

Integrated Scheduling of Multi-Stage Production System and Transportation in the Supply Chain by Considering the Sequence Dependent Setup Time

Naeeme Bagheri Rad^{*}, Parvaneh Samouei^{}**

Abstract

In this research, an integrated scheduling problem of job shop systems with an assembly stage and transportation to minimize the total tardiness time is studied. In this problem, the parts are processed in a job shop system and then assembled in the assembly stage. Ultimately, the products are shipped in packages to customers. Setup time is assumed to depend on sequence. At first, a mixed-integer linear model is developed. Since the problem is NP-hard, a hybrid imperialist competitive and simulated annealing (ICA-SA) algorithm is proposed to solve the problems with the medium and large sizes. To validate the performance of the proposed algorithm, results are compared to an imperialist competitive algorithm and a hybrid imperialist competitive and tabu search (ICA-TS) algorithm. Analysis of variance random block design is used to compare the results of the algorithms. P-values of algorithms and blocks in this test are smaller than the significance level of 0.05. The computational results show that the proposed hybrid algorithm achieves better performance than the imperialist competitive algorithm and hybrid imperialist competitive and tabu search.

Keywords: Integrated Scheduling; Job shop; Sequence-Dependent Set up Time; Imperialist Competitive Algorithm; Simulated Annealing.

Received: Apr. 23, 2020; Accepted: Aug. 02, 2021.

^{*} PhD student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

^{**} Assistant professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran (Corresponding Author).

Email: p.samouei@basu.ac.ir

زمان بندی یکپارچه سیستم تولید چندمرحله‌ای و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی

نعیمه باقری راد*، پروانه سموئی**

چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله زمان‌بندی یکپارچه سیستم تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ و حمل‌ونقل با هدف کمینه‌کردن مجموع تأخیرها بررسی شده است. در این مسئله اجزای محصولات در مرحله تولید کارگاهی پردازش شده و در مرحله مونتاژ با یکدیگر مونتاژ می‌شوند؛ سپس محصولات در بسته‌هایی به سمت مشتریان حمل می‌شوند. در این سیستم تولیدی، زمان آماده‌سازی وابسته به توالی فرض شده است. ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط توسعه داده شده است؛ سپس با توجه به اینکه مسئله موردبررسی NP-hard است، الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسائل در ابعاد متوسط و بزرگ پیشنهاد شده است. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده با الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری و جست‌وجوی ممنوع مقایسه شده است. برای مقایسه نتایج بین الگوریتم‌ها از تحلیل واریانس طرح بلوکی تصادفی بهره‌گیری شد. مقادیر P-value الگوریتم‌ها و بلوک‌ها در این آزمون کمتر از سطح معناداری ۰/۰۵ به‌دست آمد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ترکیبی رقابت استعماری و جست‌وجوی ممنوع دارد.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی یکپارچه؛ تولید کارگاهی؛ زمان آماده‌سازی وابسته به توالی؛
الگوریتم رقابت استعماری؛ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱.

* دانشجوی دکتری، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

** استادیار، دپارتمان مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (نویسنده مسئول).

Email: p.samouei@basu.ac.ir

۱. مقدمه

زنجیره تأمین شامل تمام مراحل است که در یک محصول ارزش افزوده ایجاد می‌کند. اهمیت یکپارچه‌سازی و همگام‌سازی جریان مواد و اطلاعات در یک سیستم زنجیره تأمین سبب ایجاد تمایل بسیار بالای صاحبان صنعت و پژوهشگران به این حوزه شده است. زمان‌بندی جریان مواد بین بخش‌های مختلف جزو مهم‌ترین مباحث کنترل موجودی و مدیریت زنجیره تأمین است. با افزایش رقابت در دنیای کسب‌وکار و ظهور و توسعه فناوری‌های نوین، بسیاری از شرکت‌ها به سوی یکپارچگی روی آورده‌اند. نیاز به انعطاف‌پذیری، کاهش هزینه‌ها و برقراری ارتباطات نزدیک و گسترده بین تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان، شرکت‌ها را بر آن داشته است که برای بقا و فعالیت در محیط رقابتی و کاملاً متغیر امروز با یکپارچه‌سازی سیستم و سازمان خود، به کسب مزیت رقابتی بپردازند [۷].

امروزه صنایع تولیدی با چالش‌های بزرگی، از جمله افزایش رقابت جهانی، تغییرات پویای بازار، چرخه‌های کوتاه عمر محصولات و موجودی‌های کم مواجه شده‌اند؛ بنابراین برای داشتن یک سیستم ایده‌آل با عملکرد مناسب، ضروری به نظر می‌رسد که زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل به‌منظور پاسخگویی سریع‌تر به تقاضای مشتریان به‌صورت یکپارچه مورد مطالعه قرار گیرد. به عبارت دیگر زمان‌بندی تولید را نمی‌توان جدا از زمان‌بندی حمل‌ونقل در نظر گرفت؛ چراکه یک راه‌حل هماهنگ می‌تواند عملکرد کل زنجیره تأمین را بهبود بخشد.

در این پژوهش، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی بررسی می‌شود. این مسئله دارای دو فاز است. فاز اول شامل تولیدکننده‌ای است که دارای سیستم تولید دومارحله‌ای است. فاز دوم شامل ناوگان حمل‌ونقل کالاها است. در این فاز کالاها به‌صورت دسته‌بندی شده به دست مشتریان می‌رسد. این مسئله کاربرد زیادی در صنایع تولیدی، مانند صنایع تولید لوازم‌خانگی و صنایع تولید لوازم‌التحریر دارد. در این سیستم‌های تولیدی، ابتدا قطعات مورد نیاز هر محصول (کار) در مرحله اول در یک سیستم تولید کارگاهی پردازش شده و سپس قطعات در مرحله دوم که یک ایستگاه موتناژ است، موتناژ می‌شوند. در پایان محصولات تکمیل شده در بسته‌هایی به سمت مشتریان حمل می‌شود.

با توجه به بررسی‌نشدن این موضوع در مبانی نظری، هدف در این پژوهش توسعه یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط و پیشنهاد یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های رقابت استعماری و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله است.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه مسئله بررسی می‌شود. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش شامل تعریف مسئله مورد بررسی، مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم، مدل ریاضی مسئله، الگوریتم پیشنهادی و ساختار آن شرح داده می‌شود. در

بخش چهارم، آزمایش‌های عددی و ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارائه خواهد شد. نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی نیز در بخش پنج ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مبانی نظری مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین در دو بخش زمان‌بندی یکپارچه تولید و حمل‌ونقل و زمان‌بندی دومرحله‌ای بررسی شده است.

زمان‌بندی یکپارچه تولید و حمل‌ونقل. مطالعه در زمینه بهینه‌سازی زنجیره تأمین و مسائل زمان‌بندی یکپارچه تولید و حمل‌ونقل^۱ (IPTS) توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در ادامه برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر بررسی شده است. پاتس^۲ (۱۹۸۰)، هال و شمویس^۳ (۱۹۹۲) و ویجینر^۴ (۱۹۹۸، ۱۹۹۴)، مدلی را که در آن مجموعه‌ای از کارها ابتدا در یک مرکز تولید، پردازش شده و سپس به مشتریان تحویل داده می‌شوند را مورد مطالعه قرار دادند [۳۰، ۱۹، ۴۰، ۴۱]. هدف در این پژوهش‌ها بهینه‌کردن خدمات مشتریان است و همچنین فرض شده است که وسایل حمل‌ونقل کافی برای تحویل به مشتریان وجود دارد. چانگ و لی^۵ (۲۰۰۴)، سه سناریوی مختلف برای مسئله زمان‌بندی و عملیات تحویل که با هم انجام می‌شوند را معرفی کردند. در این پژوهش هر کار بر روی یک ماشین پردازش شده و سپس توسط یک وسیله حمل‌ونقل به منطقه مشتریان (شامل تعدادی مشتری است) تحویل داده می‌شود. آن‌ها همچنین برای هر سناریو یک رویکرد ابتکاری و یک قضیه برای اثبات NP-hard بودن آن‌ها پیشنهاد کردند [۴]. چن و وایراکتاراکیس^۶ (۲۰۰۵)، یک مدل زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع را بررسی کردند. در این مدل، مجموعه‌ای از کارها (برای مثال، سفارش مشتریان) در ابتدا در یک مرکز پردازش (تک‌ماشین یا ماشین‌های موازی)، پردازش می‌شوند و سپس به‌طور مستقیم بدون موجودی متوسط به مشتریان عرضه می‌شود. هدف این مسئله این است که هر دو سطح خدمات مشتری و هزینه توزیع کل بهینه شود [۵]. لی و وایراکتاراکیس^۷ (۲۰۰۷)، یک مدل ریاضی برای مسئله یکپارچه‌سازی تولید و توزیع کارها توسعه دادند [۲۶]. در این مسئله هر کار از دو عملیات تشکیل شده است که هر یک باید توسط یک ماشین اختصاصی پردازش شود. پس از اتمام هر دو عملیات، کار آماده تحویل است.

1. Integrated production and transportation scheduling (IPTS)

2. Potts

3. Hall & Shmoys

4. Woeginger

5. Chang & Lee

6. Chen & Vairaktarakis

7. Li & Vairaktarakis

آرمسترانگ و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، مسئله تولید و توزیع با موجودی صفر را با فرض اینکه توالی مشتریان در هر بار ملاقات ثابت است، بررسی کردند. نرخ تولید مرکز تولید و ظرفیت وسیله نقلیه محدود و محصول دارای عمر کوتاه است. هدف این مسئله حداکثر کردن تعداد کل تقاضای برآورده شده است؛ همچنین آن‌ها یک الگوریتم شاخه و کران برای حل مسئله را توسعه دادند و یک حد پایین برای راه‌حل‌های بهینه ارائه کردند [۲]. هدف مسئله مورد مطالعه گیسمر و همکاران^۲ (۲۰۰۸)، تعیین حداقل زمان مورد نیاز برای تولید و تحویل محصولات به مشتریان واقع در مناطق مختلف جغرافیایی بود. آن‌ها همچنین چند حد پایین برای راه‌حل‌های بهینه پیشنهاد کردند و یک رویکرد ابتکاری دومرحله‌ای را توسعه دادند. آن‌ها در مرحله اول از الگوریتم ژنتیک^۳ یا ممتیک، برای انتخاب جایگشت بهینه محلی مجموعه‌ای از مشتریان، و در مرحله دوم از الگوریتم گیلومر-گومری^۴ برای سفارش‌های زیرتوالی مشتریان استفاده کردند [۱۷]. فراهانی و همکاران^۵ (۲۰۱۲)، مسئله یکپارچه تولید و توزیع برای محصولات غذایی فسادپذیر را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۶ برای حل مسئله زمان‌بندی تولید که «برنامه‌ریزی بلوکی» نامیده می‌شود را توسعه دادند؛ سپس یک الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ را برای حل مسئله توزیع پیشنهاد کردند [۱۱]. اولریچ^۷ (۲۰۱۲)، مسئله‌ای را مورد مطالعه قرار داد که در آن کارها بر روی ماشین‌های موازی در سیستم تولید جریان کارگاهی با زمان آماده‌سازی پردازش می‌شوند و سپس با وسایل نقلیه همگن با توجه به ظرفیت و زمان آماده‌سازی‌شان به مراحل بعدی و مکان‌های مشتریان منتقل می‌شوند. هدف مسئله کمینه‌کردن زمان تکمیل کارها در مرحله آخر بود. وی برای حل مسئله چندین سناریو را پیشنهاد کرد [۳۵]. کاندتا و همکاران^۸ (۲۰۱۳)، مسئله یکپارچه تولید و حمل‌ونقل را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل MILP و یک حد پایین برای مسئله مورد مطالعه پیشنهاد دادند. هدف این مسئله کمینه‌کردن حداکثر دیرکردها بود. آن‌ها همچنین یک الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوع^۹ برای حل مرحله تولید ارائه کردند [۸].

کشتلی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۴)، مسئله یکپارچه تعیین زمان‌بندی تولید و خطوط حمل‌ونقل ریلی برای بهینه‌سازی خدمات به مشتریان با هدف کمینه‌کردن هزینه کل را بررسی کردند. آن‌ها

-
1. Armstrong et al
 2. Geismar et al
 3. Genetic algorithm(GA)
 4. Gilmore-Gomory
 5. Farahani et al
 6. Mixed Integer Linear Programming(MILP)
 7. Ullrich
 8. Condotta et al
 9. Tabu Search(TS)
 10. Keshteli et al

برای حل مسئله، الگوریتم‌های ژنتیک و کشتل را پیشنهاد کردند [۲۰]. لی و همکاران^۱ (۲۰۱۴)، مسئله تولید و توزیع مواد رادیواکتیو مورد استفاده در درمان‌های مختلف پزشکی را بررسی کردند. آن‌ها یک مدل MILP با هدف کمینه‌کردن هزینه کل را توسعه دادند. آن‌ها برای حل مسئله، الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر بزرگ را نیز پیشنهاد کردند [۲۵]. لو و همکاران^۲ (۲۰۱۴)، مسئله زمان‌بندی تولید و تحویل با ناوگان همگن را مورد بررسی قرار دادند. این مسئله شامل تعیین توالی تولید در مرکز توزیع، تخصیص وسیله حمل‌ونقل همگن به خرده‌فروشان و پیدا کردن توالی ملاقات‌ها در هر سفر با پنجره زمانی خرده‌فروشان است. آن‌ها برای حل مسئله، دو الگوریتم ژنتیک تطبیقی را نیز پیشنهاد کردند [۲۷]. ویرگاتز و کنوست^۳ (۲۰۱۴)، مسئله مطرح‌شده توسط آرمسترانگ و همکاران^۴ (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن تأخیر در شروع تولید و تعیین توالی متغیرهای تولید و توزیع را توسعه دادند. یکی دیگر از اهداف این پژوهش، اصلاح الگوریتم شاخه و کران ارائه‌شده توسط آرمسترانگ و همکاران بود. آن‌ها همچنین چند الگوریتم فراابتکاری را پیشنهاد کردند [۳۷]. وانگ و همکاران^۵ (۲۰۱۶)، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در محیط جریان کارگاهی مونتاژ را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به Np-hard بودن مسئله زمان‌بندی، دو رویکرد ابتکاری و یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای کمینه‌کردن مجموع وزنی میانگین زمان رسیدن محصول به مشتری و هزینه کل تحویل پیشنهاد کردند [۳۹]. کانگ و همکاران^۶ (۲۰۱۵)، مسئله یکپارچه تولید و حمل‌ونقل را در صنایع نیمه‌هادی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک مدل MILP با هدف کمینه‌کردن مجموع هزینه‌ها (تولید و حمل‌ونقل) توسعه دادند و برای حل مسئله، یک الگوریتم ژنتیک کارا را پیشنهاد کردند [۲۲]. فرازون و همکاران^۷ (۲۰۱۸)، یک رویکرد ترکیبی برای مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و حمل‌ونقل در حالت چندمحصولی و چنددوره‌ای پیشنهاد کردند. رویکرد پیشنهادی ترکیبی از برنامه‌ریزی خطی و شبیه‌سازی رخدادهای گسسته و یک الگوریتم ژنتیک است [۱۵]. تانیمیزو و همکاران^۸ (۲۰۱۶)، یک مدل ریاضی با اهداف کمینه‌کردن مجموع وزنی دیر کردها و کمینه‌کردن کربن منتشرشده از وسایل حمل‌ونقل برای مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره‌های کم‌کربن پیشنهاد کردند. سیستم تولیدی در نظر گرفته‌شده در این مسئله تولید کارگاهی است. آن‌ها همچنین از الگوریتم ژنتیک و قانون‌های ابتکاری برای حل مسئله زمان‌بندی تولید و از روش جست‌وجوی پرتو برای حل مسئله زمان‌بندی حمل‌ونقل استفاده کردند

-
1. Lee et al
 2. Low et al
 3. Viergutz and Knust
 4. Armstrong et al
 5. Wang et al
 6. Kang et al
 7. Frazzona et al
 8. Tanimizu et al

[۳۳]. جیا و همکاران^۱ (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مسئله با هدف کمینه‌کردن مجموع وزنی موعد تحویل کارها را توسعه دادند. در این مسئله فرض شده است که ماشین‌ها به صورت موازی و وسایل نقلیه چندگانه هستند. آن‌ها برای حل مسئله از یک رویکرد ابتکاری قطعی و دو رویکرد ترکیبی مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان استفاده کردند [۲۱]. فونتس و همایونی^۲ (۲۰۱۹) نیز این مسئله را با در نظر گرفتن سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر و داشتن تعداد محدودی از وسایل نقلیه خودکار مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جدید با هدف کمینه‌کردن دوره‌ساخت پیشنهاد کردند [۱۴].

زمان‌بندی دومرحله‌ای. در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زمان‌بندی صرفاً به یک مرحله از تولید به صورت جداگانه پرداخته شده و با توجه به معیاری مشخص، بهترین زمان‌بندی برای انجام کارها در آن مرحله خاص ارائه شده است. حال آنکه بیشتر صنایع تولیدی به صورت ترکیبی و چندمرحله‌ای کار می‌کنند که بر اساس آن، قطعات طی مراحل اول پردازش می‌شوند و در مرحله پایانی با مونتاژ قطعات، محصول نهایی شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه در بیشتر صنایع تولیدی خطوط مونتاژی جهت‌برای تولید محصول نهایی بعد از مرحله تولید قطعات وجود دارد، سیستم تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ در این پژوهش مدنظر است. در بررسی‌های به عمل آمده در خصوص سیستم‌های تولید کارگاهی با عملیات مونتاژ پژوهش‌های معدودی یافت شد. نخستین پژوهش که به یک مسئله زمان‌بندی تولید دومرحله‌ای پرداخته است به بیشتر از ۲۰ سال قبل برمی‌گردد. این پژوهش توسط لی و همکاران^۳ (۱۹۹۳)، انجام شد [۲۴]. بعد از این پژوهش و با توجه به اهمیت این نوع مسائل زمان‌بندی و کاربردهای فراوان آن در صنایع تولیدی، پژوهشگران و نظریه‌پردازان حوزه زمان‌بندی توجه زیادی به این نوع مسائل نشان دادند. چنگ^۴ (۱۹۹۰)، جریان مواد در یک محیط تولید کارگاهی با عملیات مونتاژ را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. وی یک روش تقریبی به منظور برآورد انحراف استاندارد و میانگین زمان‌های جریان کار در محیط تولید کارگاهی پویا با عملیات مونتاژ ارائه کرد [۶]. ژانگ^۵ (۲۰۱۱)، شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم GA برای زمان‌بندی تولید کارگاهی با عملیات مونتاژ با هدف کمینه‌سازی مجموع حداکثر زمان تکمیل و نرخ تحویل به موقع را بررسی کرد [۴۲]. دیمایتی^۶ (۲۰۰۷) به بررسی مسئله تولید کارگاهی همراه با یک مرحله مونتاژ در سیستم‌های ساخت برای سفارش پرداخت. وی یک الگوریتم ابتکاری برای به دست آوردن جواب بهینه و نزدیک به بهینه برای مدل

1. Tanimizu et al

2. Fontes & Homayouni

3. Lee et al

4. Cheng

5. Zhang

6. Dimiyati

پیشنهاد داد [۱۰]. دانش‌آموز و همکاران^۱ (۲۰۱۵)، مسئله تولید کارگاهی را همراه با یک مرحله مونتاژ موازی با هدف حداقل کردن زمان ساخت بررسی کردند. آن‌ها دو الگوریتم فراابتکاری GA و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ را برای حل مسئله مورد مطالعه پیشنهاد دادند [۹].

برای داشتن یک زنجیره تأمین هماهنگ با عملکرد مناسب، مفید به نظر می‌رسد که زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل به‌منظور رضایت مشتریان به‌صورت یکپارچه مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این زمینه، بیشتر پژوهش‌ها تنها یک محصول را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در صورتی که ممکن است سیستم تولیدی در دنیای واقعی به‌طور هم‌زمان چندین نوع محصول را تولید کنند؛ بنابراین به‌منظور نزدیکی به دنیای واقعی می‌توان سیستم تولیدی را در نظر گرفت که چند نوع محصول را تولید می‌کند؛ همچنین می‌توان برای نزدیک شدن به دنیای واقعی، سیستم تولیدی در زنجیره تأمین را دومرحله‌ای در نظر گرفت. بر اساس مرور مباحث نظری، این سیستم تولیدی در مسئله یکپارچه‌سازی زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل مورد مطالعه قرار نگرفته است. خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه IPTS و جایگاه پژوهش حاضر در جدول ۱، آورده شده است. با توجه این جدول، انواع مختلف سیستم تولیدی در پژوهش‌های مختلف بررسی شده است. با توجه به اینکه سیستم تولید کارگاهی دومرحله‌ای در پژوهش‌ها استفاده نشده است، در این پژوهش سیستم تولید کارگاهی با عملیات مونتاژ به دلیل اهمیت آن مورد بررسی قرار گرفت. در ستون آخر جدول ۱، نیز نشان داده شده است که در تعداد معدودی از پژوهش‌ها از روش‌های فراابتکاری ترکیبی استفاده شده است؛ بنابراین در این پژوهش برای حل مسئله مورد بررسی، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی پیشنهاد می‌شود.

جدول ۱. خلاصه‌ای از برخی پژوهش‌های IPTS

پژوهش	سطوح یکپارچگی در زنجیره تأمین		سیستم تولیدی	مدل ریاضی	هدف	روش حل
	توزیع‌کننده و خرده‌فروش	تولیدکننده و مشتری				
چانگ و لی، [۴] (۲۰۰۴)	-	*	تک‌ماشین	*	کمینه کردن زمان تحویل و زمان اتمام کارها	رویکرد ابتکاری
چن و وایراکتاراکیس، [۵] (۲۰۰۵)	-	*	تک‌ماشین / ماشین‌های موازی	*	کمینه کردن هزینه	الگوریتم-های دقیق و ابتکاری
لی و وایراکتاراکیس، [۲۶] (۲۰۰۷)	-	*	دو ماشین مختلف	*	کمینه کردن هزینه تحویل و انتظار مشتریان	طرح تقریبی با زمان

1. Daneshamooz et al

2. Particle Swarm Optimization(PSO)

پژوهش	سطوح یکپارچگی در زنجیره تأمین		مدل ریاضی	سیستم تولیدی	هدف	روش حل
	تولیدکننده و مشتری	توزیع‌کننده و خرده‌فروش				
چندجمله‌ای						
آرمسترانگ و همکاران، (۲۰۰۸) [۲]	-	*	*	تک‌ماشین	حداکثر کردن تقاضای برآورده شده	الگوریتم دقیق شاخه و کران
گیسمر و همکاران، (۲۰۰۸) [۱۷]	-	*	*	تک‌ماشین	حداقل زمان موردنیاز برای تولید و تحویل	الگوریتم فراابتکاری ترکیبی
فراهانی و همکاران، (۲۰۱۲) [۱۱]	-	*	*	موازی	کمینه کردن مجموع وزنی هزینه‌های آماده‌سازی، فسادپذیری و حمل‌ونقل	رویکرد دقیق/ابتکاری
اولریچ (۲۰۱۲)، [۳۵]	-	*	*	جریان کارگاهی ترکیبی	کمینه کردن زمان تکمیل کارها	ابتکاری
کاندتا و همکاران، (۲۰۱۳) [۸]	-	*	*	تک ماشین	کمینه کردن حداکثر زمان دیر کردها	رویکرد دقیق/جست‌وجوی ممنوع
کشتلی و همکاران (۲۰۱۴)، [۲۰]	-	*	*	تک ماشین	کمینه کردن هزینه کل	الگوریتم ژنتیک و کشتل
لی و همکاران، (۲۰۱۴) [۲۵]	-	*	*	موازی	کمینه کردن هزینه کل	الگوریتم جست‌وجوی همسایگی متغیر بزرگ
لو و همکاران، (۲۰۱۴) [۲۷]	*	-	*	ماشین تک	کمینه کردن هزینه‌ها	الگوریتم ژنتیک تطبیقی
ویرگاتز و کنوست، (۲۰۱۴) [۳۷]	-	*	*	تک‌ماشین	حداکثر کردن تقاضای برآورده‌شده	الگوریتم شاخه و کران/ابتکاری
وانگ و همکاران،	-	*	*	جریان	کمینه کردن	دو رویکرد

روش حل	هدف	مدل ریاضی	سیستم تولیدی	سطوح یکپارچگی در زنجیره تأمین		پژوهش
				تولیدکننده و مشتری	توزیع‌کننده و خرده‌فروش	
ابتکاری و یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی	مجموع وزنی میانگین زمان رسیدن محصول به مشتری و هزینه کل تحویل		کارگاهی مونتاز			(۲۰۱۶) [۳۹]
	کمینه کردن هزینه-ها	*	-	مرکز برون‌سپاری و تولید (چندمحصولی)	-	کانگ و همکاران، (۲۰۱۵) [۲۲]
رویکرد ترکیبی	کمینه کردن مجموع هزینه‌ها	*	موازی	(چندمحصولی - چنددوره-ای)	-	فرازون و همکاران، (۲۰۱۸) [۱۵]
رویکرد ترکیبی	کمینه کردن مجموع وزنی دیرکردها و کمینه کردن کربن منتشرشده از وسایل حمل‌ونقل	*	تولید کارگاهی	*	-	تانیمیزیو و همکاران، (۲۰۱۶) [۳۳]
یک رویکرد قطعی / دو رویکرد ترکیبی	کمینه کردن مجموع وزنی موعدهای تحویل	*	ماشین‌های دسته‌ای موازی	*	-	جیا و همکاران، (۲۰۱۹) [۲۱]
مدل ریاضی	کمینه کردن دوره ساخت	*	سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر	*	-	فونتس و همایونی (۲۰۱۹)، [۱۴]
رویکرد فراابتکاری ترکیبی	کمینه کردن مجموع تأخیرها	*	تولید کارگاهی با عملیات مونتاز	*	-	پژوهش حاضر

با توجه به پژوهش‌های معدودی که در زمینه تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاز وجود دارد، در ادامه برخی از روش‌های حل مسائل دومرحله‌ای بررسی شده است. دانش‌آموز و همکاران (۲۰۱۵)، برای حل مسئله تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاز موازی دو الگوریتم فراابتکاری GA و بهینه‌سازی ازدحام ذرات را پیشنهاد کردند [۹]. الانزی و الله‌وردی^۱ (۲۰۰۹)، از دو روش

1. Al-Anzi & Allahverdi

ابتکاری مبتنی بر زودترین موعد تحویل^۱ و الگوریتم جانسون به همراه الگوریتم‌های TS، PSO و SDE برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای با چند معیار استفاده کردند [۱]. شکرالله‌پور و همکاران^۲ (۲۰۱۱)، یک الگوریتم رقابت استعماری^۳ برای حل مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای پیشنهاد دادند؛ سپس الگوریتم پیشنهادی را با بهترین الگوریتم پیشنهادشده برای حل این مسئله تاکنون (شبیه‌سازی تبرید^۴) مقایسه کردند [۳۲]. فتاحی و همکاران^۵ (۲۰۱۴)، مسئله جریان کارگاهی ترکیبی با زمان راه‌اندازی و عملیات های مونتاژ را بررسی کردند. آن‌ها یک الگوریتم شاخه و کران سلسله‌مراتبی ارائه دادند [۱۲]. غلامی و همکاران^۶ (۲۰۱۸)، یک الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسئله مونتاژ جریان کارگاهی پیشنهاد کردند [۱۸]. در این مسئله، قطعات در مرحله نخست در یک سیستم جریان کارگاهی تولید و در مرحله دوم، مونتاژ می‌شوند. تراب‌زاده و زندیه^۷ (۲۰۱۰)، مسئله‌ای را بررسی کردند که در آن قطعات در مرحله نخست پردازش شده و در ایستگاه دوم مونتاژ می‌شوند. آن‌ها ضمن اشاره به NP-hard بودن مسئله، از الگوریتم انجماد تدریجی مبتنی بر نظریه توده‌ای^۸ برای حل مسئله بهره گرفتند و نتایج را با نتایج حاصل از الگوریتم SA مقایسه کردند [۳۴]. فتاحی و همکاران^۹ (۲۰۱۹)، الگوریتمی مبتنی بر جست‌وجوی هارمونی را برای مسئله زمان‌بندی چندهدفه تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ پیشنهاد کردند [۱۳].

با توجه به تحلیل‌های بالا می‌توان نتیجه گرفت که در تعداد معدودی از پژوهش‌ها از الگوریتم ICA استفاده شده است که یکی از دلایل آن می‌تواند جدید بودن این روش باشد. به علت وجود مزایایی همچون مفهوم ساده، توانایی بهینه‌سازی توابعی با تعداد متغیرهای بسیار زیاد و همگرایی سریع نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امروزه الگوریتم ICA توجه زیادی را به خود جلب کرده است؛ همچنین در تعداد معدودی از پژوهش‌ها از روش‌های فراابتکاری ترکیبی استفاده شده است؛ بنابراین در این پژوهش برای حل مسئله مورد بررسی، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ICA پیشنهاد می‌شود.

با توجه به جدید بودن مسئله و بررسی نشدن آن در مبانی نظری، یک مدل ریاضی و یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای حل مسئله ارائه شده است؛ به عبارت دیگر نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

-
1. Earliest due date(EDD)
 23. Shokrollahpour et al
 3. Imperialist Competitive Algorithm(ICA)
 4. Simulated Annealing(SA)
 5. Fattahi et al
 6. Gholami et al
 7. Torabzadeh & Zandieh
 8. Cloud theory-based simulated annealing(CSA)
 9. Fattahi et al

- یکپارچه در نظر گرفتن مسئله زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در شرایطی که سیستم تولیدی دومرحله‌ای است؛
- پیشنهاد الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم‌های ICA و شبیه‌سازی تبرید.

۳. روش‌شناسی پژوهش

مسئله مورد بررسی در این پژوهش، مدل‌سازی و تعیین توالی انجام کارها در یک سیستم تولید ترکیبی دومرحله‌ای و تخصیص محصولات نهایی به دسته‌ها برای حمل به سمت مشتریان است. مسئله مورد بررسی شامل دو فاز است، فاز تولید و فاز حمل‌ونقل. فاز تولید نیز شامل دو مرحله است. مرحله نخست مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی است که به صورت زمان‌بندی J قطعه $J_{1p}, J_{2p}, \dots, J_{np}$ از P محصول P_1, P_2, \dots, P_p روی مجموعه M از ماشین‌ها است که شامل m ماشین M_1, M_2, \dots, M_m است. در این حالت هر قطعه دارای h_j عملیات است که باید به ترتیب انجام شوند. اندیس j نشان‌دهنده قطعه، اندیس h نشان‌دهنده عملیات و اندیس i نشان‌دهنده ماشین است؛ همچنین عملیات h از قطعه j از محصول p با نماد $(j=1, \dots, n, h=1, \dots, h_j, p=1, \dots, P)$ نشان داده می‌شود. انجام هر عملیات $O_{j,p,h}$ توسط ماشین i به زمان پردازش $PS_{i,j,p,h}$ نیاز دارد. زمان راه‌اندازی معمولاً به کاری که باید تنظیم شود، وابسته است و یا این زمان علاوه بر کار مطرح شده، به کاری که بلافاصله قبل از آن پردازش شده، وابسته است. مورد نخست با عنوان «توالی‌های مستقل»^۱ و مورد دوم با عنوان «توالی‌های وابسته»^۲ شناخته می‌شود. در این بخش فرض شده است که زمان راه‌اندازی به عملیات قبلی ماشین وابسته باشد. در این حالت میزان زمان راه‌اندازی ماشین برای عملیات جدید به عملیات پیشین آن ماشین بستگی دارد. فرض شده است که عملیات $O_{j',p',h'}$ بلافاصله بعد از عملیات $O_{j,p,h}$ انجام می‌شود؛ بنابراین زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی عملیات $O_{j',p',h'}$ ، $S_{i,j,p,h,j',p',h'}$ در نظر گرفته شده است. در مدل ارائه شده فرض شده که $S_{i,j,p,h,j',p',h'} = S_{i,j,p,j',p'}$ است. مرحله دوم، مسئله زمان‌بندی موتناژ است که به صورت زمان‌بندی P محصول با زمان موتناژ A_p روی ماشین موتناژ تعریف می‌شود. برای کاهش هزینه‌های تحویل در فاز حمل‌ونقل، محصولات نهایی دسته‌بندی شده و به مشتری تحویل داده می‌شود. از آنجاکه هر دسته شامل حداقل یک محصول است، تعداد دسته‌ها نباید بزرگ‌تر از P باشد.

1. Sequence-independent
2. Sequence-dependent

پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله**پارامترها:** P, P' : تعداد کل کارها (محصولات) p, p' : اندیس محصولات $\pi_p, \pi_{p'}$: تعداد زیرقطعات محصول p, p' j, j' : اندیس زیرقطعات محصول p, p' $h_j, h_{j'}$: تعداد عملیات‌های قطعه j, j' h, h' : اندیس عملیات‌های قطعه j, j' m : تعداد کل ماشین‌ها در مرحله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر (مرحله نخست) i : اندیس ماشین در مرحله نخست B : تعداد کل بسته‌ها b : اندیس بسته‌ها k' : اندیس نوبت انجام عملیات بر روی ماشین مونتاژ در مرحله دوم) $O_{j,p,h}$: عملیات h از قطعه j در محصول p A_p : زمان مونتاژ محصول p $PS_{j,p,h}$: زمان پردازش عملیات $O_{j,p,h}$ $S_{i,j,p,j'}$: زمان موردنیاز برای راه‌اندازی عملیات $O_{j',p',h'}$ در صورتی که عملیات $O_{j,p,h}$ L : یک عدد بزرگ TS_b : زمان حمل بسته b از مرکز تولید d_b : موعد تحویل بسته b **متغیرها:** $t_{j,p,h}$: زمان شروع عملیات $O_{j,p,h}$ $f_{j,p,h}$: زمان پایان عملیات $O_{j,p,h}$ St_p : زمان شروع عملیات مونتاژ محصول p Sm_k : زمان شروع به کار ماشین مونتاژ در مرحله دوم در نوبت k' E_p : زمان ساخت محصول p در مرحله نخست C_p : زمان تکمیل محصول p

$X_{i,j,p,h,j',p',h'}$: یک متغیر صفر و ۱ است؛ به طوری که اگر عملیات $O_{j',p',h'}$ روی ماشین i بلافاصله بعد از عملیات $O_{j,p,h}$ انجام شود، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$Z_{p,k'}$: یک متغیر صفر و ۱ است؛ به طوری که اگر محصول p بر روی ماشین مونتاژ در نوبت k'

مونتاز شود، برابر ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$W_{p,b}$: اگر محصول p متعلق به بسته b باشد ۱ و در غیر این صورت صفر است.

$C_{b,b}$: زمان تکمیل محصول / محصولات بسته b

$A_{t,b}$: زمان رسیدن بسته b

T_b : مقدار تأخیر بسته b

مفروضات مسئله. عمده فرض‌هایی که در مراحل مدل‌سازی و تحلیل و ارزیابی در نظر گرفته

می‌شود، عبارت‌اند از:

۱. همه ماشین‌ها در شروع افق برنامه‌ریزی در دسترس هستند؛
 ۲. تقاضای محصولات نهایی مشخص و همه قطعات در زمان صفر آماده پردازش هستند؛
 ۳. هیچ شکستی در عملیات مجاز نیست؛ بدین معنا که هر عملیات شروع‌شده، باید بدون وقفه به اتمام برسد؛
 ۴. تعدادی محصول باید تولید شود و هر محصول برای تکمیل شدن نیازمند یکسری قطعات است؛
 ۵. زمان پردازش قطعات و مونتاز محصولات قطعی و معین است؛
 ۶. زمانی که تولید همه اجزای یک محصول به پایان رسید، وارد مرحله مونتاز می‌شوند؛
 ۷. ماشین‌ها نمی‌توانند در یک زمان بیش از یک عملیات را انجام دهند و قطع کار مجاز نیست (ماشین‌ها در هر زمان یا بر روی یک قطعه / محصول عملیات انجام می‌دهند و یا بیکار هستند)؛
 ۸. در هر زمان هر قطعه فقط بر روی یک ماشین پردازش می‌شود (هر کار در هر زمان یا در حال پردازش بر روی یک ماشین است یا در صف انتظار ماشینی برای پردازش است)؛
 ۹. برای مشخص کردن شروع یک کار روی هر ماشین، یک کار مصنوعی صفر در نظر گرفته شده است. عملیاتی که به دنبال یک کار مصنوعی زمان‌بندی می‌شود، نخستین عملیات برای پردازش است؛
 ۱۰. هزینه تحویل و زمان حمل و نقل بین مرکز تولید و مشتریان ثابت است؛
 ۱۱. توقفی در روند تولید و حمل و نقل اتفاق نمی‌افتد؛
 ۱۲. تعداد کافی از وسایل نقلیه وجود دارد؛
 ۱۳. محدودیت ظرفیت در تحویل هر بسته وجود ندارد؛
 ۱۴. یک بافر با ظرفیت حداکثر تقاضا بین دو مرحله فاز تولید (تولید کارگاهی و مونتاز) وجود دارد.
- تمامی تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌ها با پیش‌فرض کامل و ثابت بودن اطلاعات محصولات و قطعات ارائه می‌شود.

مدل ریاضی. با داشتن پارامترها و متغیرهای بیان‌شده، مسئله به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود.

$$\text{Min } Z = \sum_{b=1}^B \max((At_b - d_b), 0) \quad \text{رابطه (۱)}$$

Subject to:

$$t_{j,p,h} + P S_{j,p,h} \leq f_{j,p,h} \quad \begin{matrix} j=1,2,3,\dots,n_p \\ p=1,2,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \end{matrix} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$f_{j,p,h} \leq t_{j,p,h+1} \quad \begin{matrix} j=1,2,\dots,n_p \\ p=1,2,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j-1 \end{matrix} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$f_{j,p,h} \leq E_p \quad \begin{matrix} j=1,2,\dots,n_p \\ p=1,2,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \end{matrix} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$t_{j,p,h} + P S_{j,p,h} + S_{i,j,p,j',p'} \leq t_{j',p',h'} + (1 - x_{i,j,p,h,j',p',h'}) \cdot L \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j=0,1,\dots,n_p \\ p=0,1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \\ j'=1,\dots,n_{p'} \\ p'=1,\dots,P' \\ h'=1,2,\dots,h_{j'} \end{matrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$f_{j,p,h} + S_{i,j,p,j',p'} \leq t_{j',p',h'+1} + (1 - x_{i,j',p',h',j,p,h+1}) \cdot L \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j=1,\dots,n_p \\ p=1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j-1 \\ j'=0,1,\dots,n_{p'} \\ p'=0,1,\dots,P' \\ h'=1,2,\dots,h_{j'} \end{matrix} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_{p=0}^P \sum_{j=0}^{n_p} \sum_{h=1}^{h_j} x_{i,j,p,h,j',p',h'} = 1 \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j'=1,\dots,n_{p'} \\ p'=1,\dots,P' \\ h'=1,2,\dots,h_{j'} \end{matrix} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{p'=1}^{P'} \sum_{j'=1}^{n_{p'}} \sum_{h'=1}^{h_{j'}} x_{i,j,p,h,j',p',h'} = 1 \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j=0,1,\dots,n_p \\ p=0,1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \end{matrix} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$E_p \leq S t_p \quad \forall p \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$A_p + S t_p \leq C_p \quad \forall p \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$S m_{k'} + A_p \cdot Z_{p,k'} \leq S m_{k'+1} \quad \forall p \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$k' = 1, 2, 3, \dots, k'_A - 1$$

$$S m_{k'} \leq S t_p + (1 - Z_{p,k'}) \cdot L \quad \forall p, k' \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$S m_{k'} + (1 - Z_{p,k'}) \cdot L \geq S t_p \quad \forall p, k' \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\sum_{k=1}^{k'_A} Z_{p,k} = 1 \quad p=1,2,\dots,P \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\sum_{b=1}^B w_{p,b} = 1 \quad p=1,2,\dots,P \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\sum_{p=1}^P w_{p,b} > 1 \quad b=1,\dots,B \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$Cb_b \geq C_p * w_{p,b} \quad \begin{matrix} p=1,2,\dots,P \\ b=1,\dots,B \end{matrix} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$At_b = Cb_b + Ts_b \quad b=1,\dots,B \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$x_{i,j,p,h,j,p,h} = 0 \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j=0,1,\dots,n_p \\ p=0,1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \end{matrix} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$x_{i,j,p,h,j',p',h'} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,m \\ j=0,1,\dots,n_p \\ p=0,1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \\ j'=1,\dots,n_{p'} \\ p'=1,\dots,P' \\ h'=1,2,\dots,h_{j'} \end{matrix} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$Z_{p,k} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} p=1,2,\dots,P \\ k=1,2,\dots,k'_A \end{matrix} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$w_{p,b} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} p=1,2,\dots,P \\ b=1,\dots,B \end{matrix} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\begin{matrix} At_b, Cb_b, T_b \geq 0 \\ C_p, St_p, E_p \geq 0 \\ t_{j,p,h}, f_{j,p,h} \geq 0 \\ Sm_k \geq 0 \end{matrix} \quad \begin{matrix} b=1,\dots,B \\ j=0,1,\dots,n_p \\ p=0,1,\dots,P \\ h=1,2,\dots,h_j \\ k=1,2,\dots,k'_A \end{matrix} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

مفاهیم معادلات و محدودیت‌های این مدل به شرح زیر است:
 معادله ۱، تابع هدف مدل که حداقل‌سازی مجموع تأخیرها است را نشان می‌دهد. محدودیت‌های

۲ و ۳، توالی عملیات هر کار را مشخص می‌کنند. محدودیت ۴، بزرگ‌ترین زمان پردازش قطعات یک محصول را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۵ و ۶، تضمین می‌کنند که هر ماشین در یک زمان فقط یک عملیات را با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی پردازش کند. محدودیت‌های ۷ و ۸، جایگشت‌های دایره‌ای (توالی) عملیات‌ها روی هر ماشین را تعریف می‌کنند. محدودیت ۹، حداقل زمان شروع مرحله مونتاژ را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۰، نمایانگر زمان تکمیل محصولات است. محدودیت ۱۱، این الزام را به وجود می‌آورد که در مرحله مونتاژ در صورتی یک ماشین می‌تواند به کار در نوبت $k'+1$ پردازد که کار آن ماشین در نوبت k به اتمام رسیده باشد. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳، این الزام را به وجود می‌آورند که در مرحله دوم در صورتی پردازش یک محصول می‌تواند شروع شود که هم محصول قبلی آن به اتمام رسیده باشد و هم محدودیت ماشین (ماشین مونتاژ بیکار باشد) رعایت شده باشد. محدودیت ۱۴، موجب می‌شود که به ماشین مونتاژ در هر نوبت، تنها یک محصول اختصاص یابد. محدودیت ۱۵، نشان می‌دهد که هر محصول فقط به یک بسته تخصیص داده می‌شود. محدودیت ۱۶، تضمین می‌کند هر بسته می‌تواند شامل چند نوع محصول باشد. محدودیت ۱۷، زمان تکمیل محصول / محصولات بسته b را نشان می‌دهد. محدودیت ۱۸، زمان رسیدن بسته b را مشخص می‌کند. محدودیت‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲، متغیرهای مسئله را به صورت صفر و ۱ تعریف می‌کنند. محدودیت ۲۳، متغیرهای مثبت مسئله را نشان می‌دهد.

مدل ارائه شده در بالا غیرخطی است؛ بنابراین در این بخش برای سهولت محاسبات از روشی برای خطی‌سازی مدل استفاده شده است. محدودیت ۱۷، یک عبارت غیرخطی در مدل است. در این محدودیت، یک متغیر باینری در یک متغیر پیوسته ضرب شده است. نحوه خطی‌سازی این محدودیت در ادامه شرح داده شده است.

با فرض اینکه متغیر $V=C*w$ حاصل ضرب یک متغیر باینری (w) در یک متغیر پیوسته (C) باشد؛ در این صورت وقتی متغیر باینری مقدار یک می‌گیرد، متغیر V مقداری برابر با مقدار متغیر پیوسته خواهد بود و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. برای خطی‌سازی این محدودیت از محدودیت‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶، استفاده می‌شود [۲۳].

$$V_{p,b} \leq w_{p,b} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

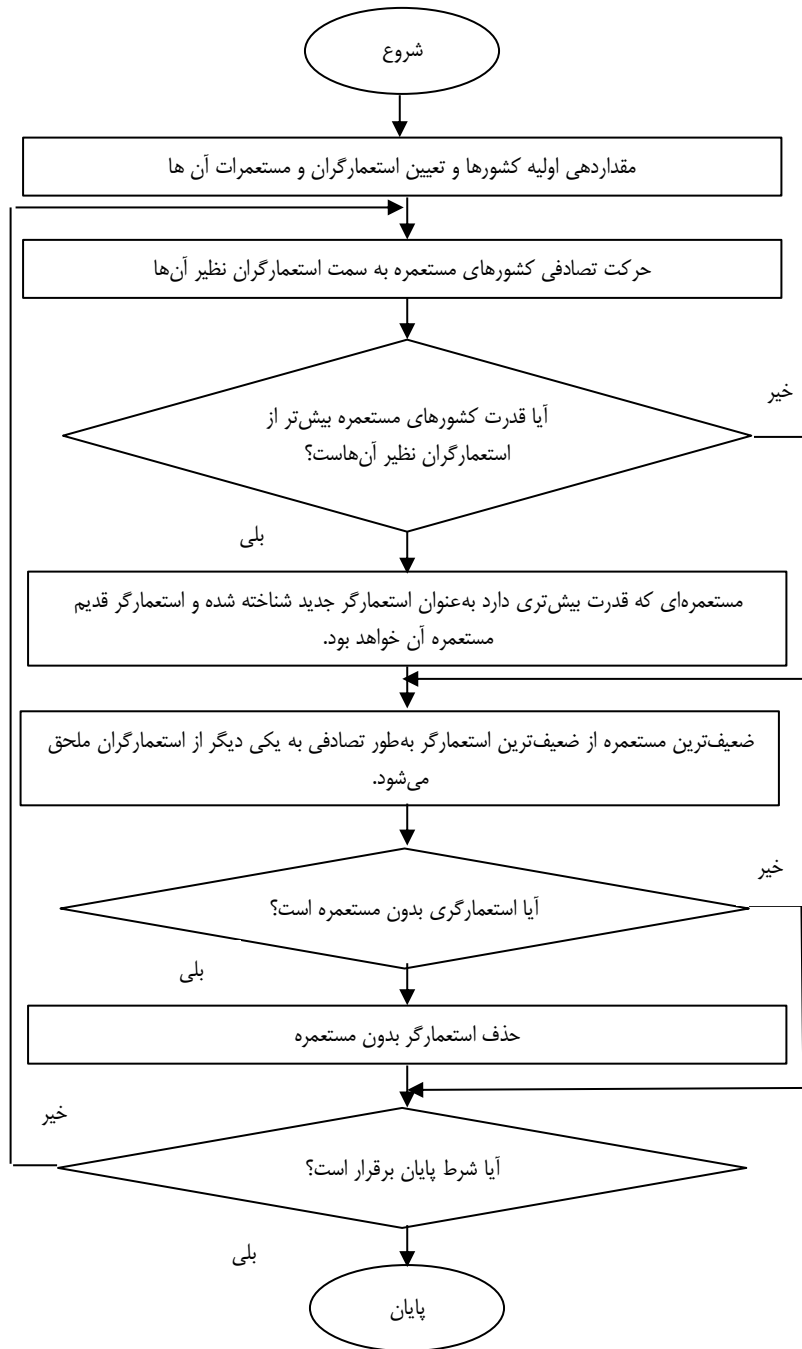
$$V_{p,b} \leq L * C_p \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$V_{p,b} \geq C_p - L (1 - w_{p,b}) \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

پیچیدگی مسئله. مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی، ۶۰ سال پیش توسط مان^۱ (۱۹۶۰) و واگنر^۲ (۱۹۵۹)، مطرح شد [۲۸، ۳۸]. مسئله زمان‌بندی تولید کارگاهی شامل زمان‌بندی n کار روی مجموعه M از ماشین‌ها شامل m ماشین است؛ به عبارتی هر کار دارای تعدادی عملیات است که باید به ترتیب انجام شوند تا معیارهای موردنظر بهینه شوند [۳۱]. گری و همکاران^۳ (۱۹۷۶)، ثابت کردند که مسئله JSP جزو مسائل NP-hard است [۱۶]. واضح است که مسئله موردبررسی در این پژوهش با افزودن مرحله مونتاژ و حمل‌ونقل بین واحد تولید و مشتریان نیز قطعاً پیچیده‌تر خواهد بود. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در ذات مسئله موردبررسی، حل آن برای مسائل بزرگ در زمان معقول غیرممکن است؛ بنابراین برای حل مسئله موردبررسی یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده است. در ادامه ابتدا هر یک از الگوریتم‌ها به‌طور مختصر شرح داده می‌شود و سپس الگوریتم پیشنهادی تشریح می‌شود.

الگوریتم رقابت استعماری. الگوریتم ICA توسط آتش‌پز و کارو لوکس^۴ (۲۰۰۷) ارائه شد که برای بهینه‌سازی، به‌جای طبیعت از یک پدیده اجتماعی الهام گرفته شده است [۳]. این روش در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در حوزه‌های مختلف استفاده شده است. شکل ۱، مراحل این الگوریتم را نشان می‌دهد.

1. Manne
2. Wagner
3. Garey et al
4. Atashpaz & Lucas



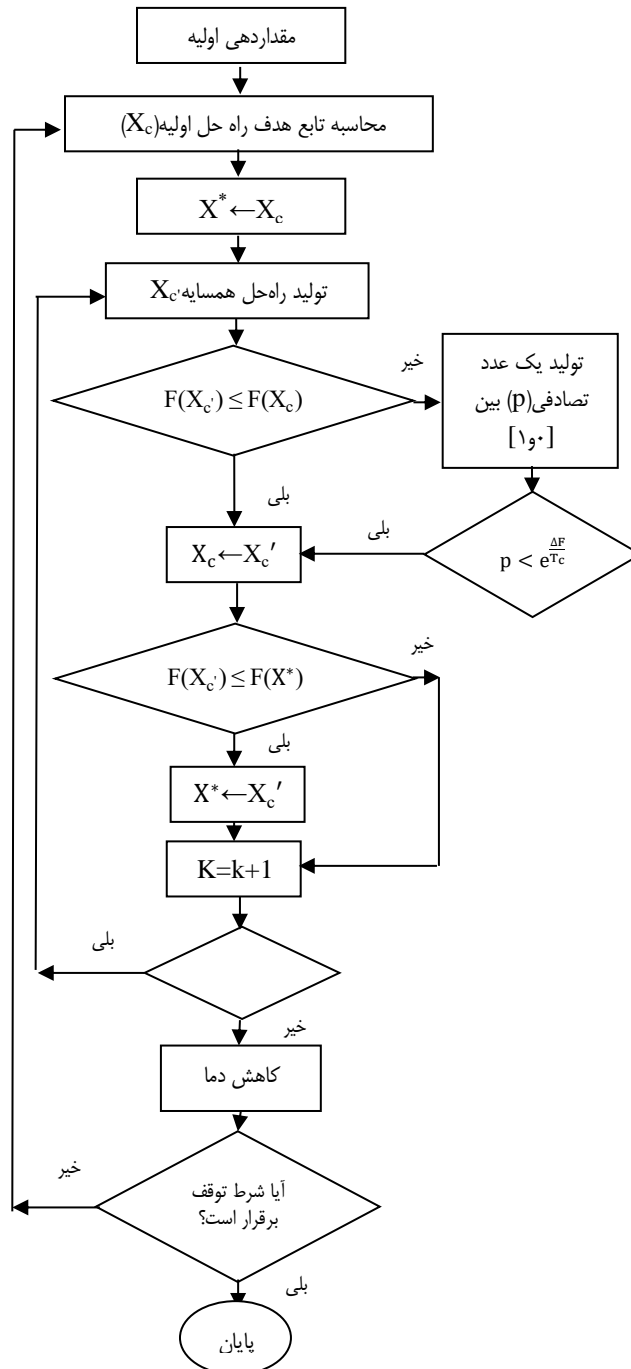
شکل ۱. فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، ایده و سازوکار موجود در تبرید فیزیکی یک جسم جامد را شبیه‌سازی می‌کند. این ایده نخستین بار توسط متروپلیس و همکاران^۱ (۱۹۵۳) مطرح و توسط کریک پاتریک و همکاران^۲ (۱۹۸۳)، توسعه داده شد [۲۹]. آن‌ها الگوریتمی به نام «شبیه‌سازی تدریجی» را برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی ارائه کردند [۲۳]. فلوجارت این الگوریتم در شکل ۲، نمایش داده شده است.

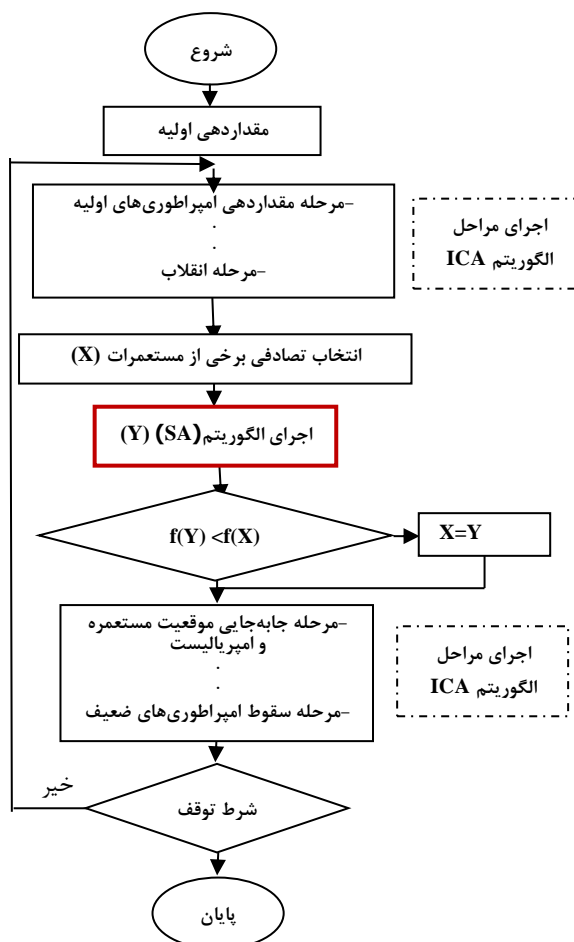
الگوریتم پیشنهادی. با توجه به مزایای گفته‌شده در مورد الگوریتم ICA و برای جلوگیری از افتادن در بهینه محلی و جست‌وجوی کامل محیط، الگوریتم یادشده با الگوریتم SA ترکیب شد. الگوریتم SA به دلیل سادگی و اثربخشی بالا در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی دارای جایگاه ویژه‌ای است. این الگوریتم نیز توانایی گذر از بهینه محلی را دارد. امروزه انجام تدریجی به‌عنوان یک تکنیک قوی جست‌وجوی همسایگی شناخته شده است که توانایی آن در حل مسائل ترکیبی مانند مسیریابی وسایل نقلیه، زمان‌بندی تولید و جدول زمانی اثبات شده است [۳۶]. ساختار الگوریتم پیشنهادی همانند مراحل الگوریتم رقابت استعماری مطرح شده است؛ با این تفاوت که در طی فرآیند حل، بعد از مرحله انقلاب، برخی از مستعمرات به‌طور تصادفی از هر امپراتوری انتخاب می‌شوند و الگوریتم SA به‌عنوان جست‌وجوی محلی برای تغییر مستعمرات انتخاب‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مستعمرات تغییریافته، جایگزین موارد قبلی در هر امپراتوری می‌شوند و سپس مراحل بعدی الگوریتم انجام می‌شود. شمای کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳، نشان داده شده است.

1. Metropolis et al

2. Kirkpatrick et al



شکل ۲. فلوجارت الگوریتم شبیه‌سازی تبرید



شکل ۳. شمای کلی الگوریتم پیشنهادی

ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

نمایش راه‌حل. هر عضو از جمعیت دارای دو بخش است: بخش نخست، توالی عملیات‌ها روی ماشین‌ها در زیرمسئله تولید کارگاهی و بخش دوم، توالی محصولات بر روی ماشین مونتاژ است. در بخش نخست از روش کدینگ بر پایه عملیات برای نشان‌دادن راه‌حل‌ها استفاده شده است. در این نمایش هر رشته نمایانگر توالی عملیات‌ها است و هر سلول نشان‌دهنده یک عملیات است؛ بنابراین طول هر رشته برابر تعداد کل عملیات‌ها است. شکل ۴، نحوه نمایش جواب‌ها را نشان می‌دهد. در قسمت الف این شکل، سطر اول نشان‌دهنده عملیات است. سطر دوم نیز نمایانگر محصول است. در این مثال، محصول ۱ و ۲ دارای ۲ قطعه هستند. قطعات ۱ و ۲ محصول ۱ به ترتیب دارای ۴ و ۲ عملیات هستند. در این حالت به تعداد عملیات هر قطعه، عدد مربوط به آن

قطعه در بردار تکرار شده است. برای مثال، قطعه ۲ از محصول ۱ دارای ۲ عملیات است که به ترتیب در خانه‌های ۶ و ۹ قرار گرفته‌اند. در بخش ب شکل ۴، توالی محصولات توسط یک بردار نمایش داده شده است. این نحوه نمایش شدنی بودن راه‌حل‌های به‌روزرسانی‌شده را به‌صورت خودکار بررسی می‌کند.

قطعه	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۱
محصول	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱

الف

توالی محصول	۱	۲
-------------	---	---

ب

شکل ۴. نحوه نمایش راه‌حل

مقداردهی اولیه. در این مسئله تولید جمعیت اولیه دارای دو بخش است؛ به عبارتی باید برای هر عضو از جمعیت ساختار توالی آن در مسئله تولید کارگاهی و نحوه چیدمان محصولات در مسئله مونتاژ تعیین شود. در این پژوهش، توالی اولیه عملیات‌ها در مرحله نخست، توالی محصولات در مرحله دوم از قاعده تصادفی به‌دست می‌آیند. در این قاعده به‌طور تصادفی نماد اعداد مرتب می‌شوند.

ساختار همسایگی. روش انتقال از یک راه‌حل به راه‌حل همسایه آن توسط یک عامل کلیدی شناخته‌شده با عنوان «ساختار همسایگی» صورت می‌گیرد. در این بخش، دو نوع از ساختارهای همسایگی به‌کاررفته در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید معرفی می‌شوند.

ساختار همسایگی ۱: در این ساختار همسایگی ابتدا دو قطعه از دو یا یک محصول به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. اگر تعداد عملیات‌ها از دو قطعه انتخاب‌شده برابر باشند، مکان عملیات‌های دو قطعه در رشته راه‌حل کاندید به‌صورت یک‌به‌یک، با توجه به شماره عملیات‌ها عوض می‌شود. در مقابل، اگر تعداد عملیات‌ها در دو قطعه برابر نباشد، عملیات‌های مربوط به قطعه با تعداد عملیات کمتر، با رعایت محدودیت‌های توالی به سلول‌هایی از قطعه با تعداد عملیات بیشتر منتقل می‌شود و عملیات‌های مربوط به قطعه با تعداد عملیات بیشتر، سلول‌های باقیمانده خود و تمام سلول‌های قبلی از قطعه با تعداد عملیات کمتر را با رعایت محدودیت‌های توالی پر می‌کنند. این ساختار همسایگی خطر گیرافتادن در بهینه محلی را کاهش می‌دهد. مثالی از این ساختار همسایگی در شکل ۵، ارائه شده است. در این مثال، قطعه ۲ از محصول ۱ و قطعه ۱ از محصول ۲ برای جایگزینی انتخاب شده‌اند.

قطعه	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲
محصول	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱

قطعه	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲
محصول	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱

شکل ۵. ساختار همسایگی ۱

ساختار همسایگی ۲: در این نوع ساختار همسایگی، دو سلول، به صورت تصادفی انتخاب شده و مقادیر آن‌ها با یکدیگر تعویض می‌شود.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

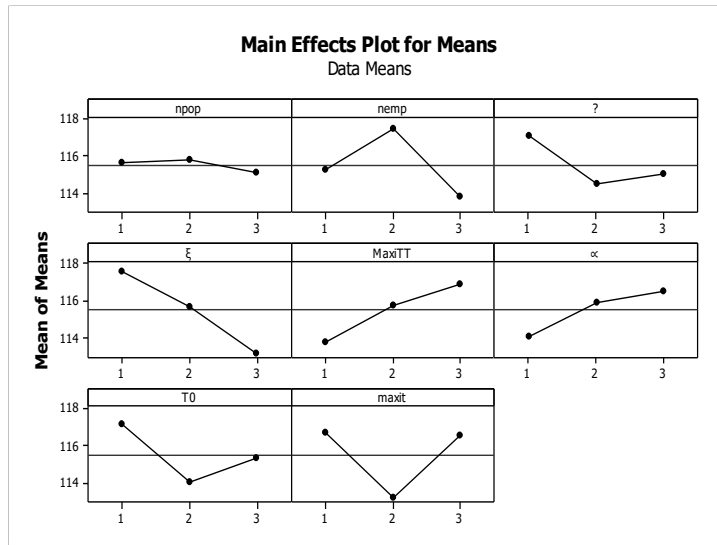
در این قسمت کارایی الگوریتم پیشنهادی بررسی و تحلیل می‌شود. بدین منظور، مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی، به ترتیب در نرم‌افزارهای GAMS 24.1.2 و MATLAB (R2011a) مدل ریاضی و با رایانه‌ای با رم ۲ گیگابایت و cpu دوهسته‌ای ۲ گیگاهرتز اجرا شده‌اند. با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به مسائل حل شده در پژوهش‌های مشابه برای مسئله مورد نظر وجود ندارد، از نمونه‌های تصادفی به منظور بررسی و اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهادی و همچنین کیفیت نتایج الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. نحوه تولید نمونه‌های تصادفی در جدول ۲، آورده شده است. اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار گمز و به‌زای مسائل کوچک و متوسط انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، نتایج به‌دست‌آمده با الگوریتم‌های ICA و ICA-TS مقایسه شده است.

جدول ۲. مقادیر داده‌های تصادفی

مقادیر	پارامترها
{۲,۳,...,۳۰}	تعداد محصولات
{۲,۳,...,۱۰}	تعداد قطعات
{۲,۳,...,۱۰}	تعداد ماشین‌ها در مرحله اول
{۲,۳,...,۸}	تعداد بسته‌ها
عدد صحیح	زمان پردازش / مونتاژ

تنظیم مناسب پارامترها و انتخاب درست عملگرها در الگوریتم‌های فراابتکاری تأثیر بسزایی بر عملکرد آن‌ها دارد که باید با توجه به شرایط مسئله مورد بررسی تعیین شود. در این پژوهش از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. اجرای این روش نسبت به سایر روش‌های طراحی آزمایش‌ها ساده‌تر است و همچنین زمان محاسباتی کمتری

دارد. این روش در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط تاگوچی ارائه شد و می‌تواند در طراحی فرآیندها مورد استفاده قرار گیرد. در این الگوریتم برای ۸ پارامتر بیان شده سه سطح در نظر گرفته شده است. این آزمون بر روی مسئله‌ای با مشخصات ۴ کار، ۳ محصول، ۲ ماشین و ۲ بسته اجرا شد که پارامترهای قابل کنترل الگوریتم پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است. در این الگوریتم از طرح تاگوچی L_{27} برای انتخاب سطوح بهینه پارامترها استفاده شد. نتایج حاصل از روش تاگوچی برای هر سطح از عوامل در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل، میانگین SN ratios، سطحی از فاکتورها که بیشترین مقدار SN ratios را دارند، به عنوان بهترین سطح فاکتور انتخاب می‌شود. سطوح پارامترهای قابل کنترل الگوریتم پیشنهادی و نتایج حاصل از تنظیم پارامترها در جدول ۳، نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار میانگین مقادیر SN ratios برای هر سطح از فاکتورها در الگوریتم ICA-SA

جدول ۳. فاکتورها و مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ICA-SA

فرآیند	پارامترها	سطوح فاکتورها	سطح مناسب
ICA	npop: تعداد کشورهای اولیه	۵۰-۸۰-۱۰۰	۸۰
	nemp: تعداد امپراتوری‌ها	۱۵-۲۰-۲۵	۲۰
	β	۱/۵-۱/۷-۲	۱/۵
	ξ	۰/۱-۰/۰۵-۰/۱	۰/۰۱
SA	Max iTT: حداکثر تعداد تکرار الگوریتم ترکیبی	۳۰-۵۰-۸۰	۸۰
	α: ضریب کاهش دما	۰/۶-۰/۴-۰/۲	۰/۴
	T0: دمای اولیه	۱۰-۳۰-۶۰	۳۰
	maxit: تعداد تکرار در هر دما	۲۰-۴۰-۶۰	۲۰

برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و مدل‌های ریاضی پیشنهادی، نمونه‌ها به سه گروه با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شده‌اند. به منظور ارزیابی عملکرد از معیار عملکرد درصد انحراف نسبی^۱، استفاده خواهد شد. این معیار از رابطه ۲۷، محاسبه می‌شود.

$$\text{RPD} = \frac{\text{Algorithm}_{\text{solution}} - \text{Minimum}_{\text{solution}}}{\text{Minimum}_{\text{solution}}} * 100 \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

در این بخش، عملکرد و کارایی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با الگوریتم‌های ICA و ICA-TS در حل مسائل مختلف مقایسه و برتری آن‌ها ارائه می‌شود. برای مسائل با ابعاد کوچک جواب بهینه توسط نرم‌افزار گمز به دست آمد که در جدول ۴، نشان داده شده است. با توجه به مقادیر هدف و RPD، الگوریتم‌های ICA-SA، ICA و ICA-TS به جواب بهینه، مشابه راه‌حل بهینه به دست آمده توسط گمز، دست می‌یابند. با این تفاوت که با افزایش ابعاد مسئله، زمان محاسباتی حاصل از این الگوریتم‌ها کمتر از گمز است.

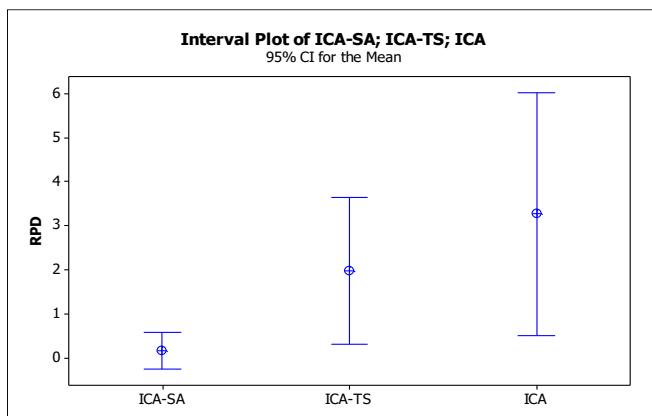
به دلیل ماهیت پیچیده مسئله، مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ توسط الگوریتم‌های ICA-SA، ICA و ICA-TS حل شده‌اند. نتایج در جدول ۴، نشان داده شده است. با توجه به مقادیر درصد انحراف نسبی ارائه شده در جدول ۴، نمودار متوسط مقادیر درصد انحراف نسبی برای مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸، ترسیم شده است. با توجه به مقادیر درصد انحراف نسبی در مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ، الگوریتم ICA-SA نسبت به الگوریتم‌های ICA و ICA-TS عملکرد بهتری دارد؛ همچنین الگوریتم ICA-TS دارای عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ICA است.

1. Relative Percentage Deviation (RPD)

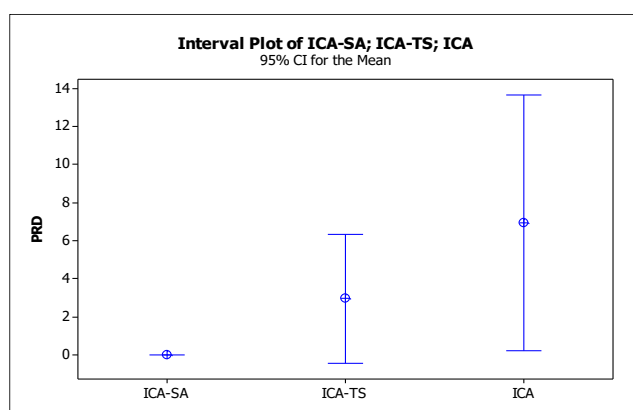
جدول ۴. نتایج محاسباتی مسائل نمونه

مسئله	Gams		ICA-SA		ICA-TS		ICA							
	مقدار هدف	درصد انحراف نسبی	زمان محاسباتی (ثانیه)	میانگین مقادیر هدف	درصد انحراف نسبی	زمان محاسباتی (ثانیه)	میانگین مقادیر هدف	درصد انحراف نسبی						
کوچک	P ₁	۱۰۷	۰	۱۰	۱۰۷	۰	۲۵	۱۰۷	۰	۱۰۷	۰	۵		
	P ₂	۸۵	۰	۲۴	۸۵	۰	۲۸	۸۵	۰	۸۵	۰	۱۲		
	P ₃	۴۴	۰	۲۰۸	۴۴	۰	۷۶	۴۴	۰	۴۴	۰	۲۵		
	P ₄	۳۶	۰	۹۶	۳۶	۰	۵۹	۳۶	۰	۳۶	۰	۲۷		
	P ₅	۵۱	۰	۶۳۲	۵۱	۰	۱۱۶	۵۱	۰	۵۱	۰	۶۲		
موسط	P ₆	-	-	-	۳۶۵	۱/۳۹	۱۸۷	۳۶۸	۱۵۳	۲/۱۲	۳۶۰	۰	۷۹	
	P ₇	-	-	-	۶۵۶	-	۲۹۳	۶۵۶	۲۷۴	۰	۶۵۶	۰	۹۵	
	P ₈	-	-	-	۱۳۴۵	-	۴۳۱	۱۴۰۱	۴۹۱	۴/۱۶	۱۴۲۰	۵۵۸	۱۶۸	
	P ₉	-	-	-	۱۰۰۳	-	۵۳۷	۱۰۰۳	۶۰۸	۰	۱۰۰۳	۰	۲۱۷	
	P ₁₀	-	-	-	۱۳۶۴	-	۳۹۴	۱۳۹۲	۲۵۹	۲/۰۵	۱۴۲۶	۴/۵۴	۱۲۶	
	P ₁₁	-	-	-	۲۳۳۴	-	۴۶۲	۲۳۸۳	۵۶۲	۲/۰۹	۲۳۹۸	۲/۷	۱۵۳	
	P ₁₂	-	-	-	۲۵۶۲	-	۶۰۴	۳۷۵۱	۵۴۳	۵/۳۱	۳۸۸۹	۹/۲	۲۴۱	
	P ₁₃	-	-	-	۲۵۳۴	-	۵۴۶	۲۵۳۴	۶۱۹	۰	۲۶۲۸	۴/۱	۲۰۹	
	P ₁₄	-	-	-	۳۷۵۲	-	۱۲۷۹	۳۷۵۹	۱۳۲۶	-/۱۸	۳۸۹۱	۳/۷	۷۲۱	
	P ₁₅	-	-	-	۱۲۱۸۰	-	۲۰۱۵	۱۲۵۶۳	۲۳۰۷	۳/۱۴	۱۳۹۱۰	۱۴/۲	۱۱۲۰	
	بزرگ	P ₁₆	-	-	-	۱۵۸۳۹	-	۱۶۳۴	۱۵۹۶۳	۱۶۹۴	-/۷۸	۱۶۰۱۲	۱/۰۹	۶۲۸
		P ₁₇	-	-	-	۲۶۱۸۵	-	۳۰۲۸	۲۷۱۴۱	۳۲۵۱	۲/۶۵	۲۷۴۶۵	۴/۸۹	۱۳۶۹
		P ₁₈	-	-	-	۱۹۲۴۵	۰	۲۹۷۳	۲۰۵۹۴	۲۹۸۹	۷	۲۱۳۱۴	۷/۵ ۱۰	۱۶۳۴

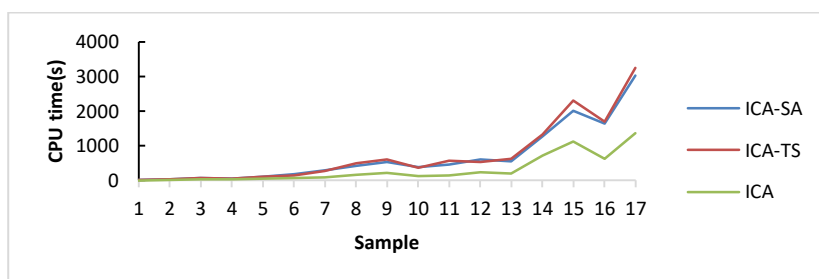
یکی دیگر از عوامل مهم برای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری، زمان محاسباتی است. در شکل ۹، زمان محاسباتی حاصل از الگوریتم‌های ارائه‌شده، مقایسه است. مطابق این شکل، با افزایش ابعاد مسئله زمان محاسباتی الگوریتم‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش ابعاد مسئله الگوریتم ICA کمترین زمان محاسباتی و الگوریتم ICA-SA بیشترین زمان محاسباتی را دارا است.



شکل ۷. نمودار میانگین مقادیر درصد انحراف نسبی با بازه اطمینان ۹۵ درصد برای الگوریتم پیشنهادی در مسائل متوسط



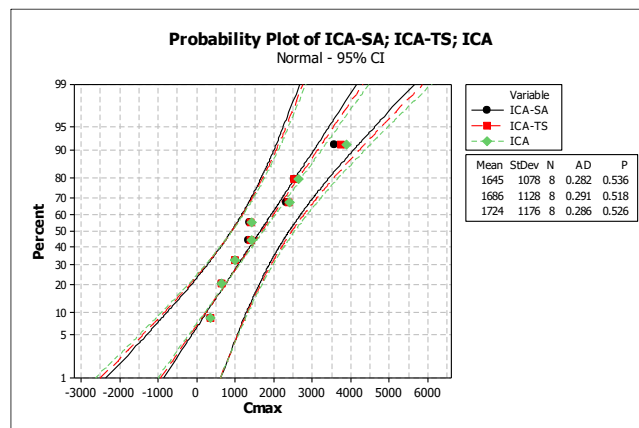
شکل ۸. نمودار میانگین مقادیر درصد انحراف نسبی با بازه اطمینان ۹۵ درصد برای الگوریتم پیشنهادی در مسائل بزرگ



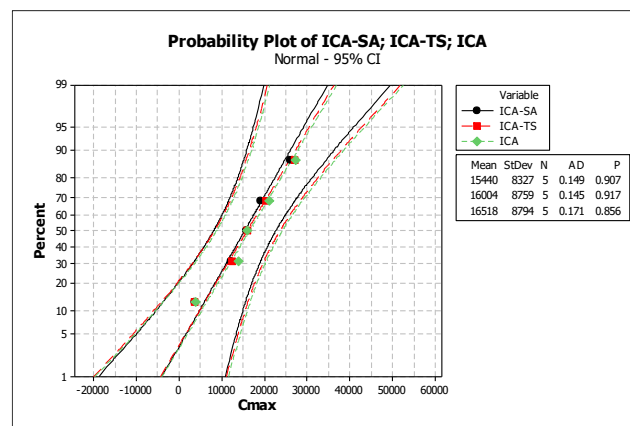
شکل ۹. مقایسه زمان محاسباتی الگوریتم‌های ICA-SA، ICA-TS و ICA

برای مقایسه توانایی الگوریتم‌های ICA-SA، ICA و ICA-TS در ابعاد متوسط و بزرگ از تحلیل واریانس طرح بلوکی تصادفی استفاده شده است. قبل از انجام تحلیل واریانس باید فرض های نرمال بودن نتایج و برابری واریانس‌ها آزمون شود. بدین منظور، این دو فرض به ترتیب

توسط آزمون‌های اندرسون - دارلینگ^۱ و لون^۲ در نرم‌افزار Minitab16 با سطح معناداری ۰/۰۵ تحلیل شدند. نتایج آزمون نرمال بودن نتایج الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نشان داده شده است. مقادیر P-Value این آزمون در هر دو بُعد بیشتر از سطح معناداری ۰/۰۵ است؛ بنابراین نتایج الگوریتم‌ها در ابعاد متوسط و بزرگ دارای توزیع نرمال هستند. همچنین نتایج آزمون برابری واریانس الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ نشان داد که مقادیر P-Value این آزمون نیز در هر دو بُعد بیشتر از سطح معناداری ۰/۰۵ است؛ بنابراین واریانس الگوریتم‌ها با یکدیگر برابر هستند.



شکل ۱۰. آزمون نرمال بودن مقادیر الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد متوسط



شکل ۱۱. آزمون نرمال بودن مقادیر الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد بزرگ

1. Anderson-Darling
2. Levene

تحلیل واریانس طرح بلوکی تصادفی در نرم‌افزار SPSS انجام شد و نتایج این آزمون برای ابعاد متوسط و بزرگ به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقادیر P-Value الگوریتم‌ها و بلوک‌ها کمتر از سطح معناداری ۰/۰۵ است؛ بنابراین فرض صفر رد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم در ابعاد متوسط و بزرگ، از نظر توانایی رسیدن به جواب بهینه، با یکدیگر اختلاف معنادار دارند. با توجه به مقادیر و توضیحات بالا، الگوریتم ICA-SA در مسائل با اندازه متوسط و بزرگ نسبت به الگوریتم ICA و ICA-TS عملکرد بهتری دارد.

جدول ۵. نتایج تحلیل واریانس طرح بلوکی تصادفی برای مسائل با ابعاد متوسط

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	P- Value
فاکتور	۲۴۵۸۱/۵۸	۲	۱۲۲۹۰/۷۹	۰	۰
بلوک	۲۶۶۷۴۱۹۶/۳۹	۷	۳۸۱۰۵۹۹/۴۷	۰	۰
خطا	۰	۰	۰		
کل	۹۴۸۸۷۳۱۷	۲۴			

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس طرح بلوکی تصادفی برای مسائل با ابعاد بزرگ

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	P- Value
فاکتور	۲۹۰۸۳۲۱/۷۳	۲	۱۴۵۴۱۶۰/۸۷	۰	۰
بلوک	۸۹۱۶۸۶۳۳۵/۰۷	۴	۲۲۲۹۲۱۵۵۸/۷۷	۰	۰
خطا	۰	۰	۰		
کل	۴۷۳۰۴۷۶۱۵۷	۱۵			

از یافته‌های مدیریتی این پژوهش می‌توان به رمز بقای هر سازمان، ارائه خدمات با کیفیت بالا و قیمت پایین اشاره کرد. یکی از عوامل مؤثر در کیفیت و قیمت ارائه خدمات و کالاها، زمان تولید ارائه آن‌هاست. توالی و زمان‌بندی عملیات در طول زمان برای اجرای مجموعه‌ای از وظایف، از مهم‌ترین دغدغه‌های تصمیم‌گیرندگان در عرصه صنعت و خدمات است؛ بنابراین زمان‌بندی و تعیین توالی عملیات، یکی از مسائل مهم برنامه‌ریزی تولید است و کاربردهای بسیاری در واحدهای تولیدی و غیرتولیدی دارد. مفهوم و الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش باعث جلوگیری از انباشت سرمایه، تقلیل ضایعات، کاهش و یا حذف بیکاری ماشین‌آلات و تلاش برای استفاده بهتر از آن‌ها، پاسخگویی به موقع به سفارش‌های مشتریان، کاهش زمان حمل‌ونقل و تأمین مواد اولیه و قطعات موردنیاز در موقع مناسب می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مسئله یکپارچه زمان‌بندی تولید و حمل‌ونقل در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی در محیط تولید کارگاهی با یک مرحله مونتاژ با هدف کمینه کردن مجموع زمان دیرکردها مورد مطالعه قرار گرفت. ابتدا یک مدل ریاضی برای مسئله مورد مطالعه توسعه داده شد. سپس با توجه به پیچیدگی بالای مسئله مورد بررسی در ابعاد متوسط و بزرگ، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری پیشنهاد شد. به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج به دست آمده با الگوریتم رقابت استعماری مقایسه شد. نتایج محاسباتی نشان داد که در هر دو بُعد، الگوریتم ICA-SA عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ICA و ICA-TS دارد؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که رویکرد ترکیبی پیشنهادی موجب رسیدن به جواب‌های باکیفیت‌تر می‌شود. در ادامه، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است:

- ارائه مدل در حالت چند هدفه با در نظر گرفتن توابع هدفی چون انرژی، پایداری، دوره ساخت و غیره؛
- در نظر گرفتن حالت احتمالی برای پارامترهای زمان پردازش، زمان حمل و موعده تحویل مسئله؛
- ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر برای حل مدل و عملکردها.

منابع

1. Al-Anzi, F.S., & Allahverdi, A. (2009). Heuristics for a two-stage assembly flow shop with bicriteria of maximum lateness and makespan. *Computers & Operations Research*, 36(9), 2682-2689.
2. Armstrong, R., Su, G., & Lei, L. (2008). A Zero-inventory Production and Distribution Problem with a Fixed Customer Sequence. *Annals of Operations Research*, 159(1), 395-414.
3. Atashpaz-Gargari E., & Lucas, C. (2007). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, in: Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, Singapore, 25-28 Sept, 4661-4667.
4. Chang, Y. C., & Lee, C. Y. (2004). Machine Scheduling with Job Delivery Coordination. *European Journal of Operational Research*, 158(2), 470-487.
5. Chen, Z. L., & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated Scheduling of Production and Distribution Operations. *Management Science*, 51(4), 614-628
6. Cheng, T.C.E. (1990). Analysis of material flow in a job shop with assembly operations, *International Journal of Production Research*, 28(7): 1369-1383.
7. Chopra, S., & Meindl, P. (2004). *Supply chain management- strategy, planning and operation*. 2 nd Ed. Prentic Hall.
8. Condotta, A., Knust, S., Dimitri, M., & Shakhlevich, N.V. (2013). Tabu Search and Lower Bounds for a Combined Production-Transportation Problem. *Computers & Operations Research*, 40(3), 886-900.
9. Daneshamooz, F., Jabbari, M. and Fattahi, P. (2015). A model for job shop scheduling with a parallel assembly stage to minimize makespan. *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 2(4), 39-53. (In Persian)
10. Dimyati, T. (2007). Minimizing production flow time in a process and assembly job shop, Proceedings of the International Seminar on Industrial engineering and Management, Jakarta, 68- 73.
11. Farahani, P., Martin, G., & Günther, H.O. (2012). Integrated Production and Distribution Planning for Perishable Food Products. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 28-51.
12. Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). A branch and bound algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with setup time and assembly operations. *Applied Mathematical Modelling*, 38(1), 119-134.
13. Fattahi, P., Mohammadi, E., & Daneshamooz, F. (2019). Providing a Harmony Search Algorithm for Solving Multi Objective Job Shop Scheduling Problem with Considering an Assembly Stage and Lot Streaming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 9(1), 61-86. (In Persian)
14. Fontes, B.M.M., & Homayouni, S.M. (2019). Joint production and transportation scheduling in flexible manufacturing systems. *Journal of Global Optimization*, , 74(4), 879-908.
15. Frazzona, E.M., Albrechta, A., Piresa, M., Israela, E., Kückc, M., & Freitagc, M. (2018). Hybrid approach for the integrated scheduling of production and transport processes along supply chains. *International Journal of Production Research*, 56(5), 2019-2035.
16. Garey, M.R., Johnson, D.S., & sethi, R. (1976). The Complexity of flow shop and job shop scheduling. *Mathematics of Operation Research*, 1(2), 117-129.
17. Geismar, H. N., Laporte, G., Lei, L., & Sriskandarajah, C. (2008). The

- Integrated Production and Transportation Scheduling Problem for a Product with a Short Lifespan. *Inform Journal on Computing*, 20(1), 21–33.
18. Gholami, H.R., Mehdizadeh, E., Naderi, B. (2018). Mathematical modeling and imperialist competitive algorithm for Assembly Flowshops. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(1), 93-111. (In Persian)
 19. Hall, L.A., & Shmoys, D. B. (1992). Jackson's rule for single-machine scheduling: Making a good heuristic better, *Math. Oper. Res*, 17:22–35.
 20. Hajiaghaei-Keshteli, M., Aminnayeri, M., & Fatemi Ghomi, S.M.T. (2014). Integrated Scheduling of Production and Rail Transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 240–256.
 21. Jia, Z-H., Zhuo, X-X., Leung, Y-T., & Li, K. (2019). Integrated production and transportation on parallel batch machines to minimize total weighted delivery time. *Computers & Operations Research*, 102, 39-51.
 22. Kang, H.Y., Peam, W. L. Pearn, Chung, I.P., & Lee, A.H. (2015). An Enhanced Model for the Integrated Production and Transportation Problem in a Multiple Vehicles Environment. *Soft Computing*, 20(4), 1415–1435.
 23. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Jr., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220: 671-680.
 24. Lee, C.Y., Cheng, T.C.E., & Lin, B.M.T. (1993). Minimizing the makespan in the 3- machine assembly-type flow shop-scheduling problem. *Management Science*, 39(5), 616-625.
 25. Lee, J., Kim, B.I., Johnson, A.L., & Lee, K. (2014). The Nuclear Medicine Production and Delivery Problem. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 461–472.
 26. Li, C. L., & Vairaktarakis, G. (2007). Coordinating Production and Distribution of Jobs with Bundling Operations. *IIE Transactions*, 39(2), 203–215.
 27. Low, C., Chang, C.M., Li, R.K., & Huang, C.L. (2014). Coordination of Production Scheduling and Delivery Problems with Heterogeneous Fleet. *International Journal of Production Economics*, 153, 139–148.
 28. Manne, A.S. (1960). On the job shop-scheduling problem. *Operation Research*, 8(2), 219-223.
 29. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of state calculation by east computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1091.
 30. Potts, C. N. (1980). Analysis of a heuristic for one machine sequencing with release dates and delivery times. *Oper. Res*, 28, 1436–1441.
 31. Rahimi, H., Azar, A., & Rezaei-Pandari, A. (2015). Designing a Multi Objective Job Shop Scheduling Model and solving it by Simulated Annealing. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(3), 39-63. (In Persian)
 32. Shokrollahpour, E., Zandieh, M., & Dorri, B. (2011). A novel imperialist competitive algorithm for bi-criteria scheduling of the assembly flow shop problem. *International Journal of Production Research*, 49(11), 3087-3103.
 33. Tanimizu, Y., ITO, H., & Matsui, K. (2016). Integrated Production and Transportation Scheduling for Low-Carbon Supply Chains, Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design, 399-415.
 34. Torabzadeh, E., & Zandieh, M. (2010). Cloud theory-based simulated annealing approach for scheduling in the two-stage assembly flow shop. *Advances in Engineering Software*, 41(10-11), 1238-1243.
 35. Ullrich, C.A. (2012). Supply Chain Scheduling: Makespan Reduction Potential.

- International Journal of Logistics Research and Applications*, 15(5), 323–336.
36. Varadharajan, T. K., & Rajendran, C. (2005). A Multi-Objective Simulated-Annealing Algorithm for Scheduling in Flow shops to Minimize the Makespan and Total Flow time of Jobs. *European Journal of Operational Research*, 167(3), 772-795.
 37. Viegutz, C., & Knust. S. (2014). Integrated Production and Distribution Scheduling with Lifespan Constraints. *Annals of Operations Research*, 213(1), 293–318.
 38. Wagner, H. (1959). An integer linear-programming model for machine scheduling, *Naval Research logistics quarterly*, 6(2): 131-140.
 39. Wang, K., Ma, W.Q., Luo, H., & Qin, H. (2016). Coordinated scheduling of production and transportation in a two-stage assembly flow shop, *International Journal of Production Research*, 6891-6911.
 40. Woeginger, G. J. (1994). Heuristics for parallel machine scheduling with delivery times. *Acta Inform*, 31, 503–512.
 41. Woeginger, G. J. (1998). A polynomial-time approximation scheme for single-machine sequencing with delivery times and sequence- independent batch set-up times. *J. Scheduling one*, 1(2), 79–87.
 42. Zhang, R.A. (2011). Simulation-based Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling with Assembly Operations. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 3(10).