

ارائه یک الگوریتم رقابت استعماری ترکیبی برای زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با

در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه

لیلا ایزدی^۱، فردین احمدی‌زر^{۲*}، جمال ارکات^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران.

خلاصه

در این مقاله، مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با در نظر گرفتن مسیریابی وسایل نقلیه بررسی می‌شود. یک کارخانه که چند خط تولید موازی در اختیار دارد، سفارش‌های مشتریان را دریافت می‌کند؛ پس از تولید محصولات سفارش داده شده، آن‌ها به صورت دسته‌ای به وسیله ناوگانی از وسایل نقلیه برای مشتریان ارسال می‌شوند. برخلاف شیوه ارسال مستقیم سفارشات از کارخانه برای هر یک از مشتریان، ارسال دسته‌ای به علت استفاده حداکثری از ظرفیت وسایل حمل و نقل باعث کاهش هزینه‌های حمل می‌شود، اما ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های نگهداری و دیرکرد شود. هدف، یافتن یک برنامه زمانی یکپارچه‌ی تولید و توزیع است به گونه‌ای که هزینه‌های آماده‌سازی، نگهداری، توزیع و دیرکرد حداقل شود. ابتدا، مسئله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدله می‌شود. به دلیل NP-hard بودن آن، یک الگوریتم ترکیبی از الگوریتم رقابت استعماری و قواعد غلبه برای حل مسائل با ابعاد بزرگ ارائه می‌شود. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، تعدادی مسئله نمونه تولید و حل می‌شوند. نتایج محاسباتی حاکی از آن است که الگوریتم عملکرد خوبی برای مسائل با ابعاد بزرگ دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲۳

پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۰

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی یکپارچه

مسیریابی وسایل نقلیه

ارسال دسته‌ای

هزینه نگهداری

الگوریتم رقابت استعماری

قواعد غلبه

۱- مقدمه

بیانگر اهمیت زیاد مدل‌های یکپارچه است [۳ و ۴]. هم‌چنین، هزینه‌های بالای موجودی و تمایل به روش تولید به موقع، شرکت‌ها را وادار به کاهش موجودی در زنجیره توزیعشان می‌نماید. در نتیجه، اثر هماهنگی فعالیت‌های تولید و توزیع، به عنوان یک زمینه باز و پر چالش برای تحقیق باقی مانده است، چرا که تحقیقات اندکی در این زمینه انجام شده است [۵].

حال و پاتس [۶] در سال ۲۰۰۳ میلادی انواع مختلفی از مسائل زمان‌بندی، دسته‌بندی و توزیع را بررسی کردند. آن‌ها تصمیم‌گیری هماهنگ بین تأمین‌کننده و تولیدکننده را مورد بررسی قرار داده و ثابت کردند مسئله تولید و توزیع با تصمیمات هماهنگ از مسائل رام نشدنی است. نتایج تحقیق نشان داد که تصمیمات هماهنگ

زمان‌بندی نوعی فرآیند تصمیم‌گیری است که با هدف بهینه‌سازی یک و یا چند هدف انجام می‌گیرد و در بازار رقابتی کنونی به یک نیاز اساسی برای بقای کارخانجات و محیط‌های تولیدی تبدیل شده است [۱ و ۲]. در بازار رقابت جهانی موجود، کارخانجات مجبورند مقدار موجودی کم‌تری داشته باشند، اما همچنان باید به نیازهای مشتریان پاسخ دهند. کاهش سطح موجودی منجر به ایجاد یک رابطه نزدیک‌تر بین فعالیت‌های تولید و توزیع می‌شود و این موضوع

* نویسنده مسئول: فردین احمدی‌زر

تلفن: ۰۷۳-۳۳۶۶۰۰۷۳-۰۸۷، پست الکترونیکی: f.ahmadizar@uok.ac.ir

تولیدی^۳ مقایسه نمودند. این مقایسه در یک سیستم تولید بر اساس سفارش که در آن فسادپذیری کالاها نیز لحاظ می‌شود، انجام گرفت. نتایج نشان داد که اندازه بندی دسته تولیدی جواب‌های بهتری نسبت به دسته‌بندی می‌دهد. چنگ و همکاران [۱۷] در همین سال یک فرآیند تولید و توزیع را که مرحله تولید آن به صورت مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی یکسان و مرحله توزیع به صورت مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود مدل می‌شد، مطالعه کرده‌اند. هدف، زمان‌بندی فعالیت‌ها است به طوری که مجموع موزون زمان‌های تکمیل و هزینه‌های توزیع حداقل شود. چانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴ میلادی یک مسئله زمان‌بندی تولید و توزیع یکپارچه را بررسی کرده‌اند که در آن، تولید هر کار توسط یکی از ماشین‌های موازی غیر یکسان انجام می‌شود و سپس بدون موجودی میانی- به‌وسیله وسایل حمل با ظرفیت محدود به دست مشتری مربوطه می‌رسد. در این مقاله، یک مدل ریاضی و یک الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله ارائه شد. همچنین، بلو-فیلهو و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ میلادی یک الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله تولید و توزیع کالاهای فسادپذیر در سطح عملیاتی ارائه داده‌اند.

لی و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۶ میلادی مسئله زمان‌بندی تولید و توزیع چند هدفه با یک ماشین تولیدی و چندین وسیله حمل را مورد بررسی قرار داده‌اند. هدف، حداقل کردن هزینه تحویل و مجموع زمان‌های انتظار مشتری است. اخیراً دوپریا و همکاران [۲۱] مسئله‌ای کاربردی را بررسی کرده‌اند که در آن، کالاهای فسادپذیر باید بعد از تولید و قبل از اینکه غیرقابل استفاده شوند، با کمترین هزینه توزیع شوند. محققین یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و نیز یک روش ابتکاری مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی برای حل مسئله ارائه داده‌اند.

خلاصه‌ای از ادبیات مرور شده در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، در تحقیقاتی که در زمینه یکپارچه‌سازی تولید و توزیع در سطح عملیاتی انجام گرفته است، کم‌تر به مسئله موجودی و تأثیر آن بر هزینه‌های سیستم توجه شده است؛ در حالی که یکی از بخش‌های عمده هزینه‌های لجستیک مربوط به هزینه نگهداری موجودی می‌باشد و ارسال دسته‌ای کالاها فقط هنگامی توجیه اقتصادی دارد که منجر به افزایش بی‌رویه هزینه نگهداری کالاهای تکمیل شده نگردد. این مقاله برای اولین بار، با در نظر گرفتن هزینه‌های موجودی، علاوه بر هزینه‌های تولید، حمل و نقل و تأخیر در تحویل کارها، سعی در نزدیک‌تر شدن هرچه بیشتر مسئله مورد بررسی به دنیای واقعی دارد. علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی، تعدادی از قواعد غلبه مسئله استخراج شده و با یک الگوریتم رقابت استعماری که یکی از روش‌های فراابتکاری نسبتاً جدید است، ادغام شده و برای حل مسئله ارائه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی از یک شیوه

باعث کاهش هزینه‌های سیستم می‌شود؛ این کاهش هزینه - بسته به تابع هدف - تا صد درصد نیز می‌رسد. همچنین، کارایی سیستم با هماهنگی بین تولید و توزیع افزایش می‌یابد. چن و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۸ میلادی یک مدل ریاضی غیرخطی برای بررسی زمان‌بندی تولید و مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره زمانی برای محصولات فسادپذیر پیشنهاد دادند. از مفروضات مسئله این بود که تقاضای خرده‌فروشان تصادفی بوده و فساد محصولات از زمان تولید آغاز می‌شود؛ بنابراین، سود تأمین‌کننده غیرقطعی و وابسته به ارزش و حجم تراکنش محصولات فسادپذیر پس از حمل به محل خرده‌فروش است.

چن [۸] در سال ۲۰۱۰ میلادی مرور جامعی بر مقالاتی که در زمینه زمان‌بندی تولید و توزیع کارها بود، انجام داده است. بعضی از مقالات مرور شده حالتی را بررسی کرده بودند که چند مشتری وجود دارد و برای تحویل سفارش‌هایشان از روش مسیریابی وسایل نقلیه استفاده شده بود. بعضی از این مقالات توابع هدفی مبتنی بر زمان تحویل کارها را لحاظ کرده‌اند (به عنوان مثال، گارسیا و همکاران [۹] و گارسیا و همکاران [۱۰]) و بقیه به سایر توابع هدف پرداخته‌اند (به عنوان مثال، چانگ و لی [۱۱]، چن و وایراکتاراکیس [۱۲] و لی و وایراکتاراکیس [۱۳]).

خداوند و همکاران [۱۴] در سال ۱۳۹۲ مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع را بررسی کردند که در آن محصولات سفارش داده شده توسط یک ماشین تولید شده و توزیع با روش مسیریابی وسایل نقلیه انجام گردیده است. هدف، یافتن یک زمان‌بندی است که هزینه‌های ثابت و متغیر تحویل کالاها و مجموع وزنی کارهای تأخیری را حداقل کند. برای حل این مسئله یک روش ابتکاری و یک الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است.

اولریخ [۱۵] در سال ۲۰۱۳ میلادی زمان‌بندی تولید و توزیع را با هدف حداقل کردن مجموع تأخیرها ادغام نمود. مسئله کلی شامل دو زیر مسئله است. زیر مسئله اول، زمان‌بندی کارها روی ماشین‌های موازی یکسان با زمان‌های آماده‌سازی^۱ وابسته به ماشین را بررسی می‌کند؛ اما زیر مسئله دوم بر روی تحویل کارهای تکمیل شده توسط ناوگانی از وسایل نقلیه که از نظر ظرفیت و زمان آماده‌سازی با یکدیگر متفاوت هستند، تمرکز دارد. برای حل مسئله کلی یک الگوریتم ژنتیک معرفی شده است. مطالعات عددی نشان داد که جواب مسئله ادغامی بهتر از ادغام جواب‌های دو زیر مسئله است.

در صنایع غذایی، به دلیل طبیعت فسادپذیر محصولات که استفاده از سیستم تولید به‌موقع را ایجاب می‌کند، استفاده از یک برنامه‌ریزی ادغامی بسیار مفید است. آموریم و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۳ میلادی برنامه‌ریزی تولید و توزیع در سطح عملیاتی را ادغام نموده و دسته‌بندی^۲ محصولات ارسالی را با اندازه بندی دسته

1. Set up
2. Batching

3. Lot sizing

جدول (۱): خلاصه ادبیات موضوع و جایگاه تحقیق حاضر

منبع	روش حل	مسئله زمان‌بندی مورد بررسی	توضیحات	در نظر گرفتن هزینه نگهداری
چن و همکاران [۷]	روش Nelder-Mead محدود شده بهبود یافته با یک هیوریستیک	$1 \parallel \text{Max profit}$	در نظر گرفتن تقاضا به صورت تصادفی برای محصولات فسادپذیر	-
گارسیا و همکاران [۹]	GRASP	$1 \parallel \text{Max profit}$	-	-
گارسیا و همکاران [۱۰]	الگوریتم جریان هزینه مینیمم و یک هیوریستیک	$Pm \parallel \text{Max profit}$	چند محل تولید و وسایل حمل یکسان	-
چانگ و لی [۱۱]	یک هیوریستیک	$1 \parallel \text{Min the time the vehicle finally returns to the production site}$	وجود یک وسیله حمل با ظرفیت محدود	-
لی و ویراکتاراکیس [۱۳]	یک هیوریستیک و یک approximation scheme	$bun \parallel \text{Min distribution cost + customer cost}$	در نظر گرفتن روش جوی شیر برای توزیع	-
خدابنده و همکاران [۱۴]	یک هیوریستیک و یک الگوریتم ژنتیک	$1 \parallel \alpha(\text{distribution cost}) + (1 - \alpha) \sum U_i$	-	-
اولریخ [۱۵]	الگوریتم ژنتیک	$Pm \parallel \sum T_i$	در نظر گرفتن زمان‌های خدمت‌دهی به مشتری و امکان تحویل سفارش یک مشتری در چند محموله	-
چنگ و همکاران [۱۷]	روش شاخه و کران و تولید ستونی	$Qm \parallel \alpha(\text{distribution cost}) + (1 - \alpha) \sum w_i C_i$	امکان تحویل سفارش یک مشتری در چند محموله	-
آموریم و همکاران [۱۶]	مدل ریاضی	$Pm \parallel \text{Min distribution cost + setup cost}$	مقایسه ارسال دسته‌ای با اندازه بندی دسته تولیدی در سیستم تولید بر اساس سفارش	-
چانگ و همکاران [۱۸]	مدل ریاضی و یک الگوریتم کلونی مورچگان	$Qm \parallel \alpha(\text{distribution cost}) + (1 - \alpha) \sum w_i D_i$	-	-
بلو فیلهو و همکاران [۱۹]	یک هیوریستیک	$Pm \parallel \text{Min production cost + distribution cost}$	محصولات فسادپذیر، در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی ماشین‌آلات	-
لی و همکاران [۲۰]	NSGA-II	$1 \parallel \text{Min distribution cost & customer waiting times}$	هر مشتری فقط یک محصول سفارش می‌دهد	-
دوپریا و همکاران [۲۱]	مدل ریاضی و یک روش مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی	$1 \parallel \text{Min distribution cost}$	محصولات فسادپذیر، هر وسیله حمل چند بار قابل استفاده است	-
مقاله حاضر	الگوریتم رقابت استعماری با قواعد غلبه	$Pm \parallel \text{Min production cost + holding cost + transportation cost + tardiness cost}$	وسایل حمل متفاوت	*

بین جواب‌های قابل استخراج انتخاب کند.

ساختار ادامه مقاله به این صورت است: بخش ۲ به بیان مسئله می‌پردازد. در بخش ۳، مسئله به صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌شود. در بخش ۴ قواعد غلبه و ویژگی‌های جواب بهینه ذکر می‌شود و بخش ۵ به تشریح روش پیشنهادی ارائه شده برای حل مسئله می‌پردازد. در بخش ۶، نتایج محاسباتی و نهایتاً در بخش ۷، نتیجه‌گیری خواهد آمد.

بازنمایی^۱ جدید برای مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع بهره می‌برد که تا حد ممکن باعث صرفه‌جویی در حافظه مورد نیاز می‌شود. به علاوه، یک روش رمزگشایی^۲ جدید ارائه شده است که به الگوریتم کمک می‌کند تا به صورت هوشمند، جواب خوبی را از

1. Representation
2. Decoding

۲- بیان مسئله

یک کارخانه که دارای چند خط تولید یکسان موازی است، به تولید چند نوع محصول اشتغال دارد. هر یک از محصولات توسط یکی از این خطوط تولید و سپس برای مشتری ارسال می‌شود. قبل از پردازش هر محصول باید ماشین‌آلات خط تولید آماده‌سازی و تنظیم شوند. زمان مورد نیاز برای آماده‌سازی بستگی به آخرین محصولی که توسط همین خط تولید شده است، دارد؛ هر چه این دو محصول از نظر طراحی و مشخصات فنی مشابهت بیشتری داشته باشند، زمان کم‌تری برای آماده‌سازی نیاز خواهد بود. آماده‌سازی هر یک از خطوط تولید هزینه‌ای را تحمیل می‌کند که متناسب با مدت زمان آماده‌سازی است.

مشتریان این کارخانه در نقاط جغرافیایی مختلف قرار دارند. هر مشتری می‌تواند بیش از یک نوع محصول را سفارش دهد. به‌منظور کاهش هزینه حمل و استفاده بیشتر از ظرفیت وسایل حمل، سفارش مشتریان به‌صورت دسته‌ای ارسال می‌شوند. دسته، محموله‌ای است که شامل سفارش یک یا چند مشتری است و در یک وسیله حمل بارگیری شده و به دست مشتریان می‌رسد. هر وسیله حمل یک تور را طی می‌کند که از محل انبار کارخانه آغاز می‌شود، سپس یک به یک به محل مشتریانی که باید سفارش آن‌ها را تحویل دهد می‌رود و سرانجام مجدداً به انبار کارخانه بازمی‌گردد. وسایل حمل ظرفیت‌های گوناگون و قیمت‌های متناسب با ظرفیتشان دارند. ارسال سفارش به مشتریان دارای دو نوع هزینه حمل (ثابت و متغیر) و هزینه دیرکرد است. هزینه ثابت حمل، هزینه استفاده از وسیله حمل و هزینه متغیر حمل متناسب با مدت زمان صرف شده برای حمل است. هر مشتری یک زمان سررسید برای دریافت سفارش خود تعیین کرده است. در صورتی که کارخانه در تحویل سفارش به مشتریان تأخیر داشته باشد، باید جریمه تأخیر متناسب با مدت زمان تأخیر را به آن‌ها بپردازد.

از آنجا که هر دسته شامل چند سفارش است، اگر یکی از سفارش‌ها زودتر از بقیه تولید شود باید تا زمان تکمیل تولید سایر سفارش‌های این دسته، در انبار کارخانه منتظر بماند. انبار شدن این کالا منجر به ایجاد هزینه نگهداری می‌شود که متناسب با مدت زمان نگهداری و ضریب هزینه نگهداری کالا می‌باشد.

هدف این مسئله، یافتن یک زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع با حداقل هزینه‌های تنظیم ماشین، هزینه نگهداری، هزینه‌های ثابت و متغیر حمل و هزینه دیرکرد است.

- زمان آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات، وابسته به توالی کارها است.
- تعداد وسایل حمل حداقل به اندازه تعداد مشتریان می‌باشد.
- وسایل حمل از ابتدای بازه زمانی در محل تولید حضور دارند و از هر کدام از آن‌ها فقط یک بار استفاده می‌شود.

- ظرفیت هر وسیله حمل، بیش از اندازه بیشترین مقدار سفارش مشتری‌ها است.
 - سفارش هر مشتری یک‌باره تحویل داده می‌شود.
- آموریم و همکاران [۱۴] اثبات کرده‌اند که مسئله برنامه‌ریزی در سطح عملیاتی تولید و توزیع که در آن توزیع به شکل مسیریابی وسایل نقلیه انجام شود NP-hard است؛ بنابراین، مسئله مورد بررسی در این مقاله نیز NP-hard می‌باشد.

۳- فرمول‌بندی ریاضی

در این بخش، تعریف پارامترها و متغیرها و مدل ریاضی مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع یکپارچه ارائه شده است.

پارامترها:

j	اندیس محصولات
i	اندیس مشتری‌ها (شماره ۰ و $f+1$ نشان‌دهنده محل کارخانه است)
ij	محصول j که توسط مشتری i سفارش داده شده
k	اندیس خطوط تولید
v	اندیس وسیله حمل
f	تعداد مشتری‌ها
m	تعداد خطوط تولیدی
P	تعداد کل محصولات تولیدی
V	تعداد وسایل حمل
n_i	مجموعه محصولات سفارش داده شده توسط مشتری i
P_{ij}	زمان تولید محصول j که توسط مشتری i سفارش داده شده، برابر با حاصل‌ضرب تقاضای مشتری i از محصول j در زمان تولید هر واحد محصول j (p_j)
α_i	جریمه یک واحد زمانی تأخیر در تحویل سفارش مشتری i
β	هزینه یک واحد زمانی تنظیم ماشین
$setup_{ij}$	زمان تنظیم ماشین‌آلات بین تولید دو محصول j و i
$setup_{0j}$	زمان تنظیم ماشین‌آلات اگر اولین محصول تولیدی j باشد.
t_{ij}	زمان سفر از محل مشتری i به محل مشتری j
h_{ij}	هزینه نگهداری کار j برای یک واحد زمانی
F_v	هزینه ثابت استفاده از وسیله حمل v
c^v	هزینه یک واحد زمانی سفر طی شده وسیله حمل v
dem_{ij}	مقدار سفارش محصول j توسط مشتری i
d_i	زمان سررسید برای تحویل سفارش مشتری i
cap_v	ظرفیت وسیله حمل v ، حداکثر تعداد کالایی که می‌تواند بارگیری کند.
q	یک مقدار عددی به اندازه کافی بزرگ

متغیرهای مربوط به زمان‌بندی:

C_{ij}	زمان تکمیل تولید کار ij
y_{kij}	یک متغیر دودویی که اگر کار ij اولین کاری باشد که در خط k تولید شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

کار، یا آخرین کاری است که توسط ماشین انجام می‌شود و یا بعد از آن کار دیگری انجام می‌شود. (۵) و (۶) زمان اتمام تولید هر کار را محدود می‌کند.

$$\sum_{v=1}^V w_i^v = 1, i = 1, \dots, f \quad (7)$$

$$w_0^v \geq w_i^v, v = 1, \dots, V; i = 1, \dots, f \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i' \neq i}}^f z_{ii'}^v = w_{i'}^v, v = 1, \dots, V; i' = 1, \dots, f + 1 \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i' \neq i}}^{f+1} z_{ii'}^v = w_{i'}^v, v = 1, \dots, V; i' = 0, \dots, f \quad (10)$$

$$w_i^v \leq 1 - z_{0,f+1}^v, v = 1, \dots, V; i = 1, \dots, f \quad (11)$$

$$c_v \geq \sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} dem_{ij} w_i^v, v = 1, \dots, V \quad (12)$$

$$S_v \geq C_{ij} - q(1 - w_i^v), i = 1, \dots, f; j \in n_i, v = 1, \dots, V \quad (13)$$

محدودیت (۷) تضمین می‌کند سفارش هر مشتری حتماً توسط یک وسیله حمل به او تحویل داده شود. (۸) بیان می‌کند اگر کاری توسط وسیله v تحویل داده می‌شود، این وسیله حتماً باید از انبار کارخانه شروع به حرکت کند تا زیر تورها حذف شود. (۹) بیان می‌کند وسیله نقلیه‌ای که سفارش مشتری i را تحویل می‌دهد یا از محل انبار کارخانه به سمت محل مشتری حرکت می‌کند و یا از محل یک مشتری دیگر. (۱۰) بیان می‌کند این وسیله حمل بعد از تحویل سفارش به مشتری مورد نظر یا به انبار کارخانه بازمی‌گردد و یا سفارش یک مشتری دیگر را می‌رساند. (۱۱) بیان می‌کند اگر سفارش مشتری i توسط وسیله v تحویل داده می‌شود، آن وسیله حتماً باید به کار گرفته شود (هزینه ثابت آن در تابع هدف منظور گردد). (۱۲) تضمین می‌کند تعداد کالاهایی که توسط یک وسیله حمل تحویل داده می‌شود از ظرفیت وسیله حمل بیشتر نباشد. (۱۳) تضمین می‌کند زمان شروع به حرکت وسیله v بیشتر یا مساوی زمان اتمام تولید کالاهایی باشد که توسط آن حمل می‌شود.

$$Dd_i \geq Dd_{i'} + tt_{ii'} - q(1 - z_{ii'}^v), \quad (14)$$

$$i, i' = 1, \dots, f, i \neq i', v = 1, \dots, V$$

$$Dd_i \geq S_v + tt_{0i} - q(1 - w_i^v), i = 1, \dots, f, v = 1, \dots, V \quad (15)$$

$$T_i \geq Dd_i - d_i, i = 1, \dots, f \quad (16)$$

$$Ht_{ij} \geq S_v - C_{ij} - q(1 - w_i^v), i = 1, \dots, f, j \in n_i, v = 1, \dots, V \quad (17)$$

$$T_i, S_v, C_{ij}, Ht_{ij}, Dd_i \geq 0, i = 1, \dots, f, j \in n_i, v = 1, \dots, V \quad (18)$$

$$x_{ij}, i, j', y_{kij}, z_{ii'}^v, u_{ij}, w_i \in \{0, 1\} \quad (19)$$

محدودیت (۱۴) بیان می‌کند که زمان تحویل سفارش هر مشتری باید حداقل به اندازه زمان تحویل کار قبلی که توسط آن وسیله تحویل داده می‌شود به علاوه زمان حرکت بین محل این دو مشتری باشد. (۱۵) بیان می‌کند زمان تحویل سفارش هر مشتری

یک متغیر دودویی که اگر کار ij دقیقاً قبل از کار $i'j'$ انجام شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

یک متغیر دودویی که اگر کار ij آخرین کار پردازش شده روی یک خط تولید باشد مقدار ۱ می‌گیرد.

مدت زمان نگهداری کار ij در انبار

متغیرهای مربوط به مسیریابی وسیله نقلیه:

متغیر دودویی که اگر سفارش مشتری i توسط وسیله v تحویل شود، مقدار ۱ می‌گیرد.

متغیر دودویی که اگر وسیله حمل v سفارش مشتری i را دقیقاً قبل از سفارش مشتری i' تحویل دهد، مقدار ۱ می‌گیرد.

متغیر دودویی که اگر از وسیله حمل v استفاده نشود، مقدار ۱ می‌گیرد.

زمان شروع به حرکت وسیله حمل v از کارخانه به سمت مشتریان

مقدار تأخیر در تحویل سفارش مشتری i

زمان تحویل سفارش مشتری i

$$\min \sum_{i=1}^f \alpha_i T_i + \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} \beta \text{setup}_{0j} y_{kij} + \sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} \sum_{i'=1}^f \sum_{\substack{j' \in n_{i'} \\ j \neq j'}} \beta \text{setup}_{jj'} x_{ijj'} + \sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} Ht_{ij} h_{ij} + \sum_{v=1}^V F_v (1 - z_{0,f+1}^v) + \sum_{v=1}^V \sum_{i=0}^f \sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^{f+1} c^v tt_{ii'} z_{ii'}^v \quad (1)$$

تابع هدف (۱) مجموع هزینه‌های تأخیر، آماده‌سازی ماشین، هزینه نگهداری، هزینه ثابت و متغیر حمل و نقل را حداقل می‌کند.

$$\sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} y_{kij} \leq 1, k = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ki'j'} + \sum_{i=1}^f \sum_{j \in n_i} x_{ijj'} = 1, i' = 1, \dots, f, j' \in n_{i'}, ij \neq i'j' \quad (3)$$

$$\sum_{i'=1}^f \sum_{\substack{j' \in n_{i'} \\ ij \neq i'j'}} x_{ijj'} + u_{ij} = 1, i = 1, \dots, f, j \in n_i \quad (4)$$

$$C_{ij} \geq (p_{ij} + \text{setup}_{0j}) y_{kij}, i = 1, \dots, f; j \in n_i; k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$C_{ij} \geq C_{i'j'} + p_{ij} + \text{setup}_{jj'} + q(x_{ijj'} - 1) \quad (6)$$

$$i, i' = 1, \dots, f; j \in n_i; j' \in n_{i'}; ij \neq i'j'$$

محدودیت (۲) بیان می‌کند حداکثر یک کار باید در ابتدای توالی کارهای انجام شده توسط هر ماشین وجود داشته باشد. (۳) بیان می‌کند هر کار، یا کار اولی است که توسط ماشین انجام می‌شود و یا بعد از یک کار دیگر انجام می‌شود. (۴) بیان می‌کند هر

ویژگی ۱- در جواب بهینه زمان شروع به اعزام یک دسته برابر با زمان تکمیل تولید آخرین کار متعلق به آن دسته است. اثبات- در نظر بگیرید جوابی وجود دارد که در آن زمان ارسال هر دسته برابر با زمان تکمیل آخرین کار متعلق به آن دسته است. اگر اعزام این دسته‌ها به تعویق افتد، تولید کننده باید دسته تکمیل شده را در انبار نگهداری کند که باعث افزایش هزینه نگهداری و بدتر شدن تابع هدف می‌شود. از طرف دیگر، زمان تحویل سفارش مشتری‌ها افزایش می‌یابد و ممکن است باعث افزایش هزینه تأخیر و در نتیجه افزایش مجموع هزینه‌ها شود.

ویژگی ۲- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن ماشین پس از پردازش کار ij برای مدت زمان IT بیکار است و این کار قرار است با وسیله حمل v ارسال شود. اگر $S_v \geq C_{ij} + IT'$ که $0 < IT' \leq IT$ باشد، باید پردازش کار ij به تعویق بیفتد تا در زمان $C_{ij} + IT'$ تکمیل شود.

اثبات- فرض کنید S_1 یک جواب باشد که در آن ماشین پس از پردازش کار ij برای مدت زمان IT بیکار است، این کار قرار است توسط وسیله حمل v ارسال شود. می‌گیریم IT' بازه زمانی است که $0 < IT' \leq IT$ ، برای آن $S_v \geq C_{ij} + IT'$ است. فرض کنید که S_2 یک جواب مشابه است که در آن پردازش کار ij به تعویق می‌افتد تا در زمان $C_{ij} + IT'$ تکمیل شود. در S_2 ، زمان ارسال کار ij همان S_v است. به وضوح مشخص است که این دو جواب فقط در هزینه نگهداری کار ij با یکدیگر تفاوت دارند: در S_1 این هزینه برابر با $h_{ij}(S_v - C_{ij})$ است، در حالی که در S_2 برابر با $h_{ij}(S_v - C_{ij} - IT')$ است؛ بنابراین S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل است.

کورولاری ۱- در هر جواب بهینه ماشین بعد از پردازش یک کار بیکار نمی‌ماند، مگر آنکه این کار آخرین کار متعلق به یک دسته باشد.

ویژگی ۳- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن ماشین m کار ij را دقیقاً بعد از کار $i'j'$ که هر دو متعلق به یک دسته و از یک نوع محصول هستند و توسط وسیله حمل v ارسال می‌شوند، پردازش می‌کند. اگر $h_{i'j'}p_{ij} > h_{ij}p_{i'j'}$ باید در پردازش جای دو کار با هم عوض شوند.

اثبات- فرض کنید که S_1 یک جواب باشد که در آن کار $i'j'$ دقیقاً بعد از کار ij پردازش می‌شوند و این دو کار متعلق به یک دسته هستند و با ماشین m پردازش می‌شوند. از ویژگی ۲ داریم که ماشین بین پردازش این دو کار، بیکاری ندارد. فرض کنید $h_{i'j'}p_{ij} > h_{ij}p_{i'j'}$. می‌گیریم S_2 یک جواب است که در آن جای این دو کار در توالی پردازش با هم عوض شده‌اند اما زمان تکمیل پردازش بقیه کارها دقیقاً برابر زمان تکمیل پردازش آن‌ها در S_1 می‌باشد. به وضوح مشخص است که این دو جواب فقط در هزینه نگهداری دو کار ij و $i'j'$ با یکدیگر تفاوت دارند. می‌گیریم ST نقطه‌ای از زمان است که در آن کار $i'j'$ در S_1 و کار ij در S_2 آغاز

باید حداقل به اندازه زمان شروع به حرکت وسیله حمل به علاوه زمانی که طول می‌کشد تا وسیله حمل از انبار کارخانه به محل مشتری می‌رسد باشد. (۱۶) بیانگر مقدار تأخیر در تحویل سفارش هر مشتری است. (۱۷) بیان می‌کند زمان نگهداری یک محصول در کارخانه به اندازه فاصله زمانی بین حرکت وسیله حملی که آن را ارسال می‌کند و زمان تکمیل ساخت آن است. (۱۸) و (۱۹) تعریف متغیرهای مثبت و دودویی است.

۴- قواعد غلبه

با افزایش دانش ما از مسئله و دانستن ویژگی‌های جواب بهینه مسئله و به‌کارگیری آن‌ها، الگوریتم حل بهتری ارائه می‌شود. در ادامه برخی قواعد غلبه مسئله آمده است:

لم ۱- تابع هدف مسئله (۱) قاعده‌مند^۱ نیست.

اثبات- تابع هدف این مسئله شامل چهار قسمت است: هزینه آماده‌سازی، هزینه نگهداری، هزینه تأخیر و هزینه حمل و نقل. هزینه تأخیر یک معیار قاعده‌مند است، یعنی هزینه تأخیر با افزایش زمان تکمیل کار کاهش نمی‌یابد. هزینه‌های آماده‌سازی و تنظیمات دستگاه و هزینه حمل و نقل به زمان تکمیل کار وابسته نیست؛ اما هزینه نگهداری می‌تواند با افزایش زمان تکمیل کار کاهش یابد؛ اگر زمان تکمیل کارهای متعلق به یک دسته افزایش یابد، زمان تکمیل این کارها به زمان اعزام وسیله حملی که با آن ارسال می‌شوند نزدیک‌تر می‌شود، بنابراین مدت زمان نگهداری از این کالاها در انبار و در نتیجه هزینه نگهداری کاهش می‌یابد و تابع هدف که مجموعی از این چهار هزینه (آماده‌سازی، نگهداری، تأخیر و حمل و نقل) است هم ممکن است کاهش یابد. در نتیجه تابع هدف این مسئله قاعده‌مند نمی‌باشد.

لم ۲- جواب نهایی لزوماً بدون تأخیر^۲ نیست.

اثبات- یک جواب بدون تأخیر را در نظر بگیرید، اگر به این جواب یک میزان تأخیر غیرضروری قبل از پردازش یک کار وارد کنیم زمان تکمیل پردازش این کار و کارهای بعد از آن افزایش می‌یابد. با توجه به لم ۱، این موضوع ممکن است باعث بهبود جواب مسئله شود.

لم ۳- در جواب بهینه، کارهایی که یک دسته را تشکیل می‌دهند لزوماً به‌صورت پیوسته پردازش نمی‌شوند.

اثبات- در نظر بگیرید یک جواب وجود دارد که در آن کارهایی که یک دسته را تشکیل می‌دهند به صورت پیوسته تولید می‌شوند. اگر یک کار متعلق به این دسته قبلاً و در بین کارهای متعلق به دسته‌های قبلی (دسته‌ای که شامل کارهای مشابه با کار مورد نظر باشد) انجام شوند، هزینه‌های آماده‌سازی کم‌تر شده و متعاقباً ممکن است مجموع هزینه‌ها کاهش یابد.

1. Regular
2. non-delay

ایده ادغامی قبلاً هم برای حل بعضی مسائل زمان‌بندی به کار گرفته شده است [۲۵-۲۲]. الگوریتم رقابت استعماری که توسط آتش‌پز گرگری و لوکاس [۲۶] در سال ۲۰۰۷ ارائه شده، یک الگوریتم فراابتکاری جدید است که از فرآیند رقابت استعماری الهام گرفته است. قابلیت‌های برتر متاهیوریستیک ICA مانند همگرایی سریع‌تر و رسیدن به جواب بهینه کلی بهتر قبلاً به اثبات رسیده است [۲۷] و [۲۸].

الگوریتم رقابت استعماری، با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود که هرکدام از این جواب‌ها یک کشور نامیده می‌شود. در جواب اولیه، تعدادی از قدرتمندترین کشورها (جواب‌های با بهترین تابع هدف) به عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند و بقیه کشورها مستعمره این استعمارگران شده و امپراتوری‌ها تشکیل می‌شوند. با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند جست‌وجو، هر استعمارگر تلاش می‌کند تا مستعمراتش را جذب کند، این موضوع به شکل شبیه شدن مستعمرات به استعمارگر و بنابراین تشدید جست‌وجو مدل می‌شود. به علاوه، یک انقلاب سیاسی یا اجتماعی در یک کشور باعث تغییر خصوصیات آن می‌شود، بدون آنکه به استعمارگرش شبیه شود. انقلاب باعث ایجاد تنوع در فضای جست‌وجو می‌شود. اگر در یک امپراتوری، یک مستعمره به موقعیتی بهتر از استعمارگر برسد، جای این دو با هم عوض می‌شود. تمام امپراتوری‌ها برای به دست آوردن مالکیت مستعمرات یکدیگر با هم رقابت می‌کنند. این فرآیند آن قدر تکرار می‌شود تا فقط یک امپراتوری (جواب بهینه) باقی بماند [۲۷] و [۲۹].

ساختار الگوریتم حل پیشنهادی را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

- ۱- تولید تصادفی جواب‌های اولیه (که می‌توانند شدنی یا غیر شدنی باشند) و اعمال قواعد غلبه روی آن‌ها و تعیین استعمارگران و مستعمرات آنها.
 - ۲- انجام فرآیند جذب با حرکت مستعمرات به سمت استعمارگرهایشان.
 - ۳- انجام فرآیند انقلاب.
 - ۴- بهبود جواب‌ها به کمک قواعد غلبه. اگر یک مستعمره به موقعیتی بهتر از استعمارگرش رسید، جای آن‌ها با یکدیگر عوض می‌شود.
 - ۵- رقابت بین امپراتوری‌ها.
 - ۶- حذف امپراتورهایی که هیچ مستعمره‌ای ندارند.
- تکرار گام‌های ۲ تا ۶ تا زمانی که شرط پایان الگوریتم احراز شود.

۵-۱- ارزش‌دهی آغازین

۵-۱-۱- بازنمایی جواب

در این مقاله، یک شکل جدید از بازنمایی جواب ارائه می‌شود، این بازنمایی جواب قبلاً در هیچ‌یک از مقالات مربوط به زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع به کار گرفته نشده است. از مزیت‌های این روش این است که نسبت به سایر بازنمایی‌های جواب، تعداد درایه

شده‌اند. هزینه‌های نگهداری برای دو کار $i'j$ و ij به ترتیب در S_1 و S_2 به صورت زیر هستند:

$$I \quad Holdingcost(S_1) = h_{ij}(S_v - ST - p_{ij}) + h_{ij}(S_v - ST - p_{ij} - p_{ij})$$

$$II \quad Holdingcost(S_2) = h_{ij}(S_v - ST - p_{ij}) + h_{ij}(S_v - ST - p_{ij} - p_{ij})$$

بعد از محاسبه تفاوت بین I و II به دست می‌آید:
 $holdingcost(S_1) - holdingcost(S_2) = h_{ij} p_{ij} - h_{ij} p_{ij} > 0$
 بنابراین S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل است.

ویژگی ۴- در نظر بگیرید یک جواب داریم که در آن دو کار $i'j$ و ij به طور متوالی انجام می‌شوند. اگر کار $i''j''$ بعد از کار ij و کار $i''j''$ قبل از کار $i'j'$ انجام شوند طوری که
 $i, i', i'', i''' \in F$ and $j \neq j' \neq j'' \neq j'''$
 متعلق به یک دسته بوده و توسط یک ماشین پردازش شوند و اگر داشته باشیم:

$$h_{ij} p_{i'j'} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''} < h_{i'j'} p_{ij} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''}$$

باید جای دو کار $i'j'$ و ij در توالی تولید با هم عوض شود.

اثبات- فرض کنید S_1 یک جواب باشد که در آن کارهای $i''j''$ ، $i'j'$ ، ij و $i''j''$ به ترتیب و پشت سر هم روی ماشین m پردازش می‌شوند. فرض کنید

$$h_{ij} p_{i'j'} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''} < h_{i'j'} p_{ij} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''}$$

می‌گیریم S_2 یک جواب است که در آن جای دو کار $i'j'$ و ij با هم دیگر عوض شده باشد و بقیه کارها در زمان مشابه و برابر با آنچه در S_1 بود تکمیل شوند. این دو جواب فقط در هزینه نگهداری دو کار $i'j'$ و ij و هزینه آماده‌سازی بین کارهای $i''j''$ ، $i'j'$ ، ij و $i''j''$ با یکدیگر فرق دارند. می‌گیریم $C(S_1)$ نشان‌دهنده مجموع هزینه‌های نگهداری دو کار $i'j'$ و ij هم‌چنین هزینه‌های آماده‌سازی بین کارهای $i''j''$ ، $i'j'$ ، ij و $i''j''$ در جواب S_1 باشد و $C(S_2)$ نشان‌دهنده مجموع مقادیر این هزینه‌ها در جواب S_2 باشد؛ بنابراین:

$$I \quad C(S_1) = h_{i'j'}(S_v - C_{i'j'}) + h_{ij}(S_v - C_{ij}) + setup_{j'j'} + setup_{j'j} + setup_{j''j''}$$

$$II \quad C(S_2) = h_{i'j'}(S_v - C_{i'j'}) + h_{ij}(S_v - C_{ij}) + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j''j''}$$

در S_1 داریم $C_{ij} = C_{ij} + p_{ij}$ و در S_2 داریم $C_{i'j'} = C_{i'j'} + p_{i'j'}$ ؛ با جایگذاری این دو معادله در دو تابع I و II داریم
 $h_{ij} p_{i'j'} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''} - (h_{i'j'} p_{ij} + setup_{j'j} + setup_{j''j''} + setup_{j'''j''''}) > 0$

بنابراین، S_2 بر S_1 غلبه می‌کند و اثبات تکمیل می‌شود.

۵- روش حل پیشنهادی برای حل مسئله

به‌منظور حل مسئله مورد بررسی، الگوریتمی ترکیبی از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) با قواعد غلبه طراحی شده است. چنین

درایه‌های مربوط به آن‌ها بخش صحیح یکسان داشته باشند یک دسته را تشکیل می‌دهند و توسط یک وسیله حمل ارسال می‌شوند. هر دسته‌ای که تکمیل شود با وسیله حملی ارسال می‌شود که کمترین هزینه استفاده را در بین وسایل حمل موجود داشته باشد و به این نحو کمترین هزینه ثابت حمل به سیستم تحمیل می‌شود. مسیر هر وسیله حمل بر اساس ترتیب صعودی بخش اعشاری درایه مشتریان مربوط به آن است.

برای روشن شدن بیشتر نحوه رمزگشایی به مثال زیر توجه کنید. یک کارخانه دارای دو خط تولید موازی یکسان است و سه محصول توسط این خطوط تولید می‌شود. زمان آماده سازی ماشین-آلات بین تولید محصولات به قرار جدول (۲) است (زمان آماده سازی بعد از کار صفر به معنای زمان آماده سازی و تنظیم ماشین‌آلات برای تولید اولین کاری که روی خط تولید پردازش می‌شود، است).

جدول (۲): زمان‌های آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات

به از	۰	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۳
۰	-	۱۸	۱۵	۲۰
محصول ۱	-	-	۱۵	۲۰
محصول ۲	-	۱۸	-	۱۵
محصول ۳	-	۱۰	۱۵	-

اطلاعات مربوط به سفارش‌های دریافت شده نیز به قرار جدول (۳) می‌باشند.

جدول (۳): سفارش‌های دریافت شده از مشتریان

شماره مشتری	شماره کار	نوع محصول سفارش داده شده	زمان پردازش
۱	۱	۱	۳
۲	۲	۲	۴
	۳	۳	۵
۳	۴	۱	۴
	۵	۲	۷
۴	۶	۲	۵
۵	۷	۳	۶

حال یک جواب دلخواه که در شکل (۲) نشان داده شده است را در نظر بگیرید:

۳	۱	۵	۷	۴	۲	۶
۲/۲	۴/۱	۳/۱۵	۴/۲	۳/۷		

شکل (۲): بازنمایی یک جواب

سطر اول جواب، توالی تولید کارها و سطر دوم مسیریابی را مشخص می‌سازد. زمان بندی حاصله از رمزگشایی این جواب به روش زیر به دست می‌آید. متوسط بار کاری هر خط (A) برابر با

کم‌تری دارد و فضای کم‌تری را برای محاسبات اشغال می‌کند. همچنین، می‌توان این شکل از بازنمایی جواب را به روش‌های مختلف رمزگشایی کرد و بهترین جواب را از آن استخراج نمود.

هر جواب (کشور) با یک ماتریس دو سطری نمایش داده می‌شود؛ مانند شکل (۱)، سطر اول یک جایگشت از اعداد ۱ تا N (تعداد کل کارها) است که توالی پردازش کارها از آن استخراج می‌شود. سطر دوم شامل f (تعداد مشتری‌ها) درایه a_i از اعداد حقیقی است که در بازه $[1, V+1]$ (تعداد وسایل حمل است) قرار دارند. اینکه سفارش کدام مشتری‌ها باید توسط هر وسیله حمل تحویل داده شود و مسیر هر وسیله حمل چگونه است از سطر دوم استخراج می‌شود.

۱	۲	...	N
---	---	-----	---

a_1	a_2	...	a_f
-------	-------	-----	-------

شکل (۱): نحوه بازنمایی جواب

۵-۱-۲- نحوه رمزگشایی جواب

در این مقاله، یک روش رمزگشایی جدید ارائه شده است که جوابی ارائه می‌دهد که در جهت حداقل ساختن تابع هدف مسئله می‌باشد. روش رمزگشایی از جواب که در این مقاله ارائه شده است، این امکان را می‌دهد که به صورت هوشمند یک جواب خوب از میان جواب‌های ممکن انتخاب شود.

سطر اول از جواب یک جایگشت از کارها است که زمان بندی کارها از این سطر استخراج می‌شود. در این مقاله، رمزگشایی از این سطر به نحوی است که هزینه‌های تولید شامل تنظیم ماشین و نگهداری کمتر شود. برای کاهش هزینه نگهداری (زمان نگهداری)، باید بارگذاری کارها روی ماشین‌ها بالانس شود. اگر بارگذاری روی خطوط تولید بالانس شود، زمان‌های تکمیل آخرین کار روی خطوط از هم اختلاف کمی خواهند داشت و زمان انتظار کالاهای تکمیل شده برای تکمیل تولید سایر کارهای دسته‌شان کاهش می‌یابد. اگر

متوسط بار کاری هر خط تولید را $A = \frac{\sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}}{m}$ در نظر بگیریم،

روش رمزگشایی از جواب به این قرار خواهد بود: کارها به ترتیب ظهور در سطر اول جواب بررسی و زمان بندی می‌شوند؛ هر کار به خط تولیدی تخصیص داده می‌شود که منجر به کمترین زمان آماده‌سازی شود، مشروط به آنکه مقدار بار کاری که قبلاً به آن خط تخصیص داده شده است بیشتر از A نباشد.

مسیریابی وسایل نقلیه از سطر دوم و به نحوی استخراج می‌شود که هزینه ثابت حمل و نقل حداقل شود. سطر دوم شامل اعداد حقیقی در بازه $[1, V+1]$ است، تخصیص مشتری‌ها به وسایل حمل به کمک بخش صحیح عدد اعشاری و مسیریابی وسیله به کمک بخش اعشاری انجام می‌شود. سفارش مشتری‌هایی که

غیرموجه جست‌وجو می‌کنیم و احتمال دستیابی به جواب بهینه- که معمولاً روی مرز فضای جواب است- افزایش می‌یابد. در الگوریتم پیشنهادی یک مقدار جریمه در تابع هزینه منظور شده است تا هزینه مربوط به جواب‌های غیرموجه را افزایش دهد. مقدار جریمه در نظر گرفته شده برای تکرارهای اولیه کم است تا تنوع فضای جست‌وجوی جواب افزایش یابد. در تکرارهای آخر، مقدار این جریمه افزایش می‌یابد تا به همگرایی الگوریتم به یک جواب شدنی کمک کند؛ بنابراین جریمه $w(t)$ به صورت یک تابع نمایی بر حسب شماره تکرار الگوریتم t در نظر گرفته شده و در معادله (۲۰) نمایش داده شده است:

$$w(t) = e^{0.3t} \quad (20)$$

تابع هدف نهایی مسئله به شکل معادله (۲۱) است:

$$f(x,t) = f(x) + w(t)R \quad (21)$$

که در آن $f(x)$ تابع هدف اولیه مسئله و $f(x,t)$ تابع هدف نهایی مسئله و R مقدار انحراف از محدودیت اشاره شده است.

۵-۱-۴- ارزش‌دهی آغازین امپراتوری‌ها

از میان جمعیت اولیه، تعداد (N_{imp}) از قدرتمندترین کشورها به عنوان استعمارگر انتخاب شده و بقیه (N_{col}) به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند و بین استعمارگرها تقسیم می‌شوند. طبق مقاله مروری که توسط حسینی و الخالد [۳۰] در ارتباط با الگوریتم رقابت استعماری نوشته شده است، بهتر است ۱۰-۱۳٪ از جمعیت اولیه را استعمارگران تشکیل دهند. اگر مجموع هزینه‌های یک جواب را با $cost(s)$ نشان دهیم؛ برای توزیع مستعمرات بین استعمارگران، هزینه نرمال شده هر استعمارگر از طریق معادله (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$normalcost(imp) = \max\{cost\} - cost(imp) \quad (22)$$

که $\max\{cost\}$ بیشترین هزینه در میان استعمارگران است. قدرت نرمال شده یک استعمارگر از معادله (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$normalpower(imp) = \frac{normalcost(imp)}{\sum_{q=1}^{N_{imp}} normalcost(q)} \quad (23)$$

با داشتن قدرت نرمال شده استعمارگر، توزیع آغازین مستعمرات میان استعمارگران به نسبت قدرت نرمال شده آن‌ها انجام می‌شود. تعداد NC_{imp} مستعمره به طور تصادفی انتخاب شده و به یک استعمارگر تخصیص می‌یابد، این مقدار از طریق معادله (۲۴) و به طوری تعیین می‌شود که مجموع NC_{imp} ‌ها برابر با N_{col} شود:

$$NC_{imp} = round(normalpower(imp) * N_{col}) \quad (24)$$

۵-۲- جذب

در الگوریتم رقابت استعماری، استعمارگران سعی می‌کنند مستعمراتشان را مانند خودشان کنند؛ این کار جذب نامیده می‌شود. جذب، به صورت حرکت تمام مستعمرات یک استعمارگر در تمام

۱۷ می‌باشد. کار ۳ در ابتدای توالی قرار دارد، هر دو خط تولید یکسان هستند؛ کار ۳ تصادفاً به خط اول تخصیص داده می‌شود. کار بعدی در توالی، کار ۱ می‌باشد که از نوع محصول اول می‌باشد. برای تخصیص این کار به خطوط تولید باید زمان تنظیم ماشین را در دو حالت با هم مقایسه کرد، اول اینکه این کار به عنوان اولین کار خط دوم در نظر گرفته شود و یا اینکه این کار بعد از کار ۳ در خط تولید اول پردازش شود. بر اساس جدول زمان‌های تنظیم، اگر کار ۱ بعد از کار ۳ پردازش شود زمان تنظیم کم‌تر خواهد بود و زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده به خط اول از A بیشتر نیست؛ پس کار ۱ روی خط اول پردازش می‌شود. کار بعدی در توالی، کار ۵ است که از محصول نوع دو می‌باشد. با مقایسه دو حالت که کار ۵ به عنوان اولین کار روی خط دوم تولید شود و یا بعد از کار ۱ روی خط اول، مشاهده می‌شود هزینه آماده‌سازی هر دو حالت یکی است و زمان پردازش کارهای تخصیص داده شده به دو خط از A بیشتر نیست؛ پس به طور تصادفی حالت اول انتخاب می‌شود. کارهای ۷، ۴، ۶ و ۲ هم به همین شکل به خطوط تولید تخصیص داده می‌شوند. زمان‌بندی به دست آمده، در گانت چارت شکل (۳) نمایش داده شده است.

	۲۵	۳۸	۴۲	۶۱	۶۶
L_1	۳	۱	۴	۲	۶
	۲۲		۴۳		
L_2	۵	۷			

شکل (۳): زمان‌بندی استخراج شده از جواب مورد نظر

مسیریابی وسایل حمل به شکل زیر انجام می‌شود. سفارش‌ها در سه دسته ارسال می‌شوند: دسته‌های مشتری ۱، مشتری‌های ۳ و ۵، مشتری‌های ۲ و ۴. درایه مربوط به این مشتری‌ها عدد صحیح یکسان دارند. از گانت چارت مشاهده می‌شود که زمان‌های تکمیل این سه دسته به ترتیب ۳۸، ۴۳ و ۶۶ هستند. ارزان‌ترین وسیله حمل، سفارش مشتری یک را تحویل می‌دهد. دومین وسیله ارزان ابتدا سفارش مشتری ۳ و سپس سفارش مشتری ۵ را تحویل می‌دهد. ارزان‌ترین وسیله حمل باقیمانده نیز در زمان ۶۶، ابتدا سفارش مشتری ۲ و سپس سفارش مشتری ۴ را تحویل می‌دهد.

۵-۱-۳- تولید جمعیت اولیه

برای شروع الگوریتم، به تعداد اندازه جمعیت^۱، جواب اولیه تصادفی تولید می‌کنیم. در این پژوهش، تعداد جمعیت اولیه ضریبی از مجموع تعداد کارها و مشتریان $(N+f)$ است. از آنجا که جواب‌ها به صورت تصادفی تولید شده‌اند، ممکن است بعضی از آنها شدنی نباشند؛ بخش دوم جواب که مربوط به مسیریابی وسایل حمل است ممکن است محدودیت (۱۲) را نقض کند. این محدودیت تضمین می‌کند بار حمل شده توسط هر وسیله از ظرفیت آن کم‌تر باشد. در روش حل پیشنهادی این مقاله، جواب‌های غیرموجه هم بررسی می‌شوند. با این کار، در فرآیند یافتن جواب، بین منطقه موجه و

1. pop size

و مستعمره (δ) یافته و در پارامتر جذب (λ) ضرب می‌شود. هر چه مقدار پارامتر λ کم‌تر باشد منجر به تشدید و هر چه قدر بیشتر در نظر گرفته شود منجر به تنوع بیشتر در منطقه جست‌وجو می‌شود. سپس، مقدار x به‌طور تصادفی از توزیع (۲۵) انتخاب می‌شود و به درایه مربوط به مستعمره اضافه می‌شود؛ یعنی مستعمره به اندازه عدد تصادفی x به سمت استعمارگر حرکت می‌کند.

$$x \sim U(0, \lambda * \delta) \quad (25)$$

اگر پارامتر λ به نحوی مقداردهی شود که مقدار نهایی درایه مورد نظر در مستعمره از عدد $V+1$ بیشتر شود، بخش عدد صحیح درایه برابر با V در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا مقادیر سطر دوم بازنمایی جواب باید در بازه $[1, V+1]$ قرار داشته باشد.

۵-۳- انقلاب

انقلاب، یک تغییر اساسی در ساختار سازمانی است که در یک زمان کوتاه رخ می‌دهد. در فرآیند انقلاب، ممکن است در یک کشور تغییرات ناگهانی در خصوصیات اجتماعی-سیاسی رخ دهد که این تغییرات در جهت حرکت به سمت خصوصیات استعمارگرش نباشد. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب به‌صورت حرکت تصادفی بعضی مستعمرات، برای تولید جواب‌های جدید در منطقه جوابی که تاکنون مشاهده نشده است مدل می‌شود. نقش انقلاب در این الگوریتم، تنوع منطقه جست‌وجو است تا مانع همگرایی زودرس به یک جواب بهینه محلی شود. نرخ انقلاب p_{rev} در این الگوریتم، بیانگر درصدی از مستعمرات است که در آن‌ها انقلاب رخ می‌دهد.

دو استراتژی برای انقلاب پیشنهاد شده است که هر کدام متناسب با یک بخش از جواب است. ابتدا یکی از سطرهاى جواب به‌صورت تصادفی انتخاب شده و سپس استراتژی انقلاب متناسب با آن سطر انجام می‌شود.

۵-۳-۱- استراتژی اول انقلاب

اگر سطر اول برای انقلاب انتخاب شود، دو درایه از این جایگشت به‌طور تصادفی انتخاب شده و جای آن‌ها با هم عوض می‌شود.

۵-۳-۲- استراتژی دوم انقلاب

اگر سطر دوم برای انقلاب انتخاب شود، یکی از درایه‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شده و به جای آن یک عدد حقیقی تصادفی در بازه $[1, V+1]$ تولید شده و جایگزین می‌شود.

۵-۴- رقابت استعماری

استعمارگران برای به دست آوردن مستعمره‌های همدیگر با یکدیگر رقابت دارند. رقابت استعماری برای کسب مالکیت ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری صورت می‌گیرد. برای شروع رقابت، قدرت هر امپراتوری توسط تابعی بر حسب قدرت استعمارگر و مستعمراتش محاسبه می‌شود.

قدرت هر امپراتوری توسط تابعی از مجموع قدرت استعمارگر و مستعمراتش از طریق معادله (۲۶) محاسبه می‌شود:

ابعاد بهینه‌سازی به سمت استعمارگرشان، مدل‌سازی می‌شود. به بیان دیگر، استعمارگران سعی می‌کنند مستعمراتشان را از نظر خصوصیات سیاسی-اجتماعی مانند فرهنگ، زبان و عقاید شبیه به خودشان بکنند. نقش جذب در این الگوریتم، تشدید جست‌وجو است.

هر جواب مسئله از دو بخش تشکیل شده است، برای هر سطر از جواب یک استراتژی جذب جداگانه در نظر گرفته شده است که متناسب با ماهیت آن بخش و نوع بازنمایی جواب باشد. احتمال انتخاب هر کدام از این روش‌های جذب بر اساس تعداد درایه‌های آن بخش است: احتمال انتخاب روش اول جذب برابر با $\frac{N}{N+f}$ و احتمال انتخاب روش دوم برابر با $\frac{f}{N+f}$ است.

۵-۲-۱- استراتژی اول جذب

اگر سطر اول که توالی پردازش کارها است برای جذب انتخاب شود، از روش جذب توسعه داده شده توسط شکرالله پور و همکاران [۳۱] استفاده می‌شود. ابتدا به‌طور تصادفی یکی از کارها در سطر اول استعمارگر انتخاب می‌شود. کار انتخاب شده در سطر اول مستعمره آن قدر شیفت داده می‌شود تا به موقعیتی برابر با موقعیت آن کار در استعمارگر برسد، بقیه کارها هم مانند این کار شیفت داده می‌شوند. در آخر، کار موجود در موقعیت سمت راست کار انتخابی در استعمارگر را یافته و در مستعمره نیز این کار با یک تعویض دوتایی در این موقعیت (سمت راست کار انتخابی) جایگذاری می‌شود. در شکل (۴) این روش جذب به خوبی نمایش داده شده است. کار ۵ به صورت تصادفی انتخاب شده است.

استعمارگر:

۳	۱	۵	۷	۴	۲	۶
---	---	---	---	---	---	---

مستعمره:

۳	۲	۱	۴	۵	۶	۷
---	---	---	---	---	---	---

مستعمره بعد از شیفت دادن:

۱	۴	۵	۶	۷	۳	۲
---	---	---	---	---	---	---



مستعمره بعد از جذب:

۱	۴	۵	۷	۶	۳	۲
---	---	---	---	---	---	---

شکل (۴): استراتژی اول جذب

۵-۲-۲- استراتژی دوم جذب

اگر سطر دوم یعنی مسیریابی وسایل نقلیه برای جذب انتخاب شود، یک استراتژی که برای اعداد حقیقی مناسب است به کار گرفته می‌شود. در این استراتژی، ابتدا یکی از درایه‌های سطر دوم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. سپس، تفاضل درایه مربوطه در استعمارگر

سپس نمونه مسائلی با سایزهای مختلف تولید و به کمک الگوریتم پیشنهادی حل می‌شوند. جواب‌های به دست آمده از الگوریتم با جواب‌های مدل ریاضی مقایسه شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، کارایی الگوریتم بررسی می‌شود.

۶-۱- تولید داده‌ها

برای بررسی عددی الگوریتم، باید ابتدا به پارامترها بر اساس ادبیات موضوع مقادیری نسبت داده شود. برای تولید داده، مقالات هاسه و کیمز [۳۲] و آموریم و همکاران [۱۶] و بلو-فیلهو و همکاران [۱۹] که به تحقیق حاضر نزدیک‌تر هستند، بررسی شدند. مقادیر مربوط به تعدادی از پارامترهای مقاله حاضر که در مقالات قبلی موجود نبودند، به تناسب با دیگر پارامترها تخصیص داده شدند. مقادیر مربوط به پارامترها به قرار زیر می‌باشند.

در مقاله هاسه و کیمز [۳۲]، زمان تولید هر محصول $p_j = 1, j = 1, 2, \dots, P$ است و زمان تولید سفارش هر مشتری از هر محصول برابر با مقدار سفارش ضرب در زمان تولید یک واحد محصول است. مقدار تقاضای یک مشتری از هر محصول از توزیع یکنواخت $U(40, 60)$ پیروی می‌کند.

در مقاله آموریم و همکاران [۱۶] و بلو-فیلهو و همکاران [۱۹]، علاوه بر داده‌های مقاله هاسه و کیمز، برخی دیگر از داده‌ها هم به قرار ذیل تولید شده‌اند. زمان آماده‌سازی دستگاه از توزیع یکنواخت $U(1, 5)$ پیروی می‌کند و هزینه هر واحد زمانی آن برابر با ۶۶/۶۷ است. کارخانه در محلی با مختصات (۵۰ و ۵۰) قرار گرفته است و محل مشتری‌ها از نقطه (۰ و ۰) تا (۱۰۰ و ۱۰۰) پراکنده شده‌اند. همچنین، تعداد وسایل حمل به اندازه تعداد مشتریان است و زمان خدمت در محل مشتری‌ها صفر در نظر گرفته شده است.

سایر پارامترهای مسئله به این شکل تولید شده‌اند. هزینه نگهداری یک واحد از محصول z از توزیع یکنواخت $U(0.01, 0.05)$ پیروی می‌کند و هزینه نگهداری کل سفارش یک مشتری از این محصول (h_{ij}) برابر با حاصل ضرب مقدار سفارش داده شده از محصول در هزینه نگهداری یک واحد از آن است.

سه نوع وسیله حمل با ظرفیت، هزینه ثابت و متغیر مختلف در نظر گرفته شده‌اند. هر چه قدر ظرفیت یک وسیله بیشتر باشد، هزینه ثابت و متغیر استفاده از آن بیشتر است. میانگین سرعت حرکت وسایل حمل برابر 60 Km/h در نظر گرفته شده است و فاصله مکانی محل‌های مشتریان به شکل اقلیدسی محاسبه می‌شوند. جریمه تأخیر تحویل سفارش به مشتریان از توزیع یکنواخت $U \sim (1, 10)$ پیروی می‌کند.

۶-۲- نتایج محاسباتی

برای تعیین کارایی، الگوریتم پیشنهادی با C# کد نویسی شد و جواب‌های به دست آمده از آن با جواب‌های مدل ریاضی که در محیط ۲۴،۸GAMS با حل کننده CPLEX حل شده، مقایسه شد. این الگوریتم توسط یک لپ‌تاپ دارای پردازنده سری core i7

$$TC_n = \text{cost}(\text{imperialis}) + \quad (26)$$

$$\varsigma * \text{mean}\{\text{cost}(\text{colonies of imperialis})\}$$

که TC_n مجموع هزینه n امپراتوری و ς یک عدد مثبت بین صفر و یک است که معمولاً به صفر نزدیک است. طبق مقاله مروری [۳۰]، بهترین مقدار برای این پارامتر ۰/۱ یا ۰/۱۵ است. طی رقابت بین کشورهای استعمارگر، کم‌کم امپراتوری‌های ضعیف‌تر مستعمراتشان را از دست داده و حذف می‌شوند.

به منظور مدل کردن فرآیند رقابت بین امپراتوری‌ها، نیاز به محاسبه مجموع هزینه نرمال شده امپراتوری از طریق معادله (۲۷) است:

$$NTC_n = \max_i \{TC_i\} - TC_n \quad (27)$$

که NTC_n مجموع هزینه نرمال شده n امپراتوری است؛ بنابراین، احتمال مالکیت مستعمره برای هر امپراتوری از طریق معادله (۲۸) محاسبه می‌شود:

$$P_n = \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \quad (28)$$

که مجموع احتمالات برابر با یک می‌شود. ضعیف‌ترین مستعمرات بر اساس احتمال مالکیت امپراتوری‌ها بینشان توزیع می‌شود. این کار به روش ذیل انجام می‌شود.

بردار ستونی P (۲۹) با اندازه N_{imp} وجود دارد که شامل احتمال‌های مالکیت مستعمره توسط امپراتوری‌ها است:

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_{N_{imp}}] \quad (29)$$

بردار R (۳۰) با همان اندازه P وجود دارد که هر کدام از درایه‌های آن به صورت تصادفی از بازه $[0, 1]$ انتخاب شده‌اند:

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_{N_{imp}}] \quad (30)$$

بردار D به شکل معادله (۳۱) تعریف می‌شود:

$$D = P - R = [D_1, D_2, \dots, D_{N_{imp}}] \\ = [P_1 - R_1, P_2 - R_2, \dots, P_{N_{imp}} - R_{N_{imp}}] \quad (31)$$

پس از محاسبه بردار D ، ضعیف‌ترین مستعمره به امپراتوری با بزرگ‌ترین شاخص تخصیص داده می‌شود. محاسبه نکردن تابع توزیع تجمعی باعث افزایش سرعت فرآیند توزیع الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با چرخ رولت الگوریتم ژنتیک- که مشابه آن است- می‌شود.

۵-۵- همگرایی الگوریتم

مشابه سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم رقابت استعماری ادامه می‌یابد تا یکی از شرایط پایان الگوریتم محقق شود. در این پژوهش، شرط پایان الگوریتم باقی ماندن فقط یک امپراتوری یا رسیدن زمان اجرا به حداکثر مقدار ۶۰۰ ثانیه است.

۶- مطالعه عددی

در این بخش، کارایی الگوریتم ارائه شده ارزیابی می‌شود. برای این منظور، ابتدا پارامترهای مسئله به طور قاعده‌مند مقداردهی می‌شوند

محصولات تولیدی، تعداد مشتریها و تعداد کل کارها است. در ستون دوم جواب به دست آمده از حل MILP و زمان حل آن نوشته شده است. همانطور که مشاهده می شود، جواب به دست آمده برای مسائل با ابعاد کوچکتر دقیق می باشد اما با بالا رفتن ابعاد مسائل از دقت جوابها کاسته شده و در حداکثر زمان حل (۷۲۰۰ ثانیه) نرم افزار GAMS قادر به یافتن جواب بهینه نبوده و فقط یک جواب شدنی ارائه داده است. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می شود در ۱۵ نمونه مسئله GAMS قادر به یافتن جواب بهینه بوده است.

در ستون سوم، نتایج الگوریتم رقابت استعماری با عملگرهای جذب و انقلاب پیشنهادی نوشته شده است. نتایج ذکر شده در این ستون در جدول (۵) نشان می دهد که این الگوریتم برای مسائل با اندازه کوچکتر، جوابهایی با انحراف کم یا بسیار کم از جواب MILP ارائه داده است؛ اما با بالاتر رفتن ابعاد مسئله جوابهایی کمتر از جواب MILP ارائه داده است. نتایج جدول (۵) نشان می دهد که این الگوریتم برای ۹ نمونه مسئله به جواب بهینه رسیده است و فاصله ای بین بهترین جواب و بدترین جواب آن نمی باشد. برای مسائل کوچک - جدول (۵) - کیفیت ICA و GAMS تقریباً یکسان بوده اما ICA از نظر زمان حل بر GAMS برتری دارد؛ اما برای مسائل بزرگ - جدول (۶) - ICA هم از نظر کیفیت جواب و هم از نظر زمان حل بر GAMS برتری دارد که این موضوع نشانگر کارایی عملگرهای جذب و انقلاب پیشنهادی می باشد.

سؤالی که پیش می آید این است که آیا الگوریتم رقابت استعماری با قواعد غلبه نتایج بهتری از الگوریتم رقابت استعماری ارائه می دهد یا خیر. به علاوه، مقایسه عملکرد الگوریتم رقابت استعماری با و بدون قواعد غلبه این امکان را به وجود می آورد که اثربخشی و کارایی قواعد غلبه سنجیده شود.

نتایج الگوریتم ادغامی رقابت استعماری با قواعد غلبه در ستون چهارم آمده است؛ در ۱۵ نمونه مسئله به جواب بهینه رسیده است و برای تمام نمونه مسائل (بزرگ یا کوچک) به بهترین جواب (در میان سه روش حل) دست یافته است. در مقایسه با ICA، حتی بدترین جواب این الگوریتم بهتر از بهترین جواب ICA است. این الگوریتم چه از نظر کیفیت و چه از نظر زمان حل با فاصله زیاد از دو روش حل دیگر بهتر می باشد.

CPU دارای سرعت ۲/۵۰GHz و ۱۲GB حافظه کوتاه مدت اجرا شد. چند سری مسئله با ابعاد مختلف تولید شدند: تعداد خطوط تولید بین ۲ تا ۴، تعداد محصولات بین ۲ تا ۱۰ و تعداد مشتریان بین ۵ تا ۱۵ بوده است. تعداد ۱۰۰ نمونه تولید گردید و هر مسئله ۵ بار توسط الگوریتم حل شد.

برای الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی، باید برخی پارامترها که شامل ضریب اندازه جمعیت، درصد تعداد استعمارگران از جمعیت، ضریب جذب β ، ضریب تأثیر هزینه مستعمرات در محاسبه قدرت امپراتوری γ و نرخ انقلاب p_{rev} هستند، مقداردهی شوند. برای تعیین بهترین مقدار برای این پارامترها، باید تنظیم پارامتر صورت گیرد. برای این منظور، تعدادی مسائل از سایزهای مختلف انتخاب شدند؛ به پارامترهای مورد نظر مقادیر مختلفی داده شد و هر مسئله ۵ بار با هر مقدار پارامتر حل شد و بهترین مقدار پارامتر تعیین شد. در جدول (۴) مقادیر مختلف داده شده به این پارامترها و مقدار انتخابی آنها آمده است.

برای سنجش کارایی الگوریتم ارائه شده و قواعد غلبه، مسائل تولید شده به سه روش زیر حل شده و نتایج به دست آمده از آنها با یکدیگر مقایسه شدند:

- حل مسئله با نرم افزار GAMS با حل کننده CPLEX با سقف زمانی ۷۲۰۰ ثانیه
- حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری
- حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری ادغام شده با قواعد غلبه

مسائل حل شده و نتایج به دست آمده از روش های مختلف در جدول های (۵) و (۶) آمده است. مسائل با اندازه کوچک و متوسط در جدول (۵) و مسائل با اندازه بزرگ در جدول (۶) ارائه شده اند. هر نمونه مسئله توسط روش های ذکر شده فوق حل شده و نتایج در هر سطر جدول آمده، میانگین، حداقل و حداکثر جواب به دست آمده از هر روش با کوچکترین جواب به دست آمده مقایسه شده و درصد انحراف آن از کوچکترین جواب - به عنوان معیار کیفیت جواب، ذکر شده است؛ هم چنین، میانگین زمان حل هم ذکر شده است. در هر سطر، جواب بهینه - در صورت وجود - به شکل پررنگ نوشته شده است. در ستون اول جدول، خصوصیات نمونه مسائل حل شده ذکر شده است که شامل تعداد خطوط تولید، تعداد انواع

جدول (۴): تنظیم پارامترها

مقدار انتخاب شده	سطوح مختلف	نوع پارامتر
۱۰۰	۱۰۰، ۱۲۵	پارامتر اندازه جمعیت
۰، ۱	۰/۱۵، ۰/۱	درصد تعداد استعمارگران
۲	۰/۵، ۰/۱۵، ۲	ضریب جذب β
۰، ۱	۰/۴، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۱۵، ۰/۱، ۰/۰۵	ضریب تأثیر هزینه استعمارگر γ
۰، ۱	۰/۵، ۰/۳، ۰/۲۵، ۰/۲، ۰/۱	نرخ انقلاب

جدول (۵): نتایج محاسباتی روش‌های پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط

الگوریتم ادغامی رقابت استعماری و قواعد غلبه				الگوریتم رقابت استعماری				MILP		نمونه مسأله	
زمان	حداکثر	میانگین	حداقل	زمان	حداکثر	میانگین	حداقل	زمان	کیفیت	(k,p,f,N)	(k,p,f)
۱۶۵	.	.	.	۱۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۹۶	.	(۷و۵و۲)	(۷و۵و۲)
۱۲۴	.	.	.	۱۸۴	.	.	.	۱۴۷	.	(۸و۵و۲)	(۸و۵و۲)
۸۵	.	.	.	۷۶	.	.	.	۴	.	(۶و۵و۲)	(۶و۵و۲)
۱۰۱	.	.	.	۸۷	.	.	.	۱۱	.	(۶و۵و۲)	(۶و۵و۲)
۹۸	.	.	.	۱۷۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۷۴	.	(۷و۵و۲)	(۷و۵و۲)
۱۱۴	.	.	.	۱۲۵	.	.	.	۷۱/۸	.	میانگین	
۱۰۷	.	.	.	۱۰۰	.	.	.	۲۲۵۸	.	(۱۰و۴و۲)	(۴و۲و۲)
۵۴	.	.	.	۴۷	.	.	.	۱	.	(۶و۴و۲)	(۶و۴و۲)
۶۲	.	.	.	۷۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۲۱۰	.	(۷و۴و۲)	(۷و۴و۲)
۶۸	.	.	.	۶۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۳۶	.	(۷و۴و۲)	(۷و۴و۲)
۵۱	.	.	.	۵۴	.	.	.	۱	.	(۶و۴و۲)	(۶و۴و۲)
۶۸,۴	.	.	.	۶۹,۴	.	.	.	۵۰/۲	.	میانگین	
۱۵۰	.	.	.	۱۸۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۳۶۵۰	.	(۹و۵و۲)	(۵و۲و۲)
۳۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	.	۲۲۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۲۵۴۸	.	(۱۲و۵و۲)	(۱۲و۵و۲)
۸۸	.	.	.	۱۳۸	.	.	.	۷۲۰۰	.	(۱۰و۳و۲)	(۱۰و۳و۲)
۱۰۴	.	.	.	۲۱۳	.	.	.	۲۹۶۹	.	(۱۱و۳و۲)	(۱۱و۳و۲)
۱۷۰	.	.	.	۱۲۴	.	.	.	۵۶۱۶	.	(۱۰و۳و۲)	(۱۰و۳و۲)
۱۶۳	.	.	.	۱۷۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۴۳۹۶	.	میانگین	
۱۸۴	۰/۰۱	۰/۰۱	.	۴۳۵	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۱۵۰۳	۰/۱۲	(۱۴و۳و۲)	(۷و۲و۲)
۱۲۶	۰/۰۴	۰/۰۱	.	۲۱۹	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۱۲۵۱	۰/۱۲	(۱۱و۳و۲)	(۱۱و۳و۲)
۲۲۰	۰/۰۱	.	.	۳۹۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۱۵۹۸	۰/۰۹	(۱۳و۳و۲)	(۱۳و۳و۲)
۱۲۸	۰/۰۱	.	.	۳۳۵	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۱۵۷۳	۰/۱۳	(۱۲و۳و۲)	(۱۲و۳و۲)
۱۳۴	۰/۰۲	۰/۰۱	.	۲۶۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۱۶۴۶	۰/۱۲	(۱۲و۳و۲)	(۱۲و۳و۲)
۱۵۸	۰/۰۱	.	.	۳۲۹	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۱۵۱۴	۰/۱۱	میانگین	
۲۳۹	۰/۰۲	۰/۰۱	.	۲۴۳	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۲۰۴۸	۰/۱	(۱۵و۳و۲)	(۷و۲و۲)
۲۸۴	۰/۰۳	۰/۰۱	.	۴۵۰	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۱۴۹۵	۰/۰۱	(۱۴و۳و۲)	(۱۴و۳و۲)
۳۱۷	۰/۰۶	۰/۰۵	.	۵۶۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۶۵۸	۰/۲۲	(۱۷و۳و۲)	(۱۷و۳و۲)
۴۶۱	۰/۰۱	۰/۰۱	.	۵۸۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۱۴۱۸	۰/۰۶	(۱۸و۳و۲)	(۱۸و۳و۲)
۲۷۹	۰/۰۵	۰/۰۲	.	۴۳۸	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۲۲۶۳	۰/۳	(۱۶و۳و۲)	(۱۶و۳و۲)
۲۶۸	۰/۰۲	۰/۰۲	.	۴۵۶	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۱۷۷۶	۰/۱۴	میانگین	
۲۹۵	.	.	.	۴۵۵	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۱۳۱۲	۰/۴	(۱۸و۴و۲)	(۷و۲و۲)
۳۴۶	.	.	.	۴۷۱	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۱۲۷۸	۰/۲۱	(۱۶و۴و۲)	(۱۶و۴و۲)
۲۵۱	.	.	.	۳۸۷	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۱۶۳۹	۰/۱۱	(۱۴و۴و۲)	(۱۴و۴و۲)
۲۱۰	.	.	.	۴۱۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۶۰۴	۰/۱۶	(۱۵و۴و۲)	(۱۵و۴و۲)
۴۳۷	.	.	.	۵۸۳	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۲۰۸۷	۰/۳۹	(۱۹و۴و۲)	(۱۹و۴و۲)
۳۰۷	.	.	.	۴۶۱	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۱۵۸۴	۰/۲۵	میانگین	
۲۸۲	۰/۰۳	.	.	۴۶۹	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۳	۱۳۲۵	۰/۳۳	(۱۷و۵و۲)	(۵و۲و۲)
۳۰۹	.	.	.	۳۱۹	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۳	۱۶۴۰	۰/۲۴	(۱۹و۵و۲)	(۱۹و۵و۲)
۲۶۳	۰/۰۸	۰/۰۲	.	۳۲۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۱	۱۴۱۰	۰/۲۳	(۱۸و۵و۲)	(۱۸و۵و۲)
۳۵۲	.	.	.	۴۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۱۱۶۵	۰/۰۷	(۱۵و۵و۲)	(۱۵و۵و۲)
۳۷۰	.	.	.	۴۰۶	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۱۳۴۶	۰/۱۸	(۱۷و۵و۲)	(۱۷و۵و۲)
۳۱۵	۰/۰۲	.	.	۳۸۴	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲	۱۳۷۷	۰/۲۱	میانگین	
۳۹۸	۰/۰۴	۰/۰۲	.	۵۲۲	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۸	۱۵۵۱	۰/۱۹	(۲۰و۶و۲)	(۶و۲و۲)
۳۲۳	.	.	.	۵۷۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۸۵۹	۰/۲۲	(۱۹و۶و۲)	(۱۹و۶و۲)
۴۷۸	۰/۰۹	۰/۰۴	.	۶۰۰	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۰۶۱	۰/۲۵	(۲۲و۶و۲)	(۲۲و۶و۲)
۴۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴	.	۵۷۴	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۱۰۸۹	۰/۲۳	(۲۰و۶و۲)	(۲۰و۶و۲)
۴۱۱	۰/۰۷	۰/۰۴	.	۵۴۷	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۹	۱۲۱۰	۰/۳۹	(۲۱و۶و۲)	(۲۱و۶و۲)
۴۰۵	۰/۰۷	۰/۰۲	.	۵۶۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۱۱۵۴	۰/۲۶	میانگین	
۵۵۳	۰/۰۲	۰/۰۱	.	۵۵۶	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۷	۱۲۸۷	۰/۳	(۲۲و۷و۲)	(۷و۲و۲)
۵۸۷	۰/۱۳	۰/۰۷	.	۶۰۰	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۱	۱۲۰۴	۰/۳۱	(۲۳و۷و۲)	(۲۳و۷و۲)
۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۱	.	۶۰۰	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۸	۱۲۵۴	۰/۴	(۲۴و۷و۲)	(۲۴و۷و۲)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	.	۶۰۰	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۷	۱۰۷۹	۰/۱۹	(۲۵و۷و۲)	(۲۵و۷و۲)
۵۹۵	۰/۰۵	۰/۰۳	.	۶۰۰	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۹	۱۰۴۲	۰/۳	(۲۴و۷و۲)	(۲۴و۷و۲)
۵۸۷	۰/۰۵	۰/۰۲	.	۵۹۱	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۸	۱۱۷۳	۰/۳	میانگین	

۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۱۲۴۵	۰/۱۴	(۳و۴و۱۰و۲۸)	(۳و۴و۱۰)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۲۸۳	۰/۱۲	(۳و۴و۱۰و۲۴)	
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۱۵۴۸	۰/۳	(۳و۴و۱۰و۲۷)	
۶۰۰	۰/۰۹	۰/۰۶	۰	۶۰۰	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۹	۱۵۶۴	۰/۴	(۳و۴و۱۰و۲۷)	
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۹	۱۴۶۲	۰/۳۵	(۳و۴و۱۰و۲۹)	
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۱۴۲۰	۰/۲۶	میانگین	
۲۹۸.۵	۰/۰۲	۰	۰	۳۷۵	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۱۴۹۶	۰/۱۵	میانگین کلی	

جدول (۶): نتایج محاسباتی روش‌های پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بزرگ

الگوریتم ادغامی رقابت استعماری و قواعد غلبه				الگوریتم رقابت استعماری				MILP		نمونه مسأله	
زمان	حداکثر	میانگین	حداقل	زمان	حداکثر	میانگین	حداقل	زمان	کیفیت	(k,p,f,N)	(k,p,f)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۶	۱۳۴۸	۰/۳۱	(۳و۹و۲۸و۵)	(۳و۹و۲۸)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۲۰۷۷	۰/۱۹	(۳و۹و۳۲و۵)	(۳و۹و۳۲)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۱	۰/۱	۰/۱	۲۱۰۴	۰/۱۴	(۳و۹و۳۱و۵)	(۳و۹و۳۱)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۴۰۲۲	۰/۲۵	(۳و۹و۲۹و۵)	(۳و۹و۲۹)
۶۰۰	۰	۰	۰	۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۱۳۰۲	۰/۱۹	(۳و۹و۳۲و۵)	(۳و۹و۳۲)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۲۱۷۰	۰/۲۲	میانگین	
۶۰۰	۰/۱۱	۰/۰۷	۰	۶۰۰	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۴	۱۹۸۷	۰/۲۳	(۳و۱۱و۱۲و۲۹و۵)	(۳و۱۱و۲۹)
۶۰۰	۰/۱	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۲۱۴۷	۰/۲۱	(۳و۱۱و۳۵و۵)	(۳و۱۱و۳۵)
۶۰۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۴	۰/۳۲	۰/۱۷	۱۶۵۵	۰/۴۳	(۳و۱۱و۳۱و۵)	(۳و۱۱و۳۱)
۶۰۰	۰/۱۲	۰/۰۶	۰	۶۰۰	۰/۳۸	۰/۳۴	۰/۳۲	۱۵۵۵	۰/۱۲	(۳و۱۱و۳۳و۵)	(۳و۱۱و۳۳)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۲	۱۷۴۰	۰/۲۲	(۳و۱۱و۳۴و۵)	(۳و۱۱و۳۴)
۶۰۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۲۱	۱۵۰۵	۰/۲۴	میانگین	
۶۰۰	۰/۱۳	۰/۰۶	۰	۶۰۰	۰/۱۴	۰/۱	۰/۰۳	۲۰۸۲	۰/۱۵	(۳و۱۲و۳۳و۵و۱۲)	(۳و۱۲و۳۳)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۶	۰/۱۸	۰/۱۴	۲۰۲۸	۰/۲	(۳و۱۲و۳۶و۵و۱۲)	(۳و۱۲و۳۶)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۱	۲۴۲۶	۰/۲۳	(۳و۱۲و۴۲و۵و۱۲)	(۳و۱۲و۴۲)
۶۰۰	۰/۱۴	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۰۹	۴۹۱۵	۰/۱۳	(۳و۱۲و۴۴و۵و۱۲)	(۳و۱۲و۴۴)
۶۰۰	۰/۰۹	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۱۶	۲۱۲۲	۰/۳۶	(۳و۱۲و۳۶و۵و۱۲)	(۳و۱۲و۳۶)
۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۰	۶۰۰	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۱	۲۷۱۴	۰/۳۱	میانگین	
۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۲۳	۷۲۰۰	۰/۲۹	(۳و۱۳و۴۱و۵و۱۳)	(۳و۱۳و۴۱)
۶۰۰	۰	۰	۰	۶۰۰	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۰۸	۶۹۷۶	۰/۳۶	(۳و۱۳و۴۵و۵و۱۳)	(۳و۱۳و۴۵)
۶۰۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۲	۵۲۳۷	۰/۰۹	(۳و۱۳و۴۵و۵و۱۳)	(۳و۱۳و۴۵)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۳۷	۰/۲۸	۰/۲۲	۹۷۱	۰/۱۱	(۳و۱۳و۴۴و۵و۱۳)	(۳و۱۳و۴۴)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۴۱	۰/۲۸	۰/۱۹	۴۵۰۱	۰/۲۱	(۳و۱۳و۴۶و۵و۱۳)	(۳و۱۳و۴۶)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۳	۰/۲۲	۰/۱۵	۴۹۷۷	۰/۲۱	میانگین	
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۷۲۰۰	۰/۱۵	(۳و۱۵و۵۲و۵و۱۵)	(۳و۱۵و۵۲)
۶۰۰	۰/۱۳	۰/۰۷	۰	۶۰۰	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱	۶۵۷۶	۰/۲۷	(۳و۱۵و۵۱و۵و۱۵)	(۳و۱۵و۵۱)
۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۷	۲۸۸۱	۰/۰۹	(۳و۱۵و۴۸و۵و۱۵)	(۳و۱۵و۴۸)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۶	۵۵۸۰	۰/۱۴	(۳و۱۵و۵۳و۵و۱۵)	(۳و۱۵و۵۳)
۶۰۰	۰/۰۶	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۱	۷۲۰۰	۰/۳۵	(۳و۱۵و۵۰و۵و۱۵)	(۳و۱۵و۵۰)
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۱۳	۰/۱	۰/۰۸	۵۸۸۷	۰/۲	میانگین	
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۰۵	۵۴۸۷	۰/۳۸	(۴و۱۰و۴۶و۷و۱۰)	(۴و۱۰و۴۶)
۶۰۰	۰/۱۲	۰/۰۶	۰	۶۰۰	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۰۹	۷۲۰۰	۰/۴	(۴و۱۰و۴۸و۷و۱۰)	(۴و۱۰و۴۸)
۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۲۵۶۴	۰/۰۸	(۴و۱۰و۵۱و۷و۱۰)	(۴و۱۰و۵۱)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۷۲۰۰	۰/۰۸	(۴و۱۰و۴۹و۷و۱۰)	(۴و۱۰و۴۹)
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۳	۰	۶۰۰	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۸	۲۵۴۶	۰/۳۳	(۴و۱۰و۵۰و۷و۱۰)	(۴و۱۰و۵۰)
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱	۴۹۹۹	۰/۲۵	میانگین	
۶۰۰	۰/۰۴	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۵۴	۰/۴۷	۰/۳۹	۷۲۰۰	۰/۴۱	(۴و۱۲و۵۸و۷و۱۲)	(۴و۱۲و۵۸)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۰	۶۰۰	۰/۳	۰/۲۸	۰/۲۷	۷۲۰۰	۰/۲۲	(۴و۱۲و۵۹و۷و۱۲)	(۴و۱۲و۵۹)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۱۹	۲۵۳۰	۰/۲۶	(۴و۱۲و۶۱و۷و۱۲)	(۴و۱۲و۶۱)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲	۵۳۳۵	۰/۱۹	(۴و۱۲و۶۳و۷و۱۲)	(۴و۱۲و۶۳)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۷۲۰۰	۰/۳۳	(۴و۱۲و۵۶و۷و۱۲)	(۴و۱۲و۵۶)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۲۳	۵۸۹۳	۰/۲۸	میانگین	
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۷۲۰۰	۰/۳۹	(۴و۱۵و۶۹و۷و۱۵)	(۴و۱۵و۶۹)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۸	۷۲۰۰	۰/۲۳	(۴و۱۵و۷۱و۷و۱۵)	(۴و۱۵و۷۱)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۲	۷۲۰۰	۰/۱۱	(۴و۱۵و۷۲و۷و۱۵)	(۴و۱۵و۷۲)

۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۰	۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۳	۶۷۵۹	۰/۲۴	(۴و۱۵و۷۴)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۱۹	۷۲۰۰	۰/۴۲	(۴و۱۵و۷۶)
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۳	۴۴۵۵	۰/۲۷	میانگین
۶۰۰	۰/۱	۰/۰۴	۰	۶۰۰	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۲۹	۷۱۱۲	۰/۴۲	(۴و۱۲و۸۰)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۰۶	۷۲۰۰	۰/۶۳	(۴و۱۲و۸۲)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۲۷	۷۲۰۰	۰/۴۹	(۴و۱۲و۸۳)
۶۰۰	۰/۱۲	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۳۷	۰/۳۲	۰/۲۸	۱۹۳۸	۰/۴۶	(۴و۱۲و۸۷)
۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۳۶	۸۳۶	۰/۲۸	(۴و۱۲و۸۸)
۶۰۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۰	۶۰۰	۰/۳۴	۰/۳	۰/۲۵	۴۸۵۷	۰/۴۵	میانگین
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲	۷۲۰۰	۰/۵۴	(۴و۱۵و۹۸)
۶۰۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰	۶۰۰	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۴	۷۲۰۰	۰/۴۲	(۴و۱۵و۱۰۰)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰	۶۰۰	۰/۳۳	۰/۳	۰/۲۶	۷۲۰۰	۰/۶۶	(۴و۱۵و۱۰۵)
۶۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۵۸	۰/۴۹	۰/۳۸	۷۲۰۰	۰/۶۶	(۴و۱۵و۱۰۷)
۶۰۰	۰/۰۱	۰	۰	۶۰۰	۰/۴۳	۰/۴	۰/۳۴	۷۲۰۰	۰/۵۴	(۴و۱۵و۱۰۹)
۶۰۰	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۲۷	۷۲۰۰	۰/۵۶	میانگین
۶۰۰	۰/۰۵	۰/۰۲	۰	۶۰۰	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۱۵	۴۴۶۵	۰/۲۸	میانگین کلی

از GAMS، کارایی این الگوریتم سنجیده شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا برای مثال‌های کوچک و متوسط کم است. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که برای مسائل با ابعاد بزرگ در دنیای واقعی، که قادر به حل دقیق آن در زمان قابل قبول نیستیم، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی استفاده نمود.

در تحقیقات آتی، می‌توان امکان برون‌سپاری بعضی از سفارش‌ها به پیمانکاران جزء را در نظر گرفت. برون‌سپاری به دلایلی از قبیل پائین بودن ظرفیت تولید و یا تمرکز کارخانه بر فعالیت‌های اصلی و مرکزی‌اش انجام می‌گیرد. پیمانکار یا پیمانکاران جزء را می‌توان نزدیک به محل کارخانه و یا نزدیک به محل جغرافیایی مشتریان انتخاب نمود و به تبع آن، ارسال سفارش‌های برون‌سپاری شده به مشتریان نیز می‌تواند از محل کارخانه یا از محل پیمانکار انجام گیرد. همچنین در تحقیقات آتی، می‌توان امکان انتخاب عمده‌فروشان یا انبارهای توزیع را در نظر گرفت. در واقع، بجای آنکه محصولات تولیدی از محل کارخانه توزیع شوند، مراکزی را به عنوان واسط در نزدیکی بازارهای مصرف احداث نمود تا ارسال کالا به مشتریان را بر عهده گیرند.

مراجع

- [1] Pinedo, M., (2015). *Scheduling*, Springer.
- [2] Hosseinzadeh, M., Sahraeian, R., (2017). "Solving a Multi-Agent Scheduling Problem in a Flow Shop Environment Considering Rejection and Deteriorating Jobs Using a Meta-Heuristic Algorithm", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 5(10): 17-29.
- [3] Chang, Y.C., Li, V.C., Chiang, C.J., (2014). "An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem", *Engineering Optimization*, 46(4): 503-520.
- [4] Sarmiento, A.M., Nagi, R., (1999). "A Review of Integrated Analysis of Production-Distribution Systems", *IIE Transactions*, 31(11): 1061-1074.

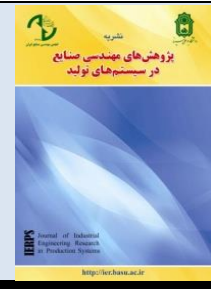
مسئله زمان‌بندی یک مسئله در سطح عملیاتی است و نیاز به حل سریع آن است. با توجه به اینکه زمان حل الگوریتم پیشنهادی خیلی کم‌تر از زمان حل دقیق است؛ هم‌چنین، در حل دقیق برای بعضی مسائل حتی پس از گذشت حداکثر زمان نیز جواب خوبی به دست نیامده است، استفاده از این الگوریتم از نظر زمان به صرفه می‌باشد. از طرف دیگر، با توجه به درصد اختلاف کم بین جواب دقیق و جواب الگوریتم پیشنهادی در مثال‌های کوچک و متوسط، استفاده از این الگوریتم از نظر دقت جواب هم مناسب می‌باشد. با توجه به درصد خطای پایین الگوریتم، می‌توان این‌طور استنباط کرد که مقدار خطا برای مسائل با اندازه بزرگ و خیلی بزرگ که حل دقیق ندارند نیز زیاد نیست؛ پس می‌توان از این الگوریتم برای حل مسائل با اندازه بزرگ هم استفاده نمود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع مورد بررسی قرار گرفت که توزیع به صورت مسیریابی وسیله نقلیه در نظر گرفته شده بود. هدف، یافتن بهترین برنامه تولید و توزیع بود به شکلی که مجموع هزینه‌های تولید، توزیع، تأخیر و نگهداری حداقل شوند. در پژوهش‌هایی که قبلاً انجام گرفته به هزینه نگهداری که یکی از هزینه‌های عمده و تأثیرگذار است توجهی نشده بود. در این مقاله، برای اولین بار هزینه نگهداری کالاهای تولیدی در انبار کارخانه تا زمان ارسال آن‌ها برای مشتری مورد بررسی قرار گرفت. مدل ریاضی مسئله و قواعد غلبه به صورت چند لم و ویژگی‌های جواب بهینه ارائه شد. به علت پیچیدگی بالای مسئله، نرم‌افزارهای حل دقیق قادر به حل مدل ریاضی در ابعاد بزرگ نبودند؛ به همین علت یک الگوریتم ترکیبی از رقابت استعماری و قواعد غلبه که جواب‌های نزدیک به بهینه را در زمان کوتاه‌تری ارائه می‌دهد پیشنهاد شد. برای الگوریتم یک روش رمزگشایی جدید که قادر به تولید جواب‌های با کیفیت بالا است نیز ارائه گردید. بعد از کدنویسی این الگوریتم با C# و مقایسه نتایج الگوریتم با حل دقیق به دست آمده

- [18] Chang, Y.C., Li, V.C., Chiang, C.J., (2014). "An ant colony optimization heuristic for an integrated production and distribution scheduling problem", *Engineering Optimization*, 46(4): 503-520.
- [19] Belo-Filho, M.A.F., Amorim, P., Almada-Lobo. (2015). "An adaptive large neighborhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products", *International Journal of Production Research*, 53 (20): 6040-6058.
- [20] Li, K., Zhou, C., Leung, Y.T.J., Ma, Y., (2016). "Integrated production and delivery with single machine and multiple vehicles", *Expert Systems with Applications*, 57: 12-20.
- [21] Devapriya, P., Ferrell, W., Geismar, N., (2017). "Integrated Production and Distribution Scheduling with a Perishable Product", *European Journal of Operational Research*, 259(3): 906-916.
- [22] Chang, P.C., Chen, S.H., Mani, V., (2009). "A hybrid genetic algorithm with dominance properties for single machine scheduling with dependent penalties", *Applied Mathematical Modelling*, 33: 579-596.
- [23] Chang, P.C., Chen, S.H., (2011). "Integrating dominance properties with genetic algorithms for parallel machine scheduling problems with setup times", *Applied Soft Computing*, 11: 1263-1274.
- [24] Ahmadizar, F., Hosseini, L., (2012). "Bi-criteria single machine scheduling with a time-dependent learning effect and release times", *Applied Mathematical Modelling*, 36(62): 6203-6214.
- [25] Ahmadizar, F., Amiri, Z., (2018). "Outsourcing and scheduling for a two-machine flow shop with release times", *Engineering Optimization*, 50(3): 483-498.
- [26] Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C., (2007). "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore: 4661-4667.
- [27] Atashpaz Gargari, E., Hashemzadeh, F., Rajabioun, R., Lucas, C., (2008). "Colonial competitive algorithm: A novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process", *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics (IJICC)*, 1(3): 337-355.
- [28] Behnamian, J., Zandieh, M., (2001). "A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties", *Expert Systems with Applications*, 38: 14490-14498.
- [29] Ahmadizar, F., Farhadi, S., (2015). "Single-machine batch delivery scheduling with job release dates, due windows and earliness, tardiness, holding and delivery costs", *Computers & Operations Research*, 53: 194-205.
- [30] Hosseini, S.M., Al Khaled, A., (2014). "A survey on the Imperialist Competitive Algorithm meta-
- [5] C ccola, M.E., Zamarripa, M., M ndez, C.A., Espu na, A., (2013). "Toward integrated production and distribution management in multi-echelon", *Computers and Chemical Engineering* 57: 78-94.
- [6] Hall, N.G., Potts, C.N., (2003). "Supply chain scheduling: Batching and delivery", *Operations Research*, 51: 566-584.
- [7] Chen, H.K., Hsueh, C.F., Chang, M.S., (2008). "Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products", *Computers & Operations Research*, 36: 2311-2319.
- [8] Chen, Z.L., (2010). "Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions", *Operations Research* 58(1): 130-148.
- [9] Garcia, J.M., Smith, K., Lozano, S., Guerrero, F., (2002). "A comparison of GRASP and an exact method for solving a production and delivery scheduling problem", *Advances in Soft Computing, Physica*, (14): 431-447.
- [10] Garcia, J.M., Lozano, S., Canca, D., (2004). "Coordinated scheduling of production and delivery from multiple plants", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20 (3): 191-198.
- [11] Chang, Y.C., Lee, C.Y., (2004). "Machine scheduling with job delivery coordination", *European Journal of Operational Research*, 158 (2): 470-487.
- [12] Chen, Z.L., Vairaktarakis, G.L., (2005). "Integrated scheduling of production and distribution operations", *Management Science*, 51 (4): 614-628.
- [13] Li, C.L., Vairaktarakis, G.L., (2007). "Coordinating production and distribution of jobs with bundling operations", *IIE Transactions*, 39 (2): 203-215.
- [14] Khodabandeh, M., Hejazi, S.R., Rasti-Barzoki, M., (2014). "A Genetic Algorithm for an Integrated Production and Distribution Scheduling Problem with VRP", *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 1(2): 167-181.
- [15] Ullrich C.A., (2013). "Integrated machine scheduling and vehicle routing with time windows", *European Journal of Operational Research*, 227: 152-165.
- [16] Amorim, P., Belo-Filho, M.A.F., Toledo, F.M.B., Almeder, C., Almada-Lobo, B., (2013). "Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods", *International Journal of Production Economics*, 146: 208-218.
- [17] Chang, Y.C., Chang, K.H., Chang, T.K. (2013). "Applied column generation-based approach to solve supply chain scheduling problems", *International Journal of Production Research*, 51 (13): 4070-4086.

- assembly flowshop problem”, International Journal of Production Research, 49:3087-103.
- [32] Haase, K., Kimms, A., (2000). “Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities”, International Journal of Production Economics, 66: 159-169.
- heuristic: Implementation in engineering domain and directions for future research”, Applied Soft Computing, 24: 1078-1094.
- [31] Shokrollahpour, E., Zandieh, M., Dorri, B., (2011). “A novel imperialist competitive algorithm for bi-criteria scheduling of the



A Hybrid Imperialist Competitive Algorithm for Integrated Scheduling of Production and Distribution with Vehicle Routing

L. Izadi¹, F. Ahmadizar^{1,*}, J. Arkat¹

¹ Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 January 2018

Accepted 01 July 2018

Keywords:

Integrated scheduling

Vehicle routing

Batch delivery

Holding cost

Imperialist competitive algorithm

Dominance properties

ABSTRACT

In this paper, integrated scheduling of production and distribution with vehicle routing problem is considered. A manufacturer with parallel production lines receives customer orders; after producing them, they are then delivered to the customers in batches by a fleet of vehicles. Unlike a direct delivery of products from the manufacturer to each customer, batch delivery reduces the transportation costs because of the maximum utilization of the vehicle capacities, but it may increase the holding and tardiness costs. The objective is to find an integrated schedule of production and distribution so as to minimize the setup, holding, distribution and tardiness costs. The problem is first formulated as a mixed integer linear programming model. In view of its NP-hardness, a procedure by incorporating dominance properties with imperialist competitive algorithm is then proposed to solve large-sized problem instances. To evaluate the performance of the proposed algorithm, several instances are generated and solved. Computational results demonstrate that the algorithm has a good performance for large problems.

* Corresponding author. Fardin Ahmadizar

Tel.: 087-33660073; E-mail address: f.ahmadizar@uok.ac.ir