.
- Mohammadi, G. (2015). Multi-objective flow shop production scheduling via robust genetic algorithms optimization technique. *International Journal of Service Science, Management and Engineering*, 2(1), 1-8.
- Pezzella, F., Morganti, G., & Ciaschetti, G. (2008). A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Computers & operations research*, 35(10), 3202-3212.



- Rolf, B., Jackson, I., Müller, M., Lang, S., Reggelin, T., & Ivanov, D. (2023). A review on reinforcement learning algorithms and applications in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 61(20), 7151-7179.
- Salehi, A., & Masoumi, B. (2020b). KATZ centrality with biogeography-based optimization for influence maximization problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, 40, 205-226.
- Salehi, A., & Masoumi, B. (2020a). Solving traveling salesman problem based on biogeography-based optimization and edge assembly cross-over. *Journal of AI and Data Mining*, 8(3), 313-329.
- Serna, N. J. E., Seck-Tuoh-Mora, J. C., Medina-Marin, J., Hernandez-Romero, N., Barragan-Vite, I., & Armenta, J. R. C. (2021). A global-local neighborhood search algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem. *PeerJ Computer Science*, 7, e574.
- Singh, M. R., & Mahapatra, S. S. (2016). A quantum behaved particle swarm optimization for flexible job shop scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 93, 36-44.
- Tang, J., Gong, G., Peng, N., Zhu, K., Huang, D., & Luo, Q. (2024). An effective memetic algorithm for distributed flexible job shop scheduling problem considering integrated sequencing flexibility. *Expert Systems with Applications*, 242, 122734.
- Yuan, M., Huang, H., Li, Z., Zhang, C., Pei, F., & Gu, W. (2023). A multi-agent double deep-Q-network based on state machine and event stream for flexible job shop scheduling problem. *Advanced Engineering Informatics*, 58, 102230.
- Xie, J., Li, X., Gao, L., & Gui, L. (2022). A hybrid algorithm with a new neighborhood structure for job shop scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108205.

